



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Αρχιτεκτονική, Αρχές Λειτουργίας, Ζητήματα και  
Μελλοντικές Τάσεις των Λογισμικώς Καθορισμένων και  
Γνωστικών Δικτύων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**Αναλυτή Διονύσιου**

**Επιβλέπων :** Θεολόγου Μιχαήλ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2007





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Αρχιτεκτονική, Αρχές Λειτουργίας, Ζητήματα και  
Μελλοντικές Τάσεις των Λογισμικώς Καθορισμένων και  
Γνωστικών Δικτύων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**Αναλυτή Διονύσιου**

**Επιβλέπων :** Θεολόγου Μιχαήλ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29<sup>η</sup> Μαΐου 2007.

(Υπογραφή)

.....  
Μιχαήλ Θεολόγου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Συκάς Ευστάθιος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Στασινόπουλος Γεώργιος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2007

(Υπογραφή)

.....

**ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αναλυτής Διονύσιος, 2007

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Η εξέλιξη των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας όπως αυτή διαμορφώνεται από το καθεστώς ανταγωνισμού μεταξύ των παροχών, την καταναλωτική ζήτηση για υπηρεσίες και υλικό, και την πρόοδο της τεχνολογίας στον τομέα της σχεδίασης επεξεργαστών ειδικού σκοπού δείχνει να οδηγεί στην δημιουργία συστημάτων με οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά που να επιτρέπουν παγκόσμια ραδιοκάλυψη, αποτελώντας παράλληλα αποδοτική επένδυση σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Οι λογισμικώς καθορισμένες και οι γνωστικές τεχνολογίες δικτύων αποτελούν μια ακμάζουσα τάση στο χώρο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και κατά πάσα πιθανότητα θα είναι ικανές να παράσχουν τα παραπάνω στα επόμενα έτη, μέσω της υλοποίησης όσο το δυνατόν περισσότερων λειτουργιών οποιουδήποτε συστήματος ασύρματης ραδιοεπικοινωνίας σε λογισμικό το οποίο θα τρέχει πάνω από υλικό ικανό να αντεπεξέλθει στις υπολογιστικές απαιτήσεις της εργασίας αυτής.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη της τεχνολογίας λογισμικώς καθορισμένων δικτύων και της τεχνολογίας γνωστικών δικτύων. Η βασική αρχή στην οποία στηρίζονται οι λειτουργίες τους είναι η δυνατότητα κάθε οντότητας/κόμβου να προσαρμόζει μόνος του συγκεκριμένες παραμέτρους μετάδοσης και λήψης, με απώτερο σκοπό την αποδοτική λειτουργία του. Αυτή η προσαρμογή των παραμέτρων βασίζεται σε παρατήρηση διάφορων παραγόντων του περιβάλλοντος, όπως το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, η συμπεριφορά του χρήστη και η κατάσταση του δικτύου. Στην αρχή της εργασίας παρουσιάζεται η βάση υλοποίησης των cognitive συστημάτων, η οποία συνίσταται στη χρήση λογισμικώς καθορισμένων συστημάτων, δηλαδή συστημάτων επικοινωνιών που χρησιμοποιούν λογισμικό για τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των ραδιο-σημάτων και παρουσιάζονται θέματα σχετικά με την τεχνολογία και την αρχιτεκτονική τους. Τέλος, παρουσιάζεται η μετάβαση από τα λογισμικώς καθορισμένα δίκτυα στα γνωστικά δίκτυα, τα θέματα που προκύπτουν από τη χρήση της τεχνολογίας γνωστικών δικτύων και αναλύονται οι μελλοντικές τάσεις γύρω από τις δύο αυτές τεχνολογίες.

**Λέξεις κλειδιά :** «Τεχνολογίες τέταρτης γενιάς, αναδιαμορφωσιμότητα, διεπαφή, δίκτυο, τερματικό, πομποδέκτης, αρχιτεκτονική, μεταφόρτωση λογισμικού, κινητικότητα, κύκλος γνώσης, ευρυζωνικότητα»

## Abstract

Evolution in wireless communication systems as fashioned by the status quo in antagonism among network providers, consuming demand for services and corresponding hardware and technology progress in the field of special purpose processor design indicate a growing need for future communication systems presenting a combination of economical and technical characteristics that enable seamless global roaming and secure investment in the long term. Software-Defined Radio and Cognitive Radio technology comprise a prosperous trend in the wireless communications field expected to meet the above via the realization of as much wireless radio-communication functionality possible for any communication standard in software running over hardware capable of coping with the corresponding computational requirements.

The object of the present paper constitutes the study of Software-Defined Radio and Cognitive Radio technology. The basic principle in which their operations are based on, is the possibility of each entity/node to adapt by itself specific parameters of transmission and reception, with final aim its efficient operation. This adaptation of parameters is based on sensing various factors of the radio environment, such as the spectrum of radiofrequencies, the behaviour of the user and the situation of the network. In the beginning of this paper, the basis of the implementation of cognitive systems is presented, which consists in the use of Software-Defined Radio systems, viz systems of communications that use software for the configuration and demodulation of radio-signals and subjects with regard to the technology and its architecture are presented. Finally, the evolution from Software-Defined Radio to Cognitive Radio is presented, also issues about the use of Cognitive Radio technology are put forward and the future trends round these two technologies are introduced.

**Keywords:** «4G technologies, reconfigurability, interface, network, terminal, transceiver, architecture, download, mobility, cognition cycle, wide band»



## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να απευθύνω ευχαριστίες στον επόπτη της παρούσας εργασίας κύριο Θεολόγου Μιχαήλ, που χωρίς την συμβολή και την καθοδήγησή του η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί. Εξίσου σημαντική υπήρξε η υποστήριξη και η ανταλλαγή απόψεων με τους υποψήφιους διδάκτορες Αδαμοπούλου Ευγενία και Δεμέστιχα Κωνσταντίνο , τους οποίους ευχαριστώ θερμά.



## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>1</b>
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Οι ασύρματες επικοινωνίες στο παρελθόν.....	1
1.2 Οι ασύρματες επικοινωνίες σήμερα.....	2
1.3 Το άμεσο μέλλον.....	3
1.4 Το απώτερο μέλλον.....	4
1.4.1 Πολυπλοκότητα και λογισμικό.....	4
1.4.2 Οι τεχνολογίες Software-Defined Radio και Cognitive Radio ως τεχνολογίες τέταρτης γενιάς.....	5
1.4.2.1 Τα διαφαινόμενα πλεονεκτήματα.....	5
1.4.2.1 Τα θέματα που προκύπτουν.....	7
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	<b>11</b>
2 ΘΕΜΑΤΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ SOFTWARE DEFINED RADIO.....	11
2.1 Αναδιαμόρφωση Συστημάτων και Υπηρεσιών.....	11
2.1.1 Η ανάγκη για αναδιαμόρφωση και προσαρμοστικότητα σε δίκτυα και τερματικά.....	13
2.1.2 Αναδιαμόρφωση, προσαρμοστικότητα και ευέλικτη παροχή υπηρεσιών...	14
2.1.3 Open APIs για υποστήριξη αναδιαμόρφωσης.....	17
2.1.4 Αναδιαμόρφωση σε δίκτυα IP.....	18
2.1.5 Η αναδιαμορφώσιμη αρχιτεκτονική RF (Radio Frequency).....	19
2.1.6 Διεπαφές δεδομένων και ελέγχου.....	20
2.2 Το σύστημα SDR και τα υποστηριζόμενα δικτυακά πρότυπα και αρχιτεκτονικές.....	21
2.2.1 Μοντέλο για ανοικτές πλατφόρμες και ικανότητα αναδιαμόρφωσης.....	21
2.2.2 Προσαρμόσιμο μοντέλο δικτυακού Element.....	22
2.2.3 Έλεγχος αναδιαμόρφωσης τερματικού.....	23
2.2.4 Αρχιτεκτονική συστήματος SDR.....	23
2.2.5 Ασφάλεια αναδιαμόρφωσης.....	28
2.2.6 Ασφαλές download λογισμικού και εφαρμογών.....	30
2.2.7 Έλεγχος αναδιαμόρφωσης.....	31
2.3 Interface διαχείρισης, ελέγχου και δεδομένων διασυνδέουν την πλατφόρμα SDR και την αρχιτεκτονική λογισμικού SDR.....	32
2.3.1 Ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του δικτύου και του τερματικού.....	32
2.3.2 Αρχιτεκτονική SDR για εξοπλισμό SDR.....	34
2.3.2.1 Υποστήριξη υπηρεσιών σε αναδιαμορφώσιμο εξοπλισμό.....	34
2.3.2.2 Διαμορφώσιμες υπηρεσίες και πλατφόρμα υλικολογισμικού.....	36
2.3.2.3 Διαμορφωμένη πλατφόρμα δικτύου.....	38
2.3.2.4 Εγκατάσταση διαμόρφωσης radio.....	40
2.4 Γενικά και προσαρμόσιμα πρωτόκολλα.....	41

2.4.1	Ανάπτυξη γενικής στοίβας πρωτοκόλλου.....	42
2.4.2	Ορισμός αναδιαμορφώσιμου στρώματος σύνδεσης.....	43
2.5	Αρχιτεκτονική αναδιαμορφώσιμου Software radio.....	45
2.5.1	Μοντέλα και αρχιτεκτονικές βασικής ζώνης SDR.....	46
2.6	Η τεχνολογία Software Radio.....	53
2.6.1	Τα χαρακτηριστικά του σήματος.....	54
2.6.1.1	Παρεμβολή.....	55
2.6.2	Η αρχιτεκτονική του δέκτη.....	56
2.6.3	Λειτουργίες και κρισιμότητα.....	62
2.6.4	Μετατροπή ψηφιακού σήματος.....	63
2.6.4.1	Εύρος ζώνης.....	63
2.6.4.2	Flash μετατροπείς ψηφιακού σήματος.....	64
2.6.4.3	Σίγμα-Δέλτα μετατροπείς.....	65
2.6.4.4	Flash ή ΣΔΜ.....	68
2.6.5	Ψηφιακή επεξεργασία σήματος.....	72
2.6.5.1	Ψηφιακή μεταφορά σήματος σε χαμηλή συχνότητα.....	72
2.6.5.2	Προσαρμογή του χρόνου δειγματοληψίας.....	74
2.6.5.3	Επιλογή καναλιού και αποεξάπλωση.....	75
2.6.5.4	Θέματα που σχετίζονται με την υλοποίηση.....	76
2.6.6	Σύνοψη.....	79

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3..... 81**

3	ΘΕΜΑΤΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ COGNITIVE RADIO.....	81
3.1	Cognitive radios : Το μέλλον του Software Defined Radio.....	81
3.1.1	Η μετάβαση από το SDR στο CR.....	81
3.1.2	Υποδομή και drivers για την τεχνολογία CR.....	83
3.1.3	Οι λειτουργίες του CR.....	84
3.2	Ορίζοντας το Cognitive Radio.....	87
3.2.1	Υλοποίηση και προτυποποίηση του Cognitive Radio.....	88
3.2.2	Παραδείγματα cognitive radios.....	90
3.2.3	Πρότυπα και ανάπτυξη του Cognitive Radio.....	94
3.2.4	Εφαρμογές Cognitive Radio.....	95
3.3	Αλληλεπιδρώντα Cognitive Radios.....	100
3.4	Το μοντέλο αναφοράς OSI και το cognitive radio.....	104
3.5	Wideband Sensing Front-end.....	106
3.5.1	Ανιχνευτές σημάτων πρωταρχικών χρηστών.....	108
3.5.2	Μετάδοση ευρείας ζώνης.....	109
3.6	Ad-hoc Cognitive Radio.....	111
3.6.1	Ραδιοπεριβάλλον για σύστημα διανομής συχνότητας.....	112
3.6.2	Ad-hoc σύστημα διανομής συχνοτήτων χρησιμοποιώντας STBC distributed ARQ.....	114
3.7	Ultra Wide Band και Cognitive Radio.....	120
3.8	Εφαρμογές Cognitive Radio σε καταναλωτές.....	123
3.8.1	Παράδειγμα υπηρεσίας καταναλωτή.....	124
3.9	Χρήση CR για μείωση Η/Μ ακτινοβολίας.....	125

3.9.1 Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης .....	126
3.9.2 Προτεινόμενες λύσεις .....	128
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>131</b>
4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ ΠΛΑΝΟ ΓΙΑ SDR ΚΑΙ CR.....	131
4.1 Το μέλλον του Software Defined Radio .....	131
4.1.1 Τα χαρακτηριστικά του SDR .....	132
4.1.2 Τάσεις γύρω από το SDR.....	133
4.2 Το μέλλον γύρω από το Cognitive Radio.....	135
4.2.1 Τα χαρακτηριστικά του Cognitive Radio .....	135
4.2.2 Ερωτήσεις για την έρευνα γύρω από το Cognitive Radio .....	136
4.2.3 Αντίκτυπο της έρευνας γύρω από το Cognitive Radio στο GENI (Global Environment for Network Innovations).....	137
4.2.4 Roadmap τεχνολογίας Cognitive Radio.....	138
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>140</b>

### Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: Η ΑΝΑΓΚΗ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ 3G ΚΑΙ ΠΕΡΑ.....	13
ΕΙΚΟΝΑ 2 : ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ .....	15
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ .....	16
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΓΙΑ ΕΥΕΛΙΚΤΗ ΠΑΡΟΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	17
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΠΟΛΥΕΠΙΠΕΔΕΣ ΠΤΥΧΕΣ ΤΟΥ SOFTWARE DEFINED RADIO.....	19
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΕΠΑΦΗΣ ΓΙΑ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	21
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΑΝΟΙΚΤΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΜΕ ΤΗ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ .....	21
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	22
ΕΙΚΟΝΑ 9 : ΔΙΚΤΥΟ-ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ .....	24
ΕΙΚΟΝΑ 10 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ SDR ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ .....	25
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΟΝΤΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΙΕΠΑΦΩΝ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ (TRSA) ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΡΑΔΙΟ-ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ. ....	27
ΕΙΚΟΝΑ 12 : ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 13 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ SDR – ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	33
ΕΙΚΟΝΑ 14 : ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ 4G.....	35

ΕΙΚΟΝΑ 15 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΥ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ SDR.....	35
ΕΙΚΟΝΑ 16 : ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΥΛΙΚΟΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 17 : ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 18 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΙΝΗΤΟΥ ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΥ .....	39
ΕΙΚΟΝΑ 19 : ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ SDR.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 20 : ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΙΑΣ ΣΤΟΙΒΑΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ SDR.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 21 : ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΓΕΝΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (GLL – GENERIC LINK LAYER, LL – LINK LAYER, L1 – LAYER 1, RAN – RADIO ACCESS NETWORK, CN – CORE NETWORK).....	44
ΕΙΚΟΝΑ 22 : ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΤΟΥ ΓΕΝΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ GLL .....	45
ΕΙΚΟΝΑ 23 : ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ .....	46
ΕΙΚΟΝΑ 24 : ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΟΣ SHADOW CHAIN TRANSCEIVER ..	47
ΕΙΚΟΝΑ 25 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ SOFTWARE ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ .....	49
ΕΙΚΟΝΑ 26 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ HARDWARE ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΩΣΙΜΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 27 : ΔΕΚΤΗΣ BB MODULE.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 28 : ΠΟΜΠΟΣ BB MODULE .....	52
ΕΙΚΟΝΑ 29 : ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΓΙΑ BLUETOOTH .....	52
ΕΙΚΟΝΑ 30 : ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	54
ΕΙΚΟΝΑ 31 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΣΤΟ GSM.....	56
Α) ΔΕΚΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ (DIRECT CONVERSION) .....	59
Β) ΥΠΕΡΕΤΕΡΟΔΥΝΟΣ ΔΕΚΤΗΣ (SUPER HETERODYNE).....	59
Γ) ΔΕΚΤΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΑΠΛΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ (LOW-IF SINGLE CONVERSION RECEIVER) .....	60
Δ) ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΣ IF ΔΕΚΤΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ (WIDEBAND IF DOUBLE CONVERSION RECEIVER).....	60
ΕΙΚΟΝΑ 32 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΕΚΤΩΝ SOFTWARE DEFINED RADIO .....	60
ΕΙΚΟΝΑ 33 : ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΘΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΕΡΕΤΕΡΟΔΥΝΟ ΔΕΚΤΗ .....	60
ΕΙΚΟΝΑ 34 : ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ ΣΗΜΑ ΒΑΣΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ (Α) ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΑΣΤΕΡΙΣΜΟΣ, (Β) ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΛΟΓΩ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΙΣΧΥΟΣ, (Γ) ΑΣΥΜΦΩΝΙΑ ΠΛΑΤΟΥΣ I-Q ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΚΑΙ (Δ) ΑΣΥΜΦΩΝΙΑ ΦΑΣΗΣ I-Q ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 35 : ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΜΟΡΦΗ ΔΕΚΤΗ .....	61
ΕΙΚΟΝΑ 36 : ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕΡΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	65
ΕΙΚΟΝΑ 37 : ΣΙΓΜΑ-ΔΕΛΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΕΣ.....	66
(Α) ΓΕΝΙΚΟ ΣΧΗΜΑ (Β) Σ-Δ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 38 : ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ .....	71

(Α) ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΒΑΣΙΚΗ ΖΩΝΗ .....	73
(Β) ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΒΑΣΙΚΗ ΖΩΝΗ ΣΤΟ ΔΙΑΚΡΙΤΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ...	73
ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 39 : ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΨΗΦΙΑΚΟ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΗ ΒΑΣΙΚΗ ΖΩΝΗ .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 40 : ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ / ΑΠΟΕΞΑΠΛΩΣΗ .....	75
ΕΙΚΟΝΑ 41 : ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΣΤΑΔΙΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΕΞΑΠΛΩΣΗΣ .....	76
(Α) ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΩΡΙΣΜΟ ΣΕ ΥΠΟΦΙΛΤΡΑ .....	78
(Β) ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΥΠΟΦΙΛΤΡΩΝ .....	78
ΕΙΚΟΝΑ 42 : ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΕΞΑΠΛΩΣΗΣ .....	78
ΕΙΚΟΝΑ 43 : ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΞΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΕΞΑΠΛΩΣΗΣ .....	79
ΕΙΚΟΝΑ 44 : ΟΙ «ΓΝΩΣΕΙΣ» ΕΝΟΣ CR .....	82
ΕΙΚΟΝΑ 45 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ DMR .....	84
ΕΙΚΟΝΑ 46 : ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΔΥΟ ΚΟΜΒΩΝ ΜΕΣΩ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ .....	85
ΕΙΚΟΝΑ 47 : ΛΙΣΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ .....	85
ΕΙΚΟΝΑ 48 : Ο ΚΥΚΛΟΣ «ΓΝΩΣΗΣ» ΤΟΥ JOSEPH MITOLA .....	90
ΕΙΚΟΝΑ 49 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ CR1 NATURAL LANGUAGE .....	91
ΕΙΚΟΝΑ 50 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΧG ΤΗΣ DARPA .....	92
ΕΙΚΟΝΑ 51 : ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ BIOLOGICALLY INSPIRED COGNITIVE RADIO .....	93
ΕΙΚΟΝΑ 52 : ΕΝΗΜΕΡΩΜΕΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ BIOLOGICALLY INSPIRED COGNITIVE RADIO .....	94
ΕΙΚΟΝΑ 53 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ COGNITIVE RADIO .....	96
ΕΙΚΟΝΑ 54 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΑΙΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ .....	97
ΕΙΚΟΝΑ 55 : ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΓΙΑ ΕΝΑ CR .....	98
ΕΙΚΟΝΑ 56 : ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ STAR ΚΑΙ AD-HOC .....	99
ΕΙΚΟΝΑ 57 : ΜΟΝΤΕΛΟ INTERACTIVE COGNITIVE RADIO .....	101
ΕΙΚΟΝΑ 58 : ΔΙΚΤΥΟ ΑΠΟ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΙΜΑ RADIOS ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΠΕΣΕΙ ΣΕ LOOP ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΩΝ .....	102
ΕΙΚΟΝΑ 59 : ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	103
ΕΙΚΟΝΑ 60 : ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	103
ΕΙΚΟΝΑ 61Α : ΔΕΚΤΗΣ COGNITIVE RADIO .....	105
ΕΙΚΟΝΑ 61Β : ΠΟΜΠΟΣ COGNITIVE RADIO .....	105
ΕΙΚΟΝΑ 62 : RF FRONT-END ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΥ COGNITIVE RADIO .....	106
ΕΙΚΟΝΑ 63 : WIDEBAND RF FRONT-END ΜΕ ΚΕΡΑΙΑ ΓΙΑ SPATIAL FILTERING .....	107
ΕΙΚΟΝΑ 64 : ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΙΩΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΡΑΙΩΝ .....	108
ΕΙΚΟΝΑ 65 : ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ COGNITIVE RADIO ...	110

ΕΙΚΟΝΑ 66 : ΔΙΑΝΟΜΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ.....	112
ΕΙΚΟΝΑ 67 : ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ COGNITIVE RADIO .....	113
ΕΙΚΟΝΑ 68 : ΣΥΝΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ.....	115
ΕΙΚΟΝΑ 69 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΓΙΑ STBC DISTRIBUTED ARQ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 70 : ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ STBC DISTRIBUTED ARQ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ.....	117
ΕΙΚΟΝΑ 71 : ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ STBC DISTRIBUTED ARQ ΜΕ ΠΑΡΕΜΒΑΣΗ.....	118
ΕΙΚΟΝΑ 72 : ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	119
ΕΙΚΟΝΑ 73 : ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΚΕΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	120
ΕΙΚΟΝΑ 74 : THROUGHPUT ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	120
ΕΙΚΟΝΑ 75 : ΠΙΘΑΝΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΣΥΝΥΠΑΡΞΗΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ UWB ΚΑΙ NB .....	122
ΕΙΚΟΝΑ 76 : ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΩΝ 30 MHz-3 GHz ..	126
ΕΙΚΟΝΑ 77 : Η/Μ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΟΝΤΑ ΣΕ ΑΝΘΡΩΠΟ .....	127
ΕΙΚΟΝΑ 78 : ΣΧΗΜΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ COGNITIVE RADIO.....	128
ΕΙΚΟΝΑ 79 : ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΕΞΥΠΝΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ	129
ΕΙΚΟΝΑ 80 : ΤΥΠΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ SDR.....	132
ΕΙΚΟΝΑ 81 : ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SDR .....	132
ΕΙΚΟΝΑ 82 : ΕΥΚΟΛΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕ OVER-THE-AIR DOWNLOADING.....	133
ΕΙΚΟΝΑ 83 : ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΤΩΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ .....	133
ΕΙΚΟΝΑ 84 : ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ COGNITIVE RADIO .....	139

### Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΥ ΔΕΚΤΗ .....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ GSM, DECT ΚΑΙ GPS .....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 : ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ GSM, DECT ΚΑΙ GPS ΓΙΑ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΡΕΩΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ .....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ .....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 : ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΙΣΜΩΝ ΤΟΥ COGNITIVE RADIO .....	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 : ΕΠΙΠΕΔΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΤΟΥ COGNITIVE RADIO.....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 : ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	118

# Κεφάλαιο 1

## 1 Εισαγωγή

Βρισκόμαστε στη μέση μιας επανάστασης στον τομέα του σχεδιασμού και της κατασκευής συστημάτων ραδιοεπικοινωνίας, απαρχή της οποίας αποτέλεσε η καινοτομία του σχεδιασμού ψηφιακών συστημάτων για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Από το σημείο εκείνο, το ψηφιακό κομμάτι του εξοπλισμού που κατασκευάζονταν για να καλύψει την ανθρώπινη ανάγκη της επικοινωνίας από μακριά άρχισε να μεγαλώνει εις βάρος του αναλογικού, ακολουθώντας τις εκθετικά αυξανόμενες δυνατότητες των ψηφιακών συστημάτων. Μέχρι τα τέλη της επόμενης δεκαετίας, σχεδόν όλα τα δομικά στοιχεία των συστημάτων, από τα σήματα ελέγχου μέχρι και τις κωδικοποιήσεις καναλιού και πηγής υλοποιούνταν πλέον με ψηφιακό τρόπο αξιοποιώντας τις αυξανόμενες δυνατότητες που προσέφερε η καινούρια τεχνολογία.

### 1.1 Οι ασύρματες επικοινωνίες στο παρελθόν

Η πρώτη γενιά (αναλογικών) συστημάτων κινητής τηλεπικοινωνίας περιλάμβανε συστήματα όπως το AMPS στην βόρεια Αμερική, το TACS στην Βρετανία και το NMT στην Σκανδιναβία, συστήματα τα οποία μπορούσαν να προσφέρουν υπηρεσία μετάδοσης φωνής. Τα συστήματα αυτά άρχισαν να εγκαταλείπονται πολύ γρήγορα και να αντικαθίστανται από ψηφιακά των οποίων η ευκολία κατασκευής, το μειωμένο κόστος και κυρίως τα πλεονεκτήματα των νέων τεχνολογιών που μπορούσαν να υλοποιούν άνοιξαν την αγορά τηλεπικοινωνιών στο ευρύ κοινό και μέσα σε λίγα χρόνια την έφεραν να κατηγοριοποιείται σε γενιές συστημάτων ικανές να προσφέρουν υποστήριξη πληθώρας υπηρεσιών πέραν της βασικής τηλεφωνικής. Τα καινούρια συστήματα μπορούσαν να προσφέρουν εκτός από φωνή, υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων, fax και σύντομων μηνυμάτων κειμένου, αυξημένη ασφάλεια, αξιοπιστία (μετάδοση καναλιού, διαδικασία handoff, κ.α.) και αυξημένα επίπεδα ποιότητας στην επικοινωνία. Γρήγορα αναπτύχθηκε ένας αριθμός συστημάτων με βάση τις καινούριες τεχνολογίες, όπως η ψηφιακή εξέλιξη του αναλογικού AMPS που είναι το σύστημα 2<sup>ης</sup> γενιάς TDMA (Time Division Multiple Access) το οποίο λειτουργεί βασιζόμενο στην πολυπλεξία χρόνου στις ζώνες συχνοτήτων των 800MHz και 1900MHz κυρίως στην βόρεια Αμερική. Μια παραλλαγή του η οποία χρησιμοποιείται στην Ιαπωνία είναι το σύστημα PDC (Pacific Digital Cellular) ενώ επίσης αναπτύχθηκε και καθιερώθηκε ταχύτατα το σύστημα GSM (Global System for Mobile communications) το οποίο λειτουργεί σε ζώνες συχνοτήτων γύρω από τα 800, 1800, 1900 MHz, χρησιμοποιεί τεχνική πολυπλεξίας χρόνου/συχνότητας (TDMA/FDMA) καθώς και τεχνικές διαπίδυσης συχνότητας (FH – Frequency Hopping). Επιτυχημένο σύστημα δεύτερης γενιάς θεωρείται τέλος και το CDMAOne (IS-95) το οποίο είναι σύστημα φασματικής εξάπλωσης άμεσης ακολουθίας (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum) και το οποίο αναπτύχθηκε κυρίως στην βόρεια Αμερική την Ιαπωνία και την Κορέα.

Η ανάπτυξη των ψηφιακών συστημάτων κυψελοειδούς ασύρματης τηλεπικοινωνίας δεύτερης γενιάς επέφερε την εκρηκτική αύξηση της αγοράς τηλεπικοινωνιών η οποία πυροδοτήθηκε από την ταχύτατη εξάπλωση τους. Η αύξηση σε ζήτηση για υπηρεσίες κινητής τηλεπικοινωνίας ξεπέρασε κάθε προηγούμενο και σε λιγότερο από είκοσι χρόνια η παγκόσμια συνδρομητική βάση για υπηρεσίες πάνω από ασύρματο δίκτυο έχει ξεπεράσει τα πεντακόσια εκατομμύρια πελάτες. Ο αριθμός των συνδρομητών αντιστοιχούσε σε εικοσιπέντε μόλις χιλιάδες το 1984, σε δεκαέξι εκατομμύρια το 1994 και σε πενήντα εκατομμύρια το 1997. Το σύστημα GSM, το οποίο πολύ γρήγορα καθιερώθηκε ως το πιο διαδεδομένο standard κυψελοειδούς τηλεπικοινωνίας, σήμερα αριθμεί 720 εκατομμύρια συνδρομητές παγκοσμίως, σύμφωνα με στοιχεία από το [www.gsmworld.com](http://www.gsmworld.com) για τα τέλη Ιουνίου του 2002.

## 1.2 Οι ασύρματες επικοινωνίες σήμερα

Σήμερα βρισκόμαστε στη μεταβατική εποχή από την δεύτερη στην τρίτη γενιά συστημάτων κινητής ραδιοεπικοινωνίας (2.5G) η οποία χαρακτηρίζεται από την ζήτηση περισσότερων υπηρεσιών και μεγαλύτερων ρυθμών κυρίως για μεταφορά δεδομένων και για παροχή value-added υπηρεσιών. Παγκοσμίως – με ελάχιστα σημεία του πλανήτη να αποτελούν εξαίρεση, όπως η Κορέα και η βόρεια Αμερική – η ζήτηση για υπηρεσίες τρίτης γενιάς (υπηρεσίες πολυμέσων, σύνδεση στο διαδίκτυο, γρήγοροι ρυθμοί δεδομένων) είναι ακόμη αρκετά χαμηλή σε σχέση με το κόστος ανάπτυξης ενός εκτεταμένου δικτύου. Από την άλλη μεριά, οι ραδιοπόροι που χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων στα συστήματα δεύτερης γενιάς είναι κοινοί με αυτούς που χρησιμοποιούνται για μετάδοση φωνητικών κλήσεων ενώ οι κωδικοποιητές που χρησιμοποιούνται παράγουν χαμηλούς ρυθμούς. Τα συστήματα αυτά σχεδιάστηκαν πριν από τουλάχιστον πέντε χρόνια όταν ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων π.χ. 9.6 Kbps, που για τα σημερινά δεδομένα είναι αργοί, θεωρούνταν ικανοποιητικοί. Όλοι οι παραπάνω λόγοι συντέλεσαν στην ανάπτυξη των συστημάτων που χαρακτηρίζονται δεύτερης συν γενιάς.

Η ζήτηση για πιο γρήγορη μεταφορά δεδομένων καλύπτεται αυτή τη στιγμή με βελτιώσεις ή αναβαθμίσεις των ήδη υπάρχοντων συστημάτων δεύτερης γενιάς οι οποίες καταφέρνουν να παρέχουν αυξημένους ρυθμούς μέσω επεκτάσεων των υπάρχοντων πλατφόρμων. Η αναβάθμιση στην υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων σε πακέτα του GSM η οποία υλοποιεί μεταγωγή κυκλώματος είναι η υπηρεσία υψηλής ταχύτητας μεταγωγής κυκλώματος (HSCS - High Speed Circuit Switching) η οποία συνδυάζει από δυο μέχρι τέσσερις χρονοσχισμές από τις οκτώ που υπάρχουν σε κάθε πλαίσιο (frame) για να παρέχει ρυθμούς 28.8 Kbps ως 57.6 Kbps απαιτώντας ελάχιστες αλλαγές στην υποδομή του δικτύου. Ωστόσο, η αναβάθμιση που δείχνει να κυριαρχεί στην υπηρεσία μετάδοσης πακέτων είναι η καλούμενη «γενική υπηρεσία μετάδοσης ραδιοπακέτων» GPRS (General Packet Radio Service), η οποία μπορεί να συνδυάσει μέχρι και όλες τις χρονοσχισμές ενός GSM frame για να μεταφέρει πακέτα διαδικτύου σε ταχύτητες μέχρι και 160Kbps θεωρητικά υποστηρίζοντας πακέτα μορφής διαδικτύου (IP packets) αλλά και πακέτα τύπου X-25. Το GPRS αποτελεί μια γνήσια υπηρεσία γενιάς 2.5: χρησιμοποιεί το υπάρχον εύρος ζώνης καναλιού του GSM (200KHz) ενώ για την εγκατάστασή του προστίθενται ειδικοί κόμβοι (nodes) που διαχειρίζονται την κίνηση εντός του δικτύου και κόμβοι εισόδου (gateways) που παρέχουν διασύνδεση με άλλα



δίκτυα όπως το διαδίκτυο ή ιδιωτικά δίκτυα. Από την πλευρά των τερματικών, για να μπορούν οι συνδρομητές να λαμβάνουν την υπηρεσία πρέπει να έχουν πρόσθετο υλικό, πράγμα που τα κάνει ασύμβατα - ως προς την υπηρεσία αυτή και μόνο - με τα συμβατικά τερματικά του GSM. Ως επόμενη φάση εξέλιξης προβλέπεται η εισαγωγή του συστήματος EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) το οποίο αποτελεί τεχνολογία που επιτυγχάνει υψηλές επιδόσεις εισάγοντας νέες μεθόδους διαμόρφωσης (8-PSK) και κωδικοποίησης στο φυσικό επίπεδο. Παράλληλα, τα ανώτερα επίπεδα που χρησιμοποιούνται από τους κόμβους του GPRS αφήνονται ανέπαφα. Το αποτέλεσμα μετράται σε ρυθμούς δεδομένων μέχρι 500 Kbps χωρίς μεταβολή στην υποκείμενη υποδομή GSM/GPRS με μόνες προσθήκες την εισαγωγή καινούριων (plug-in) πομποδεκτών και αναβαθμίσεις λογισμικού. Η λύση που προκύπτει από την εισαγωγή του EDGE υποστηρίχθηκε από τις παγκόσμιες ενώσεις παροχέων IS-136 (TDMA) και UWCC (Universal Wireless Communications Consortium).

Ανάλογες βελτιώσεις έγιναν και στα συστήματα εξάπλωσης φάσματος και πιο συγκεκριμένα στο CDMAOne (IS-95A) προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες για μετάδοση πακέτων. Το αποτέλεσμα ήταν το πρότυπο IS-95B στο οποίο μπορούν να συνδυαστούν μέχρι και οκτώ κανάλια για μετάδοση πακέτων, πράγμα που αθροίζεται σε ρυθμό μέχρι και 64Kbps. Όπως και στην περίπτωση του GPRS οι καινούριες συσκευές δεν είναι συμβατές με τις παλαιότερες, οι οποίες δεν μπορούν να υποστηρίξουν τους αυξημένους ρυθμούς δεδομένων. Το επόμενο βήμα, ανάλογα με την περίπτωση των GSM συστημάτων είναι το πρότυπο Cdma2000 το οποίο αναπτύσσεται σε δύο φάσεις που ονομάζονται 1X-RTT και 3X-RTT. Οι αριθμοί 1X και 3X αντιστοιχούν στον αριθμό των καναλιών εύρους 1.25MHz που χρησιμοποιούνται, ένα και τρία αντίστοιχα, ενώ RTT είναι η συντομογραφία της φράσης Radio-Transmission Technology. Η τεχνολογία 1X-RTT μπορεί να υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων για πακέτα διαδικτύου (IP) μέχρι και 144 Kbps και μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν από το υπάρχον CDMAOne δίκτυο μια και χρησιμοποιεί ένα ακριβώς κανάλι. Θεωρείται συνεπώς τεχνολογία γενιάς 2.5 και ως τέτοια φέρει όλα τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε και παραπάνω για τις τεχνολογίες αυτής της ενδιάμεσης γενιάς. Η τεχνολογία 3X-RTT αντίθετα είναι τεχνολογία τρίτης γενιάς.

### 1.3 Το άμεσο μέλλον

Η εξέλιξη των συστημάτων κυψελοειδούς ασύρματης τηλεπικοινωνίας τρίτης γενιάς (3G) άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 όταν ο τομέας της παγκόσμιας ένωσης ραδιοεπικοινωνιών και την ανάπτυξη και εξάπλωσή τους (ITU-R) ανακοίνωσε τα αποτελέσματα της μελέτης που αφορούσαν τις απαιτήσεις για τα συστήματα ασύρματης ραδιοεπικοινωνίας τρίτης γενιάς. Η πρωτοβουλία εκείνη αποτέλεσε την γέννηση του μελλοντικού δημοσίου επίγειου συστήματος κινητής ραδιοεπικοινωνίας FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System). Το επόμενο βήμα αποτέλεσε ο καθορισμός των ζωνών συχνοτήτων που ένα τέτοιο σύστημα θα χρησιμοποιούσε σε παγκόσμιο επίπεδο στο μέλλον, πράγμα το οποίο πραγματοποιήθηκε το 1992 στα πλαίσια του παγκοσμίου συνεδρίου για την διαχείριση των ραδιοπόρων (WARC – World Administrative Radio Conference). Οι ζώνες που αποδόθηκαν είναι αυτές από 1885 MHz έως 2025 MHz και από 2110 MHz έως 2200MHz, ενώ σύντομα το δύσκολο στη χρήση

ακρωνύμιο FPLMTS αντικαταστάθηκε από το πιο εύχρηστο IMT-2000 (International Mobile Telecommunications system) το οποίο αναφέρεται στο διεθνές σύστημα κινητής ραδιοεπικοινωνίας για το έτος 2000.

Εκτός από τον στόχο να προσφέρει υπηρεσίες μέχρι και ρυθμού 2 Mbps μέσω τεχνολογιών αποτελεσματικής εκμετάλλευσης του φάσματος, το σύστημα IMT-2000 είχε ως σκοπό την παροχή αδιάλειπτης παγκόσμιας ραδιοκάλυψης, την επιτυχή δηλαδή επικοινωνία δύο οποιονδήποτε κινητών τερματικών σταθμών. Το IMT-2000 στοχεύει να είναι ιδιαίτερα ευέλικτο έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε οποιοδήποτε περιβάλλον διάδοσης και για όλα τα δυνατά σενάρια: επικοινωνία από και προς εσωτερικούς εξωτερικούς χώρους, για κινούμενες ή μη τερματικές συσκευές, σε αστικό ή ημιαστικό ή βιομηχανικό περιβάλλον κ.τ.λ. Ακόμη, θα πρέπει να μπορεί να χειρίζεται τις υπηρεσίες όλων των ειδών, μεταγωγής πακέτων ή μεταγωγής κυκλώματος και όλων των ρυθμών, σταθερών είτε μεταβαλλόμενων, καθώς και να παρέχει ποιότητα υπηρεσίας (QoS) όπου απαιτείται, κατά αναλογία με τα ενσύρματα δίκτυα. Όλα τα παραπάνω θα πρέπει να υλοποιηθούν με ανεκτό κόστος.

Αρκετοί οργανισμοί παραγωγής προτύπων με κύριους το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο ETSI (European Telecommunications Standards Institute), τον Ιαπωνικό ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) και τον οργανισμό των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής TIA (Telecommunications Industry Association) συντόνισαν τις προσπάθειές τους για τον καθορισμό των προτύπων για το σύστημα IMT-2000. Ένα σύνολο από δεκαπέντε εκθέσεις προτάσεων για την τεχνολογία της ραδιομετάδοσης που θα έπρεπε να υιοθετηθεί στο IMT-2000 πρότυπο κατετέθησαν στην επιτροπή ITU-R (ITU – Radio communications group) τον Ιούνιο του 1998, εκ των οποίων οι πέντε πρότειναν δορυφορικές λύσεις ενώ οι λοιπές δέκα πρότειναν λύσεις επίγειου δικτύου. Οι περισσότερες από τις προτάσεις που βασίστηκαν σε επίγειες λύσεις πρότειναν την τεχνολογία Wideband-CDMA ως τεχνολογία πρόσβασης δικτύου λόγω των πολύ καλών χαρακτηριστικών που παρουσιάζει και λόγω των αποτελεσμάτων που απέδωσε μέσω πειραματισμών και ερευνών που διενεργήθηκαν στα πλαίσια πολλών προγραμμάτων, όπως τα Ευρωπαϊκά ACTS και RACE, που χρηματοδοτήθηκαν για αυτό τον σκοπό. Την Ευρωπαϊκή πρόταση αποτελεί το σύστημα UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access) την πρόταση των Ηνωμένων Πολιτειών το CDMA-2000 και την Ιαπωνική το σύστημα W-CDMA. Οι προτάσεις της Ευρώπης και της Ιαπωνίας ήταν εξαρχής συγγενικές και τελικά συμφωνήθηκε να εναρμονιστούν σε μια κοινή πρόταση.

## **1.4 Το αιώτερο μέλλον**

### **1.4.1 Πολυπλοκότητα και λογισμικό**

Η εξέταση της εξέλιξης των προτύπων ραδιοεπικοινωνίας με γνώμονα τον ρυθμό καναλιού που αποδίδουν και την υποκείμενη οργάνωση του δικτύου οδηγεί σε συμπεράσματα που συσχετίζουν την τελευταία με την πολυπλοκότητα του λογισμικού μέρους του συστήματος. Παλαιότερα συστήματα σχεδιασμένα για επικοινωνία μονόδρομη ή σημείου προς σημείο (FDM radios, T-carrier PCM συστήματα) είχαν πολύ περιορισμένες απαιτήσεις για λογισμικό τόσο σε φυσικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο σύνδεσης δεδομένων. Αργότερα, στα τέλη της δεκαετίας του 1980, άρχισε η διάδοση των

embedded επεξεργαστών σε συστήματα ραδιοεπικοινωνίας. Αρχικά την υποστήριξη ελέγχου και ρύθμισης των παραμέτρων του συστήματος αποτελούσαν δάμπιτοι μικροελεγκτές. Στη συνέχεια, 16άμπιτοι μικροεπεξεργαστές συνδυάστηκαν με κυκλώματα ASICs ή FPGAs συμβάλλοντας στην επανάσταση των ψηφιακών ραδιοεπικοινωνιών. Τέτοια συστήματα σήμερα απαιτούν πάνω από δέκα χιλιάδες γραμμές κώδικα που αφορούν το σύστημα διαμόρφωσης-αποδιαμόρφωσης, τα πρωτόκολλα σύνδεσης δεδομένων, τη κωδικοποίηση φωνής και άλλες λειτουργίες. Με την σταδιακή αύξηση της πολυπλοκότητας που προέκυψε από την εισαγωγή τεχνικών όπως η εξάπλωση φάσματος και η τεχνική frequency hopping οι ανάγκες σε λογισμικό αυξήθηκαν αρκετά τα τελευταία χρόνια.

Μέχρι και πριν από την τρίτη γενιά συστημάτων κινητής ραδιοεπικοινωνίας τα δίκτυα που αποτελούν το σύστημα είναι οργανωμένα σε μία και μοναδική ιεραρχία. Κάθε κινητός σταθμός (MS – Mobile Station) υπάγεται σε έναν σταθμό βάσης (BTS – Base Transceiver Station), ο οποίος υπάγεται σε με την σειρά του σε έναν ελεγκτή σταθμού βάσης (BSC – Base Station Controller) που είναι υπαγόμενος σε μοναδικό γραφείο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (MTSO – Mobile Telephone Switching Office). Η μεταφορά του κινητού σταθμού από έναν σταθμό βάσης σε κάποιον άλλον (handoff) είναι διαδικασία που γίνεται υπό το πρίσμα μιας ιεραρχίας – αρχιτεκτονικής δικτύου. Με την έλευση, για παράδειγμα, των δορυφορικών συστημάτων για κινητή τηλεφωνία τα οποία έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν σε συνεργασία με τα συστήματα προσωπικών τηλεπικοινωνιών με σκοπό την υλοποίηση αδιάλειπτης περιπλάνησης (seamless roaming), οι κινητοί σταθμοί θα πρέπει να μπορούν να λειτουργούν εντός δύο ιεραρχιών – της επίγειας και της δορυφορικής. Οι κινητοί σταθμοί για τα συστήματα τρίτης γενιάς θα πρέπει και αυτοί να μπορούν να επικοινωνούν με διάφορες ιεραρχίες μεταξύ των οποίων θα πρέπει να μπορεί να εκτελείται handoff. Η προκύπτουσα πολυπλοκότητα που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο μετράται πλέον σε εκατομμύρια γραμμών κώδικα. Η παρατήρηση της εξέλιξης οδηγεί στο γενικό συμπέρασμα είναι ότι όσο η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάγκη σε λογική που υλοποιείται μέσω λογισμικού.

## **1.4.2 Οι τεχνολογίες Software-Defined Radio και Cognitive Radio ως τεχνολογίες τέταρτης γενιάς**

### **1.4.2.1 Τα διαφαινόμενα πλεονεκτήματα**

Είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς ότι οι εξελίξεις στις ασύρματες ραδιοεπικοινωνίες χαρακτηρίζονται από μια προσπάθεια προτυποποίησης συστημάτων παγκόσμιας εμβέλειας τα οποία θα είναι συμβατά με όλα τα υπάρχοντα σημερινά πρότυπα και θα μπορούν να παρέχουν πληθώρα υπηρεσιών. Αν και οι λύσεις που προτείνονται από τους διάφορους οργανισμούς εγγυώνται την μετάβαση στην τρίτη γενιά συστημάτων αλλά και σε ακόμη πιο εξελιγμένα συστήματα, οι λύσεις που ως τώρα προτείνονται αποτελούν μια προσπάθεια προστασίας των επενδύσεων που έγιναν πάνω στα συστήματα δεύτερης και δεύτερης-συν γενιάς και εξάντλησης των ορίων κέρδους από την χρήση αυτών. Παρόλα αυτά, η μορφή των συστημάτων των επόμενων γενιών είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια αυτή την στιγμή αν και μερικά από τα

χαρακτηριστικά τους είναι μάλλον γνωστά. Η σύνδεση ευρείας ζώνης θα πρέπει να πραγματοποιηθεί τις επόμενες γενιές ασύρματων συστημάτων κινητής επικοινωνίας, ενώ τα τερματικά θα πρέπει να μπορούν να λαμβάνουν σήμα από περισσότερες από μία ζώνες συχνοτήτων (multi-band terminals) και από περισσότερα από ένα πρότυπα (multi-mode terminals) σε υψηλούς ρυθμούς, καθιστώντας την ολοκλήρωση σε επίπεδο συστημάτων και υπηρεσιών πραγματικότητα. Επίσης θα πρέπει να υλοποιηθεί η επέκταση του διαδικτύου πάνω από το ασύρματο κανάλι, με ότι συνεπάγεται το γεγονός αυτό, δηλαδή πολυμεσικές εφαρμογές, ποιότητα και κλάσεις υπηρεσίας, πιθανώς καταναμημένες αρχιτεκτονικές και πολλά άλλα τα οποία θα πρέπει να βασιστούν σε εξελιγμένα πρωτόκολλα που θα διαφέρουν από αυτά που σήμερα εφαρμόζονται στα ασύρματα δίκτυα.

Όλες οι αλληλοσυγκρουόμενες τεχνολογίες και πρότυπα θα απαρτίζουν το τοπίο των τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως. Η εξελικτική πορεία προς την τέταρτη γενιά θα απαιτεί βελτιώσεις και καινοτομίες σε πολλούς τομείς. Απαραίτητη θα είναι η εξέλιξη του φυσικού επιπέδου, της επεξεργασίας σήματος, των τεχνικών διαμόρφωσης και των αλγορίθμων κωδικοποίησης. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον όπου ζητούμενο είναι η απλότητα στην υλοποίηση και η προσαρμοστικότητα, η τεχνολογία λογισμικώς καθορισμένων δικτύων (Software-Defined Radio) προβάλλει ως μια πολλά υποσχόμενη λύση. Το αν τελικά θα είναι η τεχνολογία εκείνη που θα κυριαρχήσει δεν μπορεί κανείς να το προβλέψει, τα κύρια πλεονεκτήματα της έγιναν όμως εμφανή από το 1992 όταν παρουσιάστηκε για πρώτη φορά η ιδέα για υλοποίηση ραδιοεπικοινωνιών με τη βοήθεια συστημάτων στα οποία όλες οι λειτουργίες – θεωρητικά – θα υλοποιούνται με χρήση λογισμικού που εκτελείται σε μη εξειδικευμένο υλικό.

Η εφαρμογή των τεχνολογιών του Software Radio – ή τεχνολογιών ραδιοεπικοινωνίας λογισμικού σε ελεύθερη μετάφραση – αναμένεται να φέρει επανάσταση στην πρόοδο των γενεών των ασύρματων συστημάτων. Το δυνατό σημείο της καινούριας αυτής τεχνολογίας είναι η απλότητα και η γενικότητα η οποία χαρακτηρίζει το υλικό στο οποίο βασίζεται αφήνοντας την υλοποίηση όλων των υπερκείμενων λειτουργιών και τεχνικών στο λογισμικό, εκμεταλλευόμενη την χρησιμότητά του – σε αντίθεση με το υλικό – για πολύπλοκες υλοποιήσεις. Για να είναι πραγματοποιήσιμη η παραπάνω αρχιτεκτονική θα πρέπει το σημείο μετάβασης από τον αναλογικό στον ψηφιακό κόσμο να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κεραία, καθιστώντας το σύστημα όσο το δυνατόν «πιο ψηφιακό». Οι δυνατότητες που προβάλλουν είναι εντυπωσιακές, όσο και οι επιδιώξεις που εγείρονται από τις επόμενες γενιές τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που θα μπορούν να υλοποιηθούν. Οι ασύρματες τεχνολογίες αποδεσμεύονται πλέον από το υλικό και συνεπώς μπορούν να παραμετροποιούνται με τον πλέον εύκολο τρόπο. Η αναβάθμιση, επέκταση, η διαχείριση και ο έλεγχος των συστημάτων μπορούν να γίνονται με τον τρόπο που γίνονται στο λογισμικό. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό είναι ότι στο ίδιο υλικό μπορεί μια χρονική στιγμή να «τρέχει» μια τεχνολογία και την επόμενη στιγμή μια άλλη υλοποιώντας συσκευές ικανές να λειτουργούν με διάφορα πρότυπα και σε διάφορες συχνότητες όπως multi-band, multi-mode τερματικές συσκευές χρηστών αλλά και στοιχεία δικτύου. Είναι εφικτό να υπάρχει επικοινωνία με μια συγκεκριμένη τεχνική διαμόρφωσης ή κωδικοποίησης καναλιού ή φωνής η οποία θα μπορεί να αλλάζει στις επόμενες μεταδόσεις. Το ίδιο μπορεί να γίνεται σε όσες δομικές μονάδες του συστήματος είναι αναγκαίο έτσι ώστε να αλλάξει το πρότυπο επικοινωνίας. Είναι εύλογο ότι πολλά

πρότυπα μπορούν να υλοποιηθούν στον ίδιο σταθμό βάσης ο οποίος καθίσταται πλέον σε θέση να αξιοποιήσει την πολύ μεγάλη ευελιξία της διεπαφής με το ασύρματο μέσο. Το κόστος του υλικού τέτοιων σταθμών αναμένεται να είναι χαμηλό μια και δεν θα περιλαμβάνει εξειδικευμένα τμήματα, ενώ τα αναλογικά του μέλη θα είναι ελάχιστα. Επίσης ο σχεδιασμός αναμένεται να είναι λιγότερο περίπλοκος. Η τιμή του υλικού αναμένεται να ακολουθεί την πτωτική πορεία που ακολουθεί το υλικό για υπολογιστικά συστήματα. Κατασκευαστικά οι σταθμοί βάσης θα είναι κατά πάσα πιθανότητα απλούστεροι, περισσότερο modular και scalable, και συνεπακόλουθα φθηνότεροι, με ανάγκες συντήρησης και υποστήριξης λιγότερων και περισσότερο συμβατών εξαρτημάτων (είτε υλικού είτε λογισμικού) ενώ η επέκταση και αναβάθμισή τους θα είναι ανάλογα απλές.

Η εφαρμογή του Software Radio επεκτείνεται και στους κινητούς σταθμούς οι οποίοι θα μπορούν να είναι πολύ ευέλικτοι μια και θα υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν σε συμβατότητα με πολλά πρότυπα μέσω της αναβάθμισης του λογισμικού τους. Οι αναβάθμιση θα κοστίζει ελάχιστα ή και καθόλου και θα μπορεί να γίνεται και με διάφορους τρόπους: με χρήση υπέρυθρων ακτίνων, μέσω διαδικτύου, με φόρτωση από τον σταθμό βάσης, μέσω επικοινωνίας με ασύρματα τοπικά δίκτυα ή και μέσω της επικοινωνίας με τεχνολογίες Bluetooth. Η παραπάνω ευελιξία θα έχει αντίκτυπο στο κόστος των τερματικών σταθμών και στον ρυθμό που αυτά θα ανανεώνονται μια και δεν θα υφίσταται η ανάγκη της ενδεχόμενης ανανέωσης συσκευών προκειμένου να υποστηρίζονται κάποιες καινούριες υπηρεσίες - όπως συχνά συμβαίνει κατά τη μετάβαση από την δεύτερη γενιά στην δεύτερη-συν. Επίσης οι τιμές των υπηρεσιών αναμένεται να πέφτουν μια και οι ρυθμοί που θα παρέχονται εκτιμάται ότι θα είναι ιδιαίτερα υψηλοί, της τάξης των 100 Mbps σε επίπεδο κορμού δικτύου με αυξητικές τάσεις που θα ακολουθούν τις εξελίξεις στο υλικό. Η έλευση της τεχνολογίας του Software Radio αναμένεται να σηματοδοτήσει για τους χρήστες την αξιοπιστία και ποιότητα στην παροχή υπηρεσιών υπό χαμηλό κόστος, ενώ για τους παροχείς αναμένεται να σημάνει την αποδοτικότητα και τον αυξημένο έλεγχο στο προϊόν που εμπορεύονται.

#### **1.4.2.1 Τα θέματα που προκύπτουν**

Η τεχνολογία του Software Radio προέκυψε ως αποτέλεσμα ερευνητικών προσπαθειών προσανατολισμένων σε στρατιωτικές εφαρμογές που ξεκίνησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 ως πρωτοποριακές προσπάθειες ανάπτυξης εφαρμογών ευρείας ζώνης. Τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών έδειξαν ότι η τεχνολογίες μετατροπής αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (ADCs) και οι τεχνολογίες ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων (DSPs) ήταν ικανές να υποστηρίξουν την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων για επικοινωνία εντός στενών ζωνών συχνότητας αρχικά. Καθώς οι τεχνολογία εξελίσσονταν άρχισαν να αναπτύσσονται περισσότερα ερευνητικά προγράμματα όπως τα στρατιωτικά προγράμματα SpeakEasy I και II και το πρόγραμμα ACTS στις Ηνωμένες Πολιτείες την δεκαετία του 1980. Δημιουργήθηκε το SDR Forum (Software Definable Radio Forum) με σκοπό την εκπόνηση των προτύπων σχετικά με τις τεχνολογίες Software Radio ενώ παράλληλα η έρευνα επεκτάθηκε σε πανεπιστήμια και ερευνητικά ιδρύματα ορίζοντας τους περιορισμούς και τις προκλήσεις της τεχνολογίας.

Μέχρι και τα τελευταία χρόνια το ζητούμενο για την τεχνολογία Software Radio αποτελούσε η κάλυψη των απαιτήσεων που εγείρονταν σε φυσικό επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο της τεχνολογίας Software Radio πρέπει να είναι ικανό να λαμβάνει ψηφιοποιημένο σήμα από ευρείες ζώνες συχνοτήτων στις οποίες η παρεμβολή ισχύος και ο θόρυβος παρουσιάζουν ισχύ μέχρι και αρκετές εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από την ισχύ του σήματος πληροφορίας. Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό πρέπει αφενός να παρουσιάζει ανάλυση τέτοια ώστε να μπορεί να έχει «οπτική» επαφή με το σήμα πληροφορίας, αφετέρου θα πρέπει να αποδίδει ρυθμούς ικανούς να μετατρέψουν την πληροφορία σε ακολουθία δειγμάτων. Τυπικές τιμές για επιδόσεις τέτοιων μετατροπέων αντιστοιχούν σε αναλύσεις που υπερβαίνουν τα 14 bits δηλαδή τις  $2^{14}=16384$  στάθμες δειγματοληψίας ενώ οι ρυθμοί εξόδου είναι ικανοί να αποδώσουν πάνω από 100Μ-δείγματα ανά δευτερόλεπτο προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις για δέκτες ευρείας ζώνης. Η τεχνολογία μετατροπέων εξελίχθηκε ραγδαία τα τελευταία χρόνια καθιστώντας πραγματοποιήσιμη την ψηφιακή μετατροπή ευρέων ζωνών παρόλα αυτά όμως οι επιδόσεις του υλικού πρέπει να είναι ανάλογες ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται την εισερχόμενη πληροφορία. Ο βαθμός παραλληλισμού, η αρχιτεκτονική, το είδος, οι δυνατότητες επαναπρογραμματισμού και η κατανάλωση ισχύος είναι θέματα στα οποία οι επιδόσεις θα πρέπει να είναι ικανοποιητικές για την υλοποίηση της Software Radio τεχνολογίας. Οι τελευταίες γενιές υλικού αποδίδουν ταχύτητες που δίνουν την δυνατότητα να υλοποιηθούν σε λογισμικό λειτουργίες ενός συστήματος ραδιοεπικοινωνίας όπως κωδικοποίηση φωνής, διαμόρφωση, σύνθεση σήματος, προσαρμογή ρυθμού και ρυθμού δειγματοληψίας, διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση, και εξάπλωση. Με την λιγότερο ή περισσότερο εύκολη επίλυση των περιοριστικών προβλημάτων της τεχνολογίας φυσικού επιπέδου, άρχισαν να εμφανίζονται προβλήματα στα ανώτερα επίπεδα υλοποίησης της τεχνολογίας, προβλήματα τα οποία ίσως αποδειχθούν εξίσου δυσεπίλυτα: το γεγονός ότι τα συστήματα Software Radio είναι ικανά να αλλάζουν πρότυπα επικοινωνίας δημιουργεί ένα καινούριο περιβάλλον δικτύου, απλό μεν όσον αφορά το βασικό υλικό, αλλά πάρα πολύ περίπλοκο σε επίπεδο λογισμικού και ιδιαίτερα όσον αφορά την προσαρμογή των κόμβων και των ενεργών στοιχείων του. Αν οι κόμβοι είναι ικανοί να αλλάζουν «προσωπικότητα» οι τρόποι με τους οποίους θα υλοποιούνται οι υπηρεσίες, θα γίνεται η διαχείριση του δικτύου, η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας, οι βελτιστοποιήσεις και οι μετρήσεις απόδοσης και οι επεμβάσεις σε πραγματικό χρόνο δεν είναι προφανείς. Η ανάπτυξη λογισμικού για ένα τέτοιο σύστημα είναι a priori πολύπλοκη. Παράλληλα, κυρίαρχες τάσεις υποδηλώνουν την διάθεση να γεφυρωθεί η ιεραρχία των ενσύρματων δικτύων με αυτή των ασύρματων συστημάτων πράγμα το οποίο αποτελεί άλλο ένα πρόβλημα που καλείται να λυθεί στο μέλλον.

Ταυτόχρονα με τη επίλυση των βασικών προβλημάτων σε ερευνητικό επίπεδο, τα τελευταία χρόνια άρχισαν να αναπτύσσονται διάφορες εκδοχές της Software Radio τεχνολογίας. Η τεχνολογία γνωστικών δικτύων (Cognitive Radio) είναι μια εκδοχή της Software Radio τεχνολογίας που αξιοποιεί της τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για την αυτοματοποίηση της προσαρμογής και εναλλαγής των λειτουργιών και τεχνολογιών πάνω από το υλικό όπως για παράδειγμα η αυτόματη αναγνώριση μεθόδων διαμόρφωσης ενώ στο μέλλον στοχεύει στην αυτοματοποίηση της προσαρμογής και εναλλαγής των προτύπων στην ασύρματη διεπαφή. Η τεχνολογία Virtual Radios αναπτύχθηκε ως αποτέλεσμα του ερευνητικού προγράμματος SpectrumWare του Πολυτεχνείου του MIT

και αποτελεί τεχνολογία Software Radio ικανή να εφαρμοστεί σε επεξεργαστικά συστήματα γενικού σκοπού, απολαμβάνοντας όλα τα οφέλη από τις δυνατότητες ανάπτυξης εφαρμογών και επεξεργασίες που προσφέρονται σε τέτοια συστήματα. Τέλος υπάρχει και η τεχνολογία Software Definable Radio η οποία αποτελεί την τεχνολογία που είναι άμεσα υλοποιήσιμη σήμερα στην οποία η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό γίνεται όχι αμέσως μετά από την κεραία αλλά μετά από ένα αναλογικό στάδιο μεταφοράς του σήματος σε χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων και φιλτραρίσματος.

Εστιάζοντας στην τεχνολογία του Cognitive Radio, ήδη έχουμε αναφέρει ότι αποτελεί τη συνέχεια του Software Defined Radio. Το Cognitive Radio (CR) είναι ένας χαρακτηρισμός, που αποτυπώνει τις έξυπνες ιδιότητες της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Το γεγονός ότι οι ασύρματες επικοινωνίες χρησιμοποιούνται πια ευρέως, λογισμικά όπως το Cognitive Radio γίνονται όλο και πιο απαραίτητα. Το όνομά της το πήρε από τον Joseph Mitola όταν έγραφε την διδακτορική του διατριβή στο θέμα. Την ώθηση για την ανάπτυξη του CR έδωσε η ανάγκη για την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του ραδιοσυχνοτικού φάσματος και τη διατήρηση της βέλτιστης μορφής επικοινωνίας, ανάλογα με τις εκάστοτε υπάρχουσες συνθήκες περιβάλλοντος. Πολύ απλά, αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη δυνατότητα της τεχνολογίας CR να εξετάζει κάθε φορά το φάσμα και, γενικότερα, το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, να εντοπίζει ποιες συχνότητες δεν χρησιμοποιούνται και κατόπιν να λαμβάνει αποφάσεις για το ποια συχνότητα θα χρησιμοποιήσει, τον τύπο της διαμόρφωσης, τη στάθμη της ισχύος και άλλες παραμέτρους. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το Cognitive radio είναι μια τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον αλλά και προς τον χρήστη αφού προσπαθεί να μην παρεμβάλλεται σε άλλους χρήστες. Πρέπει να επισημάνουμε ότι το Cognitive Radio διατηρεί στο ακέραιο τη δυνατότητα του SDR να προσαρμόζεται στα αντίστοιχα πρωτόκολλα επικοινωνίας, παρέχοντας επιπλέον μια νέα διάσταση: την ικανότητα παρατήρησης του περιβάλλοντος χώρου και προσαρμογής όλων των βασικών παραμέτρων επικοινωνίας σε αυτό.

Λόγω της ευφυίας και της προσαρμοστικότητας που χαρακτηρίζουν ένα CR, πρέπει να καθοριστούν οι μέθοδοι με τις οποίες θα υλοποιηθεί το σύστημα. Αρχικά, είναι αναγκαίο να υπάρχει ένα επίπεδο επεξεργασίας του σήματος αφού το CR καλείται να καθορίσει την κατάληψη του φάσματος και μετά να αποφασίσει για τα επίπεδα ισχύος, τον τρόπο εκπομπής καθώς και άλλα χαρακτηριστικά του σήματος. Στη συνέχεια, πρέπει να ελέγχει κατά πόσο επηρεάζονται άλλοι χρήστες από τη χρήση του. Επιπρόσθετα, τα RF τμήματα θα πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτα για την εύκολη αλλαγή ζώνης συχνότητας (πιθανώς οι δύο συχνότητες να έχουν μεγάλη διαφορά) και για την αλλαγή τρόπου μετάδοσης της πληροφορίας (λόγω διαφοράς στο εύρος ζώνης του κάθε τρόπου μετάδοσης). Για να επιτύχουμε την επιθυμητή απόδοση πρέπει να υπάρχει πολύ εύκαμπτο εμπρόσθιο άκρο. Όμως, η παραδοσιακή τεχνολογία «front end» δεν μπορεί να χειριστεί τέτοιες απαιτήσεις γιατί συνήθως είναι περιορισμένες στο εύρος ζώνης, όχι μόνο στον τρόπο διαμόρφωσης αλλά και στην ζώνη συχνότητας που λειτουργούν. Έτσι, οι επιθυμητές επιδόσεις μπορούν να επιτευχθούν μόνο με μετατροπή του σήματος όσο πιο κοντά γίνεται στην κεραία. Με αυτόν τον τρόπο, δε θα χρειαστεί να έχουμε αναλογική επεξεργασία σήματος παρά μόνο ψηφιακή. Οι μετατροπείς σήματος αναλογικού σε ψηφιακού (digital to analogue converters (DACs)) και ψηφιακού σε αναλογικού (analogue to digital converters (ADCs)) που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν μεγάλο δυναμικό εύρος ως και μερικά GHz, αλλά θα πρέπει να χειρίζονται και τα

μεγάλα επίπεδα ισχύος που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν. Το γεγονός ότι τέτοιες προϋποθέσεις δεν είναι ακόμα εφικτές, αποτελούν ένα αρνητικό παράγοντα στην εξέλιξη του Cognitive Radio, όμως δε σημαίνει ότι η τεχνολογία του Cognitive Radio παρουσιάζει ελλείψεις.

Τα περισσότερα στοιχεία δείχνουν ότι η ασύρματη τεχνολογία υλοποίησης με λογισμικό είναι ικανή να επιβιώσει και να αλλάξει την αρχιτεκτονική των ασύρματων ραδιοεπικοινωνιών. Το κλειδί για την επιτυχία ενδεχομένως θα είναι η κατάλληλη προτυποποίηση η οποία θα δώσει την απαραίτητη ώθηση ώστε να καθιερωθεί η εν λόγω τεχνολογία. Προσπάθειες για την προτυποποίηση γίνονται από το Software Radio Forum ενώ η ερευνητική ενασχόληση με την υλοποίηση γίνεται σε διεθνή προγράμματα με τη συμμετοχή των μεγαλύτερων κατασκευαστικών εταιριών συστημάτων τρίτης γενιάς.



## Κεφάλαιο 2

### 2 Θέματα γύρω από το Software Defined Radio

#### 2.1 Αναδιαμόρφωση Συστημάτων και Υπηρεσιών

Ως έννοια, η αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών αφορά την δυναμική προσαρμογή της εσωτερικής αρχιτεκτονικής ενός υπολογιστικού συστήματος ή/και υπηρεσίας λόγω μιας μεταβολής στο λειτουργικό περιβάλλον του/της. Δεδομένου ότι τα υπολογιστικά συστήματα υποστηρίζουν αναδιαμόρφωση σε επίπεδο software ή/και firmware, ο όρος εσωτερική αρχιτεκτονική αντιστοιχεί στην αρχιτεκτονική λογισμικού (software architecture) του σχετικού υπολογιστικού συστήματος ή/και υπηρεσίας. Στη θεματική περιοχή των τηλεπικοινωνιακών ασύρματων συστημάτων και υπηρεσιών, το πρόσφατο ενδιαφέρον στην αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών πηγάζει από τον συνεχιζόμενο πολλαπλασιασμό των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας. Καθώς ο αριθμός των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας αυξάνει, το έργο της ανάπτυξης και ενσωμάτωσης πολλαπλών προτύπων ασύρματης επικοινωνίας σε μια συσκευή καθίσταται πολύπλοκότερο και δυσχερέστερο. Μια ελκυστική εναλλακτική λύση στην στατική ενσωμάτωση πολλαπλών προτύπων ασύρματης επικοινωνίας σε μια συσκευή κατά το στάδιο παραγωγής της είναι η δυναμική προσαρμογή των δυνατοτήτων επικοινωνίας της μέσω μηχανισμών απομακρυσμένης εγκατάστασης, παραμετροποίησης και ενεργοποίησης του απαραίτητου λογισμικού. Συνεπώς, αντί της προεγκατάστασης πολλαπλών προτύπων ασύρματης επικοινωνίας σε μια συσκευή με αποτέλεσμα την περιττή επιβάρυνση της διαδικασίας παραγωγής, η αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών χρησιμοποιεί ένα επεκτάσιμο πλαίσιο επικοινωνιακών πρωτοκόλλων σε λειτουργικό περιβάλλον πραγματικού χρόνου (real-time) για να εισάγει και να ενεργοποιήσει δυναμικά τα κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας για κάθε περίπτωση. Αντίστοιχες τεχνικές είναι δυνατό να εφαρμοστούν σε επίπεδο κινητών υπηρεσιών προκειμένου αυτές να καταστούν προσαρμόσιμες, ευέλικτες και παραμετροποιήσιμες κατά τις επιθυμίες του τελικού χρήστη.

Η αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών αναγνωρίζεται ευρέως ως μια από τις βασικές τεχνολογίες των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων επόμενης γενιάς, γνωστών και ως “beyond 3G”. Ανάλογα με το επίπεδο στο οποίο αναλύεται, η αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών κατηγοριοποιείται ακολούθως:

- a) Αναδιαμόρφωση σε επίπεδο ασύρματης ραδιοδιεπαφής σχετικής με τα υποσυστήματα επεξεργασίας του ραδιοσήματος, γνωστή και ως software definable radio (SDR).
- b) Αναδιαμόρφωση σε επίπεδο στοίβας επικοινωνιακών πρωτοκόλλων, σχετικής με πρωτόκολλα επικοινωνίας ανεξάρτητα από την υφιστάμενη διαμόρφωση του ραδιοσήματος.
- c) Αναδιαμόρφωση σε επίπεδο εφαρμογής, σχετικής με την δυναμική προσαρμογή των κινητών υπηρεσιών ή/και υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας.

Παρότι διάφορες λογικές αρχιτεκτονικές υποστηρίζουν την αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών, συγκεκριμένα υποδείγματα λογικής σχεδίασης εμφανίζονται σε όλες αυτές τις αρχιτεκτονικές:

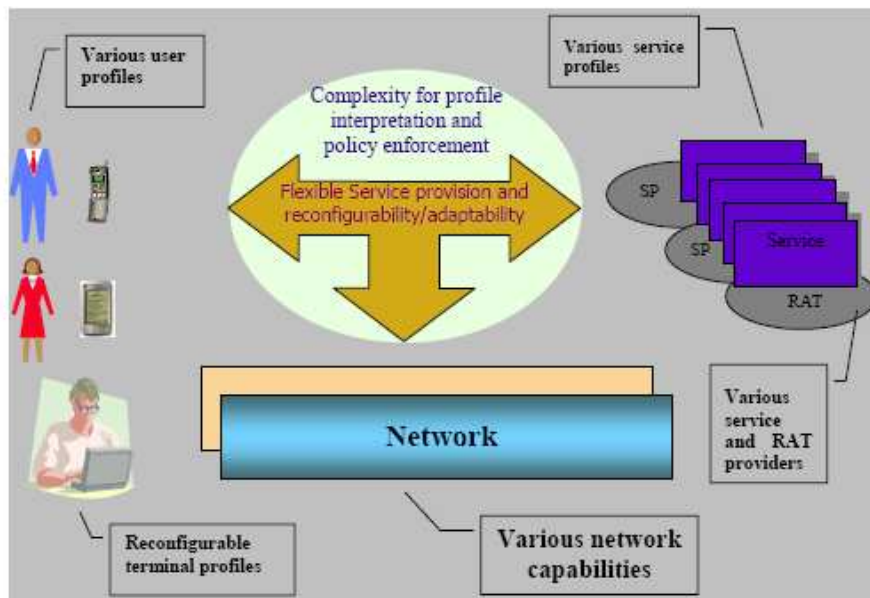
- Χρήση ανοικτών διεπαφών για την εμπέδωση αρχιτεκτονικής ανεξαρτησίας από την εκάστοτε υλοποίηση.
- Χρήση επεκτάσιμων προφίλ (profile) για την αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων σχετικά με την αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών.
- Χρήση γενικευμένων (generic) δομών δεδομένων για την αποθήκευση, ανάκτηση και διακίνηση σημαντικών μεταβλητών της αναδιαμόρφωσης συστημάτων και υπηρεσιών καθώς και λειτουργικών παραμέτρων των υποσυστημάτων που υπόκεινται σε αναδιαμόρφωση.
- Χρήση της σύνθεσης (composition) ως σχεδιαστικής αρχής για την θεσμοθέτηση του πεδίου (domain) της αναδιαμόρφωσης, συμπεριλαμβανομένων των υποστηρικτικών της μηχανισμών και των μηχανισμών για αυτόνομη λήψη αποφάσεων σχετικά με την αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών.

Η παραπάνω απαρίθμηση δεν εξαντλεί τις μεθοδολογίες υποστήριξης της αναδιαμόρφωσης συστημάτων και υπηρεσιών, περαιτέρω προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τεχνικές βασισμένες σε ενδιάμεσο λογισμικό (middleware), τεχνικές με βάση εικονικές μηχανές (virtual machines), γλώσσες περιγραφής της ραδιοδιεπαφής και γλώσσες ορισμού αρχιτεκτονικής λογισμικού. Όλες όμως ανεξαιρέτως οι αρχιτεκτονικές λύσεις για την αναδιαμόρφωση συστημάτων και υπηρεσιών μοιράζονται κοινά στοιχεία στην μορφή συγκεκριμένων υποδειγμάτων σχεδίασης (design patterns) τα οποία, ως γνωστόν, προσφέρουν σημαντικό βαθμό προσαρμοστικότητας και ευελιξίας σε επίπεδο λογικής σχεδίασης.

Προκειμένου να συνδυαστούν το τερματικό SDR και η ικανότητα αναδιαμόρφωσης δικτύων (network reconfigurability), είναι προφανές ότι η πρόσθετη νοημοσύνη για την ικανότητα αναδιαμόρφωσης δικτύων είναι απαραίτητη. Για αυτόν τον λόγο, δεδομένου ότι όλες οι πτυχές ικανότητας αναδιαμόρφωσης σε όλα τα στρώματα της OSI πρέπει να εξεταστούν επαρκώς, η παροχή ολιστικών λύσεων προς την υποστήριξη των reconfigurable κινητών περιβάλλοντων, μας ωθούν στην μελέτη σε προηγμένο έλεγχο και διαχείριση της ικανότητας αναδιαμόρφωσης. Επιπλέον, ο επανασχηματισμός τερματικών και δικτύων συνδέεται πολύ με τη βέλτιστη υπηρεσία (optimal service) και την παροχή Radio resource management (RRM). Το πλήθος διαθέσιμων υπηρεσιών, με τις ιδιαίτερα διαφορετικές απαιτήσεις από το δίκτυο και το τερματικό, δημιουργεί την ανάγκη για έναν δυναμικό και ευφυή τρόπο το δίκτυο και το τερματικό να προσαρμοστούν έτσι ώστε να επιτρέψουν τη βέλτιστη παροχή υπηρεσιών με τη χρησιμοποίηση της τεχνολογίας RAT (Radio Access Technology). Αυτή η προσαρμογή καλύπτει την αφαίρεση της πολυπλοκότητας του τερματικού.

## 2.1.1 Η ανάγκη για αναδιαμόρφωση και προσαρμοστικότητα σε δίκτυα και τερματικά

Στα 2G δίκτυα, οι υπηρεσίες που παρέχονται στους κινητούς χρήστες είναι είτε ενσωματωμένες στον εξοπλισμό δικτύων είτε αναπτυγμένες με εργαλεία κινητών χειριστών ή κατασκευαστών εξοπλισμού. Εντούτοις, σε 3G δίκτυα και πέρα, μια ανοικτή αγορά αναμένεται να προκύψει, όπου ένας τεράστιος αριθμός διαφορετικών υπηρεσιών θα αναπτυχθεί από τους ανεξάρτητους προμηθευτές λογισμικού Independent Software Vendors (ISVs) συμπεριλαμβανομένου του radio software και του software εφαρμογής και υπηρεσιών όπου δεν θα στοχεύσουν μόνο στα κινητά δίκτυα. Αυτή η κατάσταση δημιουργεί την ανάγκη για πιο ευέλικτα δίκτυα που θα μπορούν να προσαρμοστούν δυναμικά στις απαιτήσεις των υπηρεσιών και του λογισμικού RAT που παρέχονται σε αυτά. Κατά συνέπεια, το δίκτυο και η τελική ικανότητα αναδιαμόρφωσης γίνονται ένα ζήτημα κρίσιμο στην επιτυχή ανάπτυξη αγοράς 3G και πέρα (3G and beyond) σύμφωνα με τις προσδοκίες των φορέων αγοράς που έχουν επενδύσει σε αυτήν την τεχνολογία καθώς επίσης και τους τελικούς χρήστες. Οι απαιτήσεις και οι αρχιτεκτονικές για την υποστήριξη της διαχείρισης ικανότητας αναδιαμόρφωσης από την πλευρά δικτύων εξετάζονται παρακάτω.



Εικόνα 1: Η ανάγκη αναδιαμόρφωσης και προσαρμοστικότητας στην παροχή υπηρεσιών για υπηρεσίες 3G και πέρα

Η ικανότητα αναδιαμόρφωσης δικτύων απαιτείται έτσι προκειμένου να υπάρξει:

- Υποστήριξη αναδιαμόρφωσης τερματικού
- Υποστήριξη πρωτοκόλλου και προσαρμοστικότητα του RAT

- Υποστήριξη ευέλικτων υπηρεσιών εύρεσης και παροχής πληροφορίας
- Υποστήριξη σε download πρωτοκόλλων και λογισμικού
- Παροχή αυτοπρογραμματιζόμενων δικτύων

Μερικά παραδείγματα αναδιαμόρφωσης που είναι χρήσιμα στις κινητές επικοινωνίες είναι η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service-QoS) και δυναμικό κατέβασμα λογισμικού αυτόματα από το τερματικό.

Αν και η ικανότητα ενός δικτύου που μετατρέπεται δυναμικά θα μπορούσε να είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την υποστήριξη αναδιαμόρφωσης τερματικού και την προσαρμογή και την παροχή υπηρεσιών, η πλήρης δυνατότητά της δεν μπορεί να υλοποιηθεί εάν τέτοια χαρακτηριστικά γνώρισμα δεν είναι προσιτά από όλα τα περιληφθέντα συμβαλλόμενα μέρη. Η υιοθέτηση της αναδιαμόρφωσης για έναν περιορισμένο αριθμό χειριστών ή προμηθευτών εξοπλισμού περιορίζει την αποτελεσματικότητα στα τερματικά, ενώ ανοίγοντας παράλληλα ικανότητες αναδιαμόρφωσης σε πλατφόρμες και εφαρμογές παροχής υπηρεσιών, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα δυναμικό περιβάλλον όπου ευέλικτες και εξατομικευμένες υπηρεσίες θα είναι μέσα στην προσιτότητα του χρήστη οποιαδήποτε στιγμή και μέσα σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο, προσδιορίζουμε σαφώς την ανάγκη για τη λειτουργία αναδιαμόρφωσης δικτύων να είναι μέρος των ανοικτών, τυποποιημένων interface που παρέχουν την πρόσβαση στα κινητά δίκτυα.

### **2.1.2 Αναδιαμόρφωση, προσαρμοστικότητα και ευέλικτη παροχή υπηρεσιών**

Η διαχείριση και ο έλεγχος ικανότητας αναδιαμόρφωσης είναι ουσιαστικοί για την υποστήριξη των network-wide ενεργειών αναδιαμόρφωσης (που περιλαμβάνουν επίσης την υποστήριξη για την ικανότητα αναδιαμόρφωσης σε τερματικά). Μερικές βασικές προϋποθέσεις για τη διαχείριση ικανότητας αναδιαμόρφωσης για 3G και πέρα είναι:

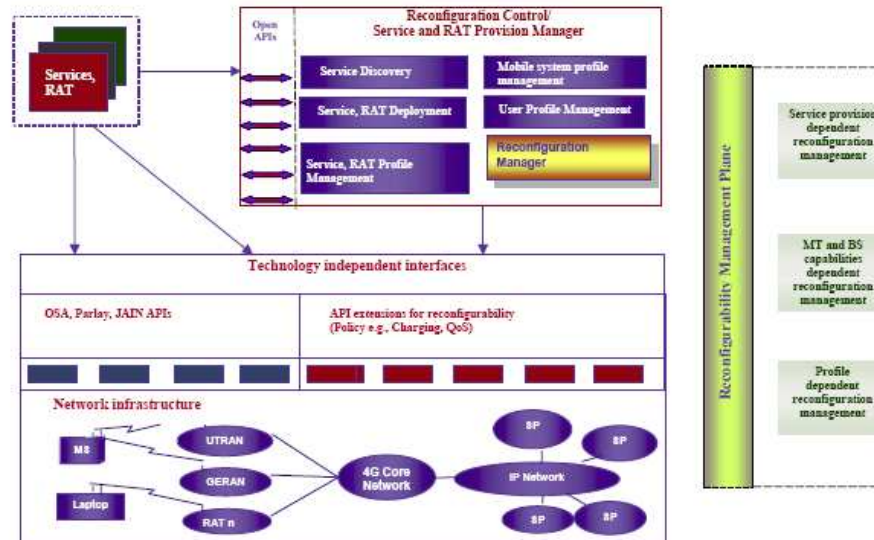
- Υποστήριξη ευέλικτων επιχειρησιακών μοντέλων με καινούριες δυναμικές υπηρεσίες
- Δυναμική αναδιαμόρφωση βασισμένη στα εξής :
  1. προφίλ του χρήστη και τις απαιτήσεις παροχής υπηρεσιών
  2. δυνατότητα πρόσβασης σε κινητά τερματικά (Mobile Terminal) MT
  3. πολιτική παροχών (QoS, charging, etc)

Η διαχείριση και ο έλεγχος ικανότητας αναδιαμόρφωσης εξαρτώνται από διάφορες πτυχές. Μερικές βασικές πτυχές που έχουν επιπτώσεις στη διαχείριση αναδιαμόρφωσης εκτείνονται από χαμηλά επίπεδα ως και υψηλά επίπεδα λειτουργιών και χαρακτηριστικών. Με βάση μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά γνώρισμα, η διαχείριση ικανότητας αναδιαμόρφωσης μπορεί να προσδιοριστεί σε:

- Εξαρτώμενη διαχείριση επανασηματισμού
  1. παροχής υπηρεσιών

2. δυνατοτήτων MT
3. προφίλ
4. πολιτικής
5. τοποθεσίας

Ένα παράδειγμα εξαρτώμενης διαχείρισης αναδιαμόρφωσης παροχής υπηρεσιών δίνεται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 2 : Εξαρτώμενη διαχείριση αναδιαμόρφωσης παροχής υπηρεσιών

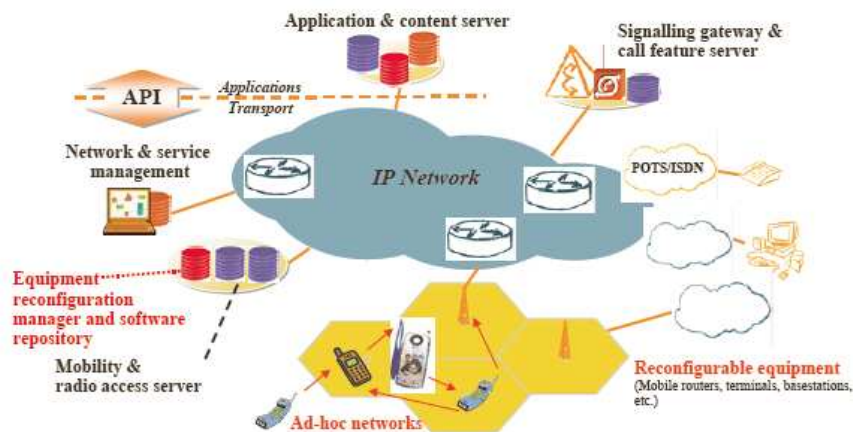
Η διαχείριση ικανότητας αναδιαμόρφωσης καλύπτει τον έλεγχο των ενεργειών επανασχηματισμού στα διάφορα στρώματα στα κινητά συστήματα και τα δίκτυα, ενσωματώνει τη διαχείριση download πρωτοκόλλου και λογισμικού, καθώς επίσης και την παροχή πολιτικής προκειμένου να ενισχυθούν ή να αλλαχτούν χαρακτηριστικά και ικανότητες κινητών τερματικών και δικτύων. Οι κύριες διαδικασίες για την πραγματοποίηση ικανότητας αναδιαμόρφωσης που συσχετίζονται άμεσα με τη διαχείριση και τον έλεγχο ικανότητας αναδιαμόρφωσης περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του πλαισίου επανασχηματισμού με τον προσδιορισμό των επηρεασθέντων στοιχείων στις επικοινωνίες και της υπολογιστικής υποδομής, τον προσδιορισμό των εφικτών εναλλακτικών λύσεων από τις διαδικασίες ανταλλαγής και διαπραγμάτευσης διαδικασιών υπό τη συγκεκριμένη πολιτική (π.χ., μεγιστοποίηση χαρακτηριστικών του συστήματος). Τέλος, η φυσική επέκταση της προσδιορισμένης λύσης θα ακολουθήσει με την κράτηση των απαραίτητων πόρων, κατόπιν το κατέβασμα, την εγκατάσταση και την ενεργοποίηση της προσδιορισμένης λύσης. Αυτή η λύση μπορεί να περιλαμβάνει χαρακτηριστικά σχετικά με πρωτόκολλα, εργασίες σχετικές με υπηρεσίες κτλ.

Η προσαρμοστικότητα των υπηρεσιών και του πρωτοκόλλου είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των εφαρμογών των αναδιαμορφώσιμων και προσαρμόσιμων περιβαλλόντων. Η διαχείριση της προσαρμοστικότητας συμπίπτει με τη διαχείριση ικανότητας αναδιαμόρφωσης. Καλύπτει την προσαρμογή πρωτοκόλλου, υπηρεσιών και

συστημάτων, η οποία είναι βασισμένη στον προσδιορισμένο χειρισμό πληροφοριών σχετικό με την αλλαγή της κατάστασης των διάφορων λειτουργικών στοιχείων (πόροι, κινητό περιβάλλον κτλ.). Βασισμένα στην αλλαγή πλαισίου και την προσδιορισμένη πολιτική, τα συγκεκριμένα στοιχεία πρωτοκόλλου και οι στόχοι υπηρεσιών μπορούν να ενεργοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά. Αυτές οι ενέργειες μπορούν να υποστηριχθούν από ευρύτερες ενέργειες επανασηματισμού και κατέβασμα πρωτοκόλλων και λογισμικού στο δίκτυο και το κινητό σύστημα. Τα παραπάνω συνεπάγονται προσαρμοστικότητα πρωτοκόλλου σε διάφορα στρώματα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την υποστήριξη νέων προσεγγίσεων στο σχέδιο και την εφαρμογή πρωτοκόλλου. Ένα βασικό μέρος πρωτοκόλλου μπορεί να συμπληρωθεί από τα downloadable μέρη που θα είναι σε θέση να ειδικευτούν στη λειτουργία και τη συμπεριφορά πρωτοκόλλου.

Η μεταφόρτωση πρωτοκόλλου είναι σημαντική προκειμένου να επιτευχθεί και να ρυθμιστεί η ικανότητα αναδιαμόρφωσης. Απαιτεί μηχανισμούς για τον προσδιορισμό των στοιχείων πρωτοκόλλου που θα μεταφορτωθούν, τη διαχείριση των βιβλιοθηκών πρωτοκόλλου, και την προσαρμογή. Επιπρόσθετα, πρέπει να ερευνηθούν κρυφοί (caching) μηχανισμοί των στοιχείων πρωτοκόλλου για λόγους απόδοσης.

Μια σημαντική πτυχή σχετική με την ικανότητα αναδιαμόρφωσης και την υποστήριξη και τη διαχείριση προσαρμοστικότητας, είναι η εισαγωγή των ευφών υπηρεσιών και διαχείρισης RAT πλατφορμών (η γενική αρχιτεκτονική της απεικονίζεται στην εικόνα 3) που ενεργούν ως μεσολαβητές μεταξύ SPs, τελικών χρηστών και κινητών χειριστών δικτύων, απλοποιώντας κατά συνέπεια τον εξαιρετικά σύνθετο στόχο της διαχείρισης και της τροφοδότησης υπηρεσιών, καθώς επίσης και τις ενέργειες επανασηματισμού στα διάφορα στρώματα στη λίστα, το τερματικό και το δίκτυο πρωτοκόλλου, υιοθετώντας διάφορες πολιτικές.



Εικόνα 3: Σύγκλιση στις τηλεπικοινωνίες

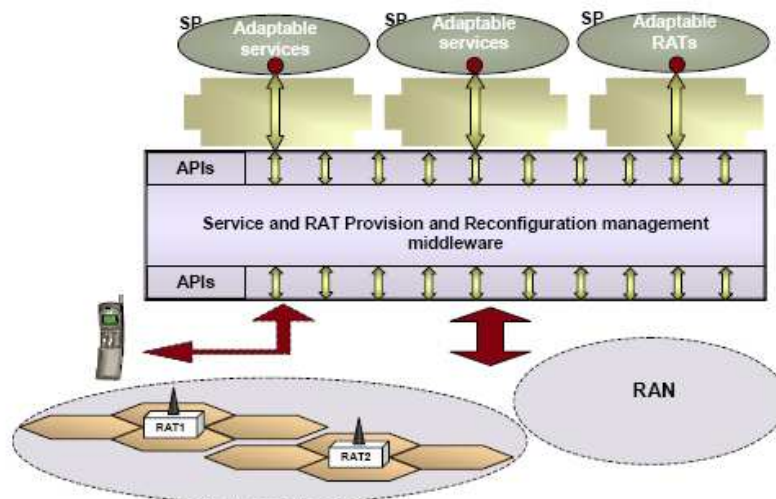
Η λειτουργία πλατφορμών θα περιελάμβανε:

- Παροχή υπηρεσιών και RAT και διαχείριση ικανότητας αναδιαμόρφωσης του ενδιάμεσου λογισμικού (middleware), που επιτρέπουν

ενέργειες αναδιαμόρφωσης και προσαρμοστικότητας στα διάφορα στρώματα στα κινητά δίκτυα, τα συστήματα και τα τερματικά. Αυτές οι ενέργειες θα μπορούσαν να περιλάβουν service-level διαδικασίες όπως η επέκταση υπηρεσιών και η τροποποίηση των πολιτικών δασμολόγησης υπηρεσιών καθώς επίσης και οι χαμηλότερες ενέργειες στρώματος όπως ο έλεγχος των κυκλοφοριακών ροών

- Επαναχρησιμοποιήσιμοι μηχανισμοί για την προσαρμογή υπηρεσιών καθώς επίσης και διαδικασίες παροχής υπηρεσιών στο τρέχον πλαίσιο (που προσδιορίζεται από τις ικανότητες του τερματικού, τα χαρακτηριστικά των δικτύων, τις θέσεις χρηστών και την κατάστασή τους)

Το γενικό πλαίσιο που εισάγεται, ενσωματώνει πτυχές σχετικές με το συνδυασμό ευέλικτης παροχής υπηρεσιών και καλύτερης πρόσβασης, αναδιαμόρφωση τερματικών και δικτύων προκειμένου να έχουμε την καλύτερη γενική παροχή υπηρεσιών και η συνδετικότητα τερματικών (λαμβάνοντας υπόψη τα προφίλ χρήστη, τερματικού, δικτύου και υπηρεσίας). Επίσης, σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα είναι η εισαγωγή της ανοικτών APIs (Application Programming Interface) προκειμένου να υποστηρίζεται η εγγραφή υπηρεσιών, και η παροχή προφίλ και να ενεργοποιείται η αναδιαμόρφωση προς το δίκτυο και το τερματικό στα διάφορα στρώματα.



Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική για ευέλικτη παροχή υπηρεσιών διαχείριση αναδιαμόρφωσης

### 2.1.3 Open APIs για υποστήριξη αναδιαμόρφωσης

Οι υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας (Value added Services) που περιλαμβάνουν τα πολυμέσα, τις υπηρεσίες βασισμένες στην τοποθεσία, τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, mms κτλ. θα είναι μια αναδυόμενη περιοχή υπηρεσιών για τους χειριστές 3G και τους φορείς παροχής υπηρεσιών. Υπάρχουν διάφορες δυνατότητες για την παροχή προσαρμόσιμων υπηρεσιών και υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, όπως υπηρεσίες

βασισμένες στην παρουσία και τη διαθεσιμότητα του κινητού συνδρομητή, περιλαμβάνουν εφαρμογές όπως η άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων και η επικοινωνία με κινητά τηλέφωνα. Αυτό είναι επίσης ένα αναδυόμενο τμήμα βιομηχανίας, το οποίο πιθανώς θα συγκλίνει με διάφορες υπηρεσίες και κινητές εφαρμογές εμπορίου. Το προφίλ όλων αυτών των ειδών υπηρεσιών θα ικανοποιήσουν τις προσδοκίες του χρήστη μέσω της εκτενούς εφαρμογής των μηχανισμών προσαρμοστικότητας υπηρεσιών και ικανότητας αναδιαμόρφωσης δικτύων.

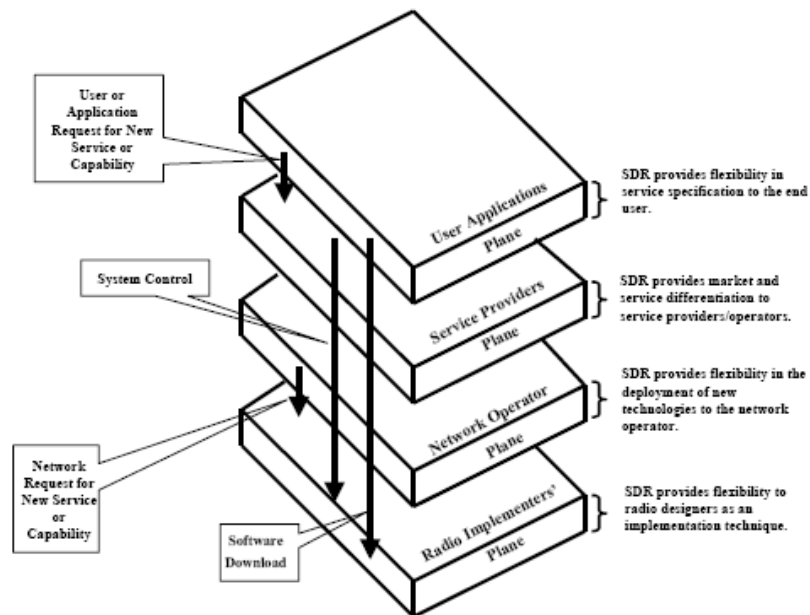
Οι ενέργειες αναδιαμόρφωσης αφορούν διάφορες ιδιότητες. Οι ιδιότητες διαμόρφωσης (attributes) περιγράφουν την επιθυμητή κατάσταση μιας συσκευής δικτύου, και περιλαμβάνουν attributes και classes για την αποθήκευση των επιθυμητών ή προτεινόμενων κατωφλίων, των κατανομών εύρους ζώνης, και των κριτηρίων ταξινόμησης κυκλοφορίας. Οι state ιδιότητες περιγράφουν την πραγματική κατάσταση μιας συσκευής σε μια συγκεκριμένη στιγμή λειτουργίας. Για να έχουμε μια αρχιτεκτονική παροχής υπηρεσιών και διαχείρισης αναδιαμόρφωσης είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε ανοικτά APIs (Application Programming Interface) για να έχουμε ενεργοποίηση και έλεγχο ανασχηματισμού.

## 2.1.4 Αναδιαμόρφωση σε δίκτυα IP

Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών στην επόμενη δεκαετία θα χαρακτηριστεί από τη σύγκλιση προς ένα IP-based core δίκτυο και μια συνεχή πρόσβαση (2G, 3G, ευζωνικά δίκτυα, ραδιοφωνική μετάδοση, κλπ...) σε ένα πλαίσιο από ιεραρχικά και αυτο-οργανιζόμενα δίκτυα (Εικόνα 3). Οι κινητοί χρήστες θα ωφεληθούν μόνο εάν είναι εξοπλισμένοι με ένα ενιαίο reconfigurable τερματικό SDR σε αυτό το παγκόσμιο περιβάλλον τηλεπικοινωνιών.

Αυτή η μελλοντική γενεά των reconfigurable τερματικών SDR θα είναι ικανή να λειτουργήσει σε αρκετά αν όχι σε όλα τα διαφορετικά περιβάλλοντα πρόσβασης, για να υποστηρίξει όλες τις διαθέσιμες εφαρμογές στις εκάστοτε συσκευές και στα ετερογενή δίκτυα για να εγγυηθεί την αποδοτική χρήση των υπαρχόντων πόρων δικτύων, και για να παρέχει στον χρήστη προσαρμόσιμη και εξατομικεύσιμη παροχή QoS χρησιμοποιώντας το σωστό δίκτυο για την κάθε υπηρεσία. Όπως εξηγείται από το φόρουμ SDR, οι έννοιες SDR έχουν αντίκτυπο σε πολλά στρώματα ενός ασύρματου δικτύου και τα σχετικά οφέλη θα πραγματοποιηθούν από το φυσικό στρώμα στο πεδίο εφαρμογών χρήστη.





Εικόνα 5: Πολυεπίπεδες πτυχές του Software Defined Radio

Όλες οι ερευνητικές ομάδες SDR ((European IST Reconfigurability Cluster Projects, SDR Forum, Mobile VCE initiative) τονίζουν το γεγονός ότι η αναδιαμόρφωση των κινητών τερματικών SDR θα απαιτήσει τις σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του τερματικού και του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου το κατέβασμα νέων modules που θα εγκαθίστανται στο τερματικό. Η επιτυχής ανάπτυξη αυτού του μελλοντικού περιβάλλοντος τηλεπικοινωνιών SDR θα εξαρτηθεί άμεσα από τον κατάλληλο καθορισμό της αρχιτεκτονικής αναδιαμορφώσιμου συστήματος και δικτύων, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης του διαχωρισμού μεταξύ των αναδιαμορφώσιμων τερματικών και δικτύων και του καθορισμού και της σχεδίασης του αναδιαμορφώσιμου εξοπλισμού που απαιτούνται από την πλευρά δικτύων για να υποστηρίξει την ικανότητα αναδιαμόρφωσης.

### 2.1.5 Η αναδιαμορφώσιμη αρχιτεκτονική RF (Radio Frequency)

Εάν ένα radio μπορεί να διαμορφωθεί, τότε εγείρονται ζητήματα που συνδέονται με τη γραμμικότητα πομποδεκτών και τα σήματα εικόνας πομποδεκτών. Αυτά τα ζητήματα προσαρμόζονται εύκολα σε μια συμβατική σταθερή κεντρική συχνότητα, σε ένα πομποδέκτη σταθερού εύρους ζώνης, μέσω της χρήσης των κατάλληλων φίλτρων. Ένα ιδανικό SDR πρέπει να καλύψει ένα άπειρο φάσμα από κεντρικές συχνότητες, να κατέχει ένα ευέλικτο εύρος ζώνης, να είναι σε θέση να διαβιβάσει τα σήματα σε ένα ευρύ φάσμα της ισχύος εξόδου RF, και να είναι σε θέση να λάβει τα σήματα που εκθέτουν ένα ευρύ φάσμα επιπέδων ισχύος. Το SDR πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόσει τα ακόλουθα πρότυπα air-interfaces:

- Wireless telephone (GSM, DECT, UMTS),
- Wireless PAN (Bluetooth),

- Wireless LAN (HIPERLAN/2, IEEE802.11a/b).

Επομένως τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων πρέπει να χρησιμοποιηθούν για το SDR:

- Γύρω στα 900MHz,
- Γύρω στα 2GHz,
- Γύρω στα 5GHz.

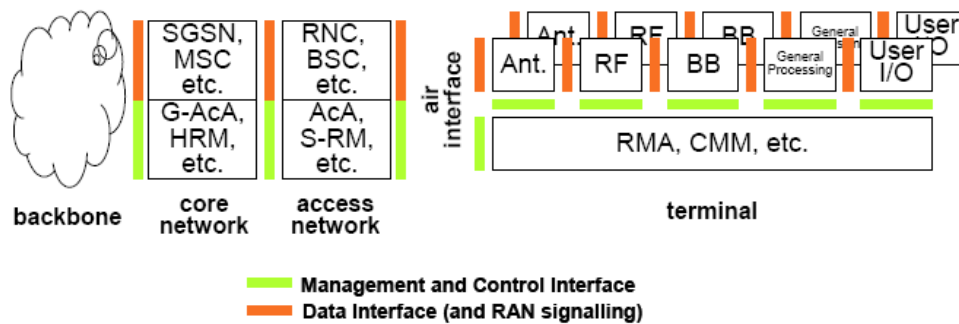
## 2.1.6 Διεπαφές δεδομένων και ελέγχου

Η αναδιαμόρφωση των τερματικών απαιτεί να συγκεντρωθούν πολλές πληροφορίες γύρω από το τερματικό και το δίκτυο, να ληφθεί το κατάλληλο λογισμικό που θα κάνει την αναδιαμόρφωση και να εξασφαλιστεί ότι αυτό το λογισμικό μεταφορτώνεται στο τερματικό με ασφαλή τρόπο και εγκαθίσταται ακριβώς σε εκείνο το partition του SDR hardware όπου υπάρχει το κατάλληλο software module.

Για να ορίσουμε την αρχιτεκτονική ενός SDR πρέπει να διαχωρίσουμε τις ροές πληροφοριών και ελέγχου μέσα στα τερματικά, καθώς επίσης και τη συγκέντρωση των παραμέτρων και των γενικών πληροφοριών συστήματος, έτσι ώστε να έχουμε ελεγχόμενες, αξιόπιστες και τυποποιημένες διαδικασίες επανασηματισμού. Μια αναδιαμορφώσιμη πλατφόρμα επικοινωνιών πρέπει να καλύψει όλα τα επίπεδα συστημάτων, κυμαινόμενη από τα υποστηριζόμενα δίκτυα και τους αναδιαμορφώσιμους σταθμούς βάσης ως την ικανότητα αναδιαμόρφωσης των τερματικών RF και BB modules. Επομένως, γίνεται ευρέως κατανοητό ότι, τουλάχιστον αυτήν την περίοδο, δεν υπάρχει ούτε μια πλατφόρμα, αρχιτεκτονική και τεχνολογία εφαρμογής ικανές να παρέχουν μια ομοιογενή δομή για τον εξοπλισμό SDR.

Επιπλέον, η προσδοκώμενη ευελιξία τέτοιου εξοπλισμού απαιτεί μια ικανή ρύθμιση των διάφορων στοιχείων των συστημάτων και των μηχανισμών ικανές να διαχειριστούν τις πλήρεις διαδικασίες αναδιαμόρφωσης (δύο παραδείγματα είναι η Mobile VCE's Reconfiguration Management Architecture RMA και η TRUST's Configuration Management Module CMM). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, και συγχρόνως στοχεύοντας για ανοικτό programmability έτσι ώστε να έχουμε ανάπτυξη ποικιλίας λογισμικού, απαιτείται μια αρχιτεκτονική διεπαφών και για τις περιοχές ελέγχου και δεδομένων.

Η εικόνα 6 αναπαριστά τις διάφορες διεπαφές μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων μέσα σε ένα reconfigurable σύστημα. Στην πλευρά του τερματικού, μια μονάδα διαχείρισης (RMA, CMM, κλπ...) ελέγχει και οδηγεί τη διαδικασία αναδιαμόρφωσης όπου το χαρακτηριστικό 'Mode Switching' μπορεί να εφαρμοστεί για να ελέγξει το περιβάλλον και να υποστηρίξει HOs. Οι ελεγκτές διαχείρισης επανασηματισμού MVCE είναι μια λύση για να επιτρέψουν τον επανασηματισμό των modules μέσα στις αλυσίδες πομποδεκτών.



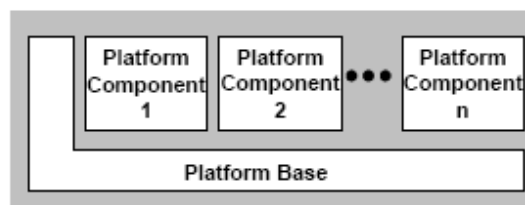
Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική διεπαφής για αναδιαμορφώσιμα συστήματα

## 2.2 Το σύστημα SDR και τα υποστηριζόμενα δικτυακά πρότυπα και αρχιτεκτονικές

### 2.2.1 Μοντέλο για ανοικτές πλατφόρμες και ικανότητα αναδιαμόρφωσης

Παρακάτω, παρουσιάζουμε μια αρχιτεκτονική συστημάτων, η οποία δείχνει ότι η ικανότητα αναδιαμόρφωσης και η προσαρμοστικότητα είναι πολύ σημαντική και εφικτή σε όλα τα στρώματα. Ενώ η κύρια εστίαση είναι στο χαμηλότερο στρώμα αναδιαμόρφωσης, εδώ δίνεται μια συνοπτική επισκόπηση των εννοιών προσαρμοστικότητας σε όλα τα στρώματα. Το πρότυπο αρχιτεκτονικής κυμαίνεται από τους μηχανισμούς ραδιομετάδοσης ως τις εφαρμογές που είναι ορατές στον τελικό χρήστη. Είναι δομημένο σε στρώματα που καλύπτουν τη μετάδοση, τη δικτύωση, το υλικολογισμικό (συμπεριλαμβανομένης της υποστήριξης υπηρεσιών), καθώς επίσης και τις εφαρμογές και τις υπηρεσίες.

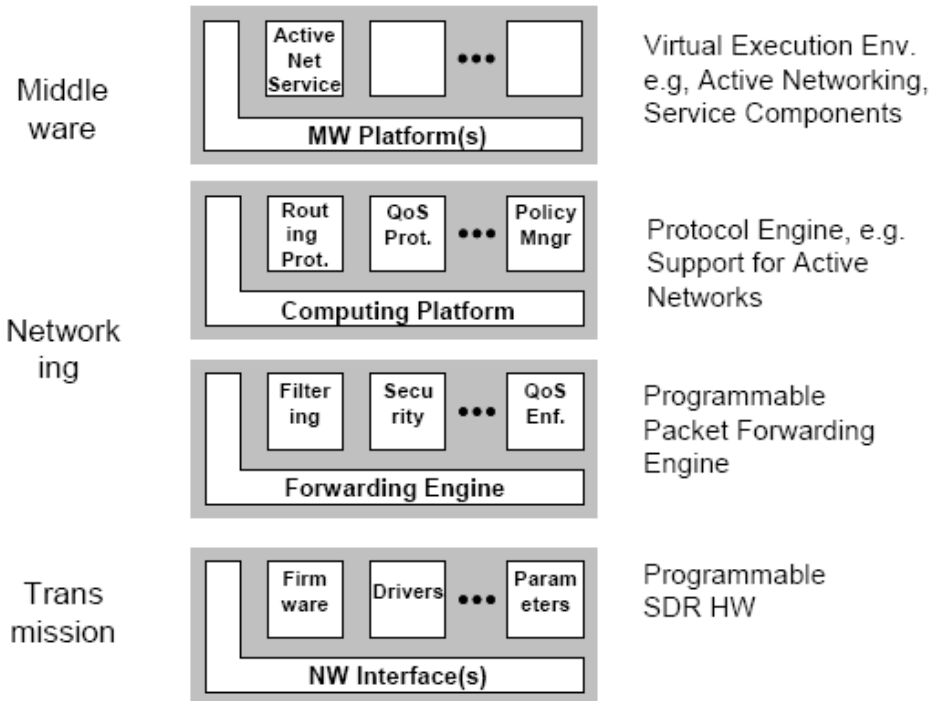
Ένα abstraction στρώμα μπορεί να αποτελείται από διάφορες ανοικτές πλατφόρμες παρέχοντας πραγματική υπολογιστική συμπεριφορά. Κάθε τέτοια πλατφόρμα αποτελείται από μια σταθερή και ελάχιστη βάση πλατφορμών, συν διάφορα τμήματα πλατφορμών, τα οποία μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν για να ικανοποιήσουν διαφορετικές απαιτήσεις σε διαφορετικούς χρόνους.



Εικόνα 7: Ανοικτή πλατφόρμα με τη βάση της και τα στοιχεία της

## 2.2.2 Προσαρμόσιμο μοντέλο δικτυακού Element

Μια γενική αρχιτεκτονική για τα στοιχεία ενός κινητού δικτύου παρουσιάζεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 8: Αναδιαμορφώσιμο στοιχείο δικτύου

Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, τέσσερις πλατφόρμες παρουσιάζονται, κάθε μια προγραμματίσιμη με τα διαμορφώσιμα στοιχεία:

- Η πλατφόρμα ενδιάμεσου λογισμικού (*middleware platform*) μπορεί να δομηθεί στην τοπική, εικονική πλατφόρμα εκτέλεσης, τη διανεμημένη πλατφόρμα επεξεργασίας, και την πλατφόρμα υποστήριξης υπηρεσιών,
- Η πλατφόρμα υπολογισμού (*computing platform*) χρησιμεύει ως μια γενικής χρήσης πλατφόρμα για την επεξεργασία των stateful πρωτοκόλλων, π.χ. δρομολόγηση, QoS σηματοδότηση ή διαχείριση σύνδεσης,
- Η μηχανή αποστολής (*forwarding engine*) βρίσκεται στο μονοπάτι των δεδομένων ενός κόμβου δικτύου και συνδέει τις πλατφόρμες διεπαφών δικτύου, π.χ., χρησιμοποιώντας ένα πίνακα μεταγωγής. Η μηχανή αποστολής είναι προγραμματίσιμη για εργασίες performance-critical, που εκτελούνται ανά-πακέτο,
- Οι πλατφόρμες διεπαφών δικτύου (*network interface platforms*) μπορούν να διαμορφωθούν ή να προγραμματιστούν για να προσαρμοστούν στα

νέα φυσικά πρωτόκολλα στρώματος ή για να προκαλέσουν γεγονότα ακόμα και σε υψηλότερα στρώματα.

### 2.2.3 Έλεγχος αναδιαμόρφωσης τερματικού

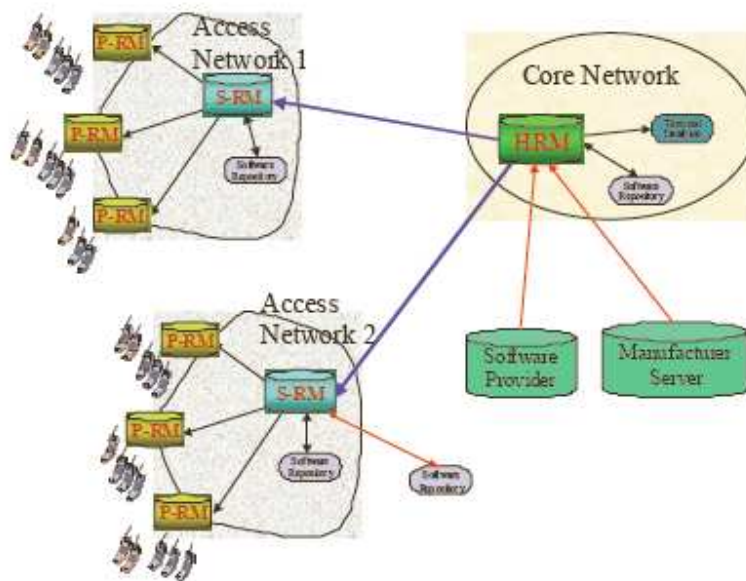
Για την καλύτερη εξυπηρέτηση του χρήστη, χρειάζεται μια σωστή αναδιαμόρφωση σε επίπεδο τερματικού. Το over-the-air download θα επιτρέψει τη δυναμική παροχή των κινητών υπηρεσιών στα reconfigurable τερματικά. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του λογισμικού που θα περιλαμβάνει τις ραδιο-παραμέτρους, τα πρωτόκολλα και τις διορθώσεις του λογισμικού, πρέπει να εξεταστούν οι χρονικοί περιορισμοί, η διαχείριση κυκλοφορίας και οι εκτιμήσεις ασφάλειας. Το κίνητρο των χειριστών δικτύων για το SDR είναι να παράσχουν τις καλύτερες υπηρεσίες στο χρήστη, αλλά και να εξασφαλίσουν την ικανοποίηση από τη μεριά των χρηστών. Για αυτό το λόγο, κάθε αναβάθμιση στο λογισμικό πρέπει να ελεγχθεί από την πλευρά του δικτύου προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι απαιτήσεις εφαρμογής και οι πόροι δικτύων. Οι βασικές απαιτήσεις από μια άποψη χειριστών δικτύων είναι:

- Ασφαλή και αξιόπιστη διανομή του λογισμικού,
- Integration με τις παραμέτρους χρήστη, τις εφαρμογές και την τιμολόγηση,
- Η κλιμάκωση θα απαιτήσει μια διανεμημένη εκτέλεση των αναβαθμίσεων του λογισμικού,
- Υποστήριξη για την ετερογενή υποδομή δικτύων και την ποικιλομορφία μεταξύ των τερματικών.

Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανωτέρω απαιτήσεις, απαιτείται μια ευέλικτη και αξιόπιστη αρχιτεκτονική για τον έλεγχο SDR.

### 2.2.4 Αρχιτεκτονική συστήματος SDR

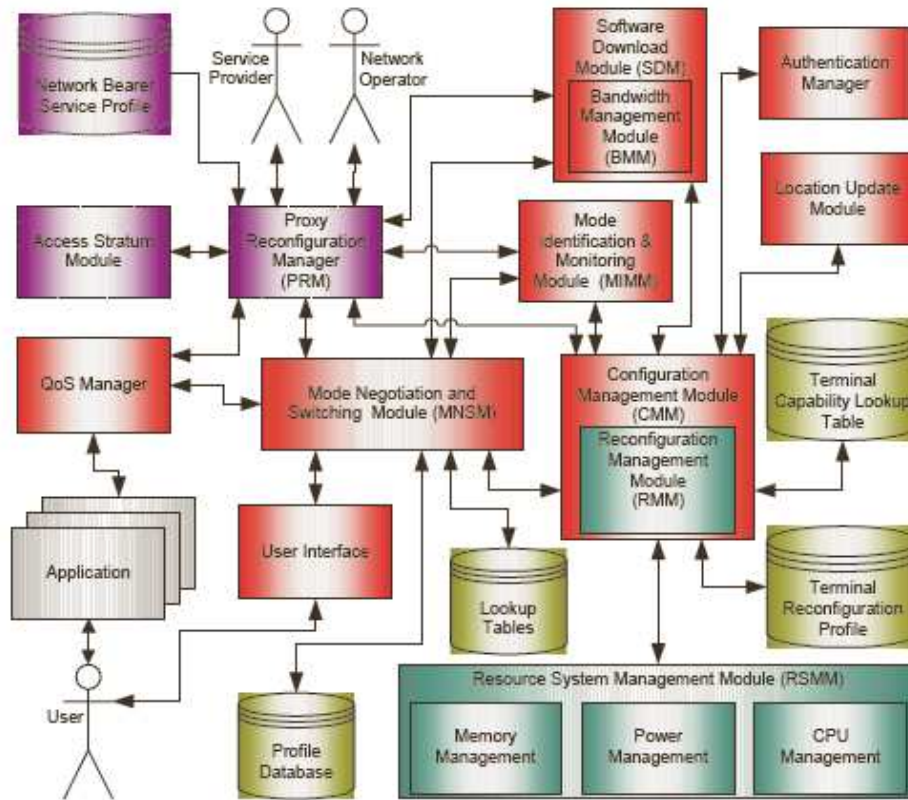
Η κατάλληλη δικτυακή αρχιτεκτονική βασισμένη σε IP αρχιτεκτονική, η οποία υποστηρίζει τα αναδιαμορφώσιμα τερματικά και τα δίκτυα πρόσβασης, διαχειρίζεται την κυκλοφορία του λογισμικού που μεταφορτώνεται και διευκολύνει την κοινή ραδιο-διαχείριση των πόρων, θα αναπτυχθεί παρακάτω. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, θα μπορούσε να πάρει ως βάση τη δίκτυο-κεντρική αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στην εικόνα 9. Το δίκτυο που δίνεται λειτουργεί ως το μέσο για την επικοινωνία μεταξύ του Serving Re-configuration Manager (S-RM) στο Δίκτυο Πρόσβασης (Access Network) και του Home Re-configuration Manager (H-RM) στο Δίκτυο Κορμού (Core Network).



Εικόνα 9 : Δικτυο-κεντρική αρχιτεκτονική

Το S-RM χρησιμοποιείται σε κάθε δίκτυο πρόσβασης και διαστασιολογείται σύμφωνα με τον αριθμό χρηστών που ένα δίκτυο πρόσβασης μπορεί να υποστηρίξει και τις αναμενόμενες υπηρεσίες που υπάρχουν για το δίκτυο πρόσβασης. Το P-RM χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιήσει τις καθυστερήσεις, να εντοπίσει την κατάσταση και τη θέση του τερματικού, και να διαπραγματευτεί μεταξύ του τερματικού και του S-RM μια στρατηγική για την καλύτερη αναδιαμόρφωση. Τα S-RM και H-RM είναι βασικά στοιχεία για τη βελτίωση ενός μεγάλου αριθμού τερματικών και αναλαμβάνουν διάφορα ζητήματα διαχείρισης και ασφάλειας που ασκούν κρίσιμη επίδραση στην απόδοση δικτύων.

Η αρχιτεκτονική SDR που αναπτύσσεται παρουσιάζεται στην εικόνα 10. Απεικονίζει τα στοιχεία που απαιτούνται στην αρχιτεκτονική του τερματικού και του δικτύου. Η αρχιτεκτονική τερματικού αποτελείται από αναδιαμορφώσιμα συστατικά και τα σχετικά με το σύστημα μέρη των πόρων του τερματικού (που απεικονίζονται με πράσινο χρώμα) και αφ' ετέρου τον έλεγχο της διεργασίας επανασχηματισμού και τα μέρη της διαμόρφωσης (που παρουσιάζονται στο κόκκινο χρώμα), τα οποία είναι ο πυρήνας αυτής της αρχιτεκτονικής. Επιπλέον εξετάζεται η εμπλοκή του δικτύου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επανασχηματισμού (τα μπλοκ με πορφυρό χρώμα). Τα βέλη που σύρονται μεταξύ των μπλοκ αντιπροσωπεύουν τις αλληλεπιδράσεις και δείχνουν είτε κάποια διαπραγμάτευση είτε μια αλληλεπίδραση αποθήκευσης ή επανάκτησης εάν ένα από τα μπλοκ αντιπροσωπεύει μια συλλογή δεδομένων ή μια ερώτηση.



Εικόνα 10 : Αρχιτεκτονική SDR εξοπλισμού

Οι οντότητες πυρήνα στη διαδικασία αναδιαμόρφωσης είναι οι διαχειριστές επανασηματισμού proxy (PRMs) που βρίσκονται σε κάθε ραδιοδίκτυο πρόσβασης. Τα PRMs είναι τα σημεία επαφής για κάθε τερματικό που συνδέεται με το ραδιοδίκτυο πρόσβασης σχετικά με τον επανασηματισμό. Σε περίπτωση που ένα τερματικό αρχίσει να κατεβάζει λογισμικό, το τερματικό στέλνει σήμα την ανάγκη για αναδιαμόρφωση στο τρέχον PRM του ραδιοδικτύου πρόσβασης και κατόπιν το PRM είναι αρμόδιο για την παράδοση της κατάλληλης ενότητας λογισμικού.

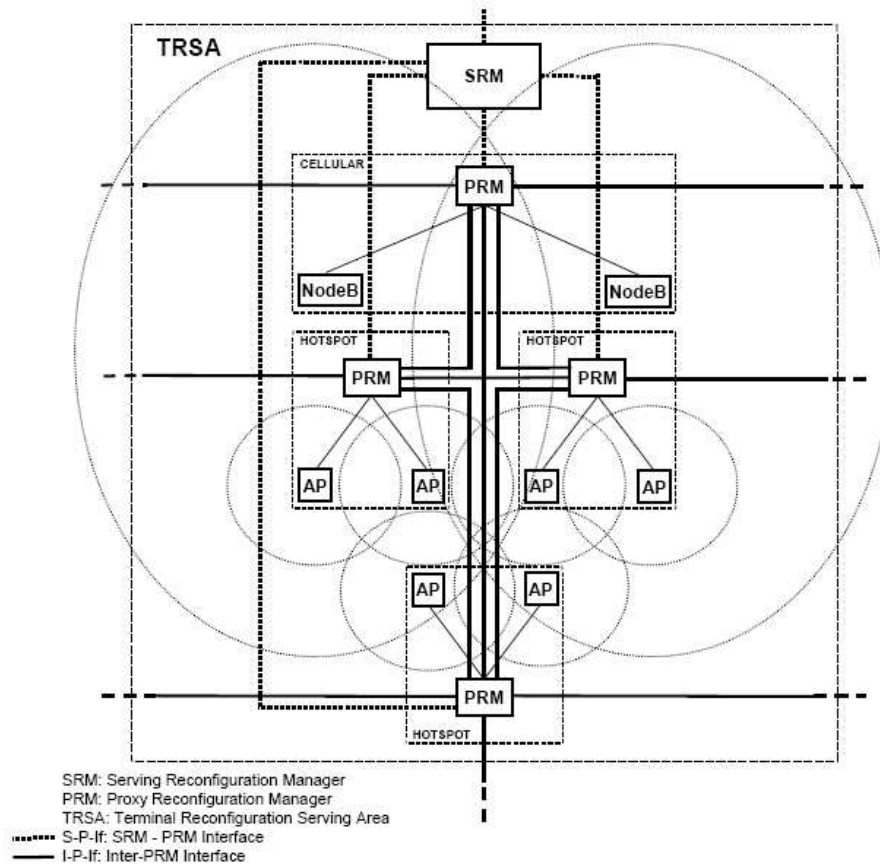
Σε σχέση με τη μεταφόρτωση λογισμικού, το PRM αποθηκεύει τα software modules στην τοπική μνήμη του. Εντούτοις, ο αποθηκευτικός χώρος στο PRM δεν είναι τόσο μεγάλος. Η πρόθεση είναι να υπάρξει μια γρήγορη πρόσβαση στις πολύ συχνά χρησιμοποιούμενες ενότητες. Για τα λιγότερο συχνά αιτήματα του λογισμικού υπάρχει μια διεπαφή μεταξύ του PRM και μιας ενδιάμεσης βάσης δεδομένων κεντρικών υπολογιστών, ο serving reconfiguration manager (SRM). Κατά συνέπεια, το αίτημα προωθείται και υποβάλλεται σε επεξεργασία από τον SRM. Μια άλλη πιθανή ενισχυτική λειτουργία επανασηματισμού είναι η Inter-PRM-διεπαφή. Επομένως, γειτονικά PRMs συνδέονται το ένα με το άλλο και ανταλλάζουν κάποιες πληροφορίες για την παρούσα κατάσταση του radio ή για μια τρέχουσα αλλαγή στην κατάσταση ενός τερματικού. Ο επανασηματισμός ενός τερματικού μπορεί να αρχίσει από το τερματικό, αλλά μπορεί επίσης να προκληθεί και από μια εξωτερική οντότητα. Στην περίπτωση μιας νέας

έκδοσης οδηγών υλικού, είναι ανεπαρκές να ενημερωθεί κάθε τερματικό χωριστά. Η χρήση πολλαπλής διανομής (multicast) θα βοηθούσε να βελτιστοποιήσει την παράδοση του λογισμικού.

Η περιοχή των εξυπηρετούμενων PRMs από ένα SRM καλείται terminal reconfiguration serving area (TRSA). Το TRSA εσωκλείει όλα τα PRMs που συνδέονται με ένα SRM. Το TRSA δεν είναι περιορισμένο σε ένα δίκτυο ή μια τεχνολογία και μπορεί επομένως να κλιμακωθεί και να καλύψει διάφορα ραδιοδίκτυα πρόσβασης (π.χ. εάν η συνολική κάλυψη μιας περιοχής επιτυγχάνεται από διαφορετικά WLANs) ή να είναι μικρότερο από ένα ενιαίο ραδιοδίκτυο πρόσβασης και να καλύψει μόνο ένα μέρος του δικτύου πρόσβασης (π.χ. εάν ένα ενιαίο ραδιοδίκτυο πρόσβασης καλύπτει το σύνολο μιας ηπείρου).

Όλη η πληροφορία της αναδιαμόρφωσης που στέλνεται από και στο TRSA οδηγείται είτε πέρα από την εξωτερική σύνδεση του SRM είτε πέρα από το Inter-PRM-Interface, εάν γειτονικά PRMs σε επικαλυπτόμενες κυψέλες ανταλλάσσουν πληροφορίες. Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μιας περιοχής επανασχηματισμού τερματικού. Σε αυτήν την περιοχή υπάρχουν πολλές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης : τρεις περιοχές δυναμικής ζώνης με 2 έχουν σημεία πρόσβασης (π.χ. ieee 802.11 ή Hiplerlan2) σε κάθε περιοχή με τη μικρότερη έκταση αλλά με υψηλό μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης και ένα σημείο πρόσβασης στην κυψέλη τα οποία ανήκουν στο ίδιο TRSA. Τα γειτονικά PRMs σε επικάλυψη κυψελών συνδέονται μεταξύ τους από την Inter-PRM -διεπαφή και κάθε PRM συνδέεται στο τοπικό SRM.





*Εικόνα 11: Παράδειγμα οντοτήτων και των διεπαφών μιας περιοχής αναδιαμόρφωσης τερματικού (TRSA) από διαφορετικές τεχνολογίες ραδιο-πρόσβασης.*

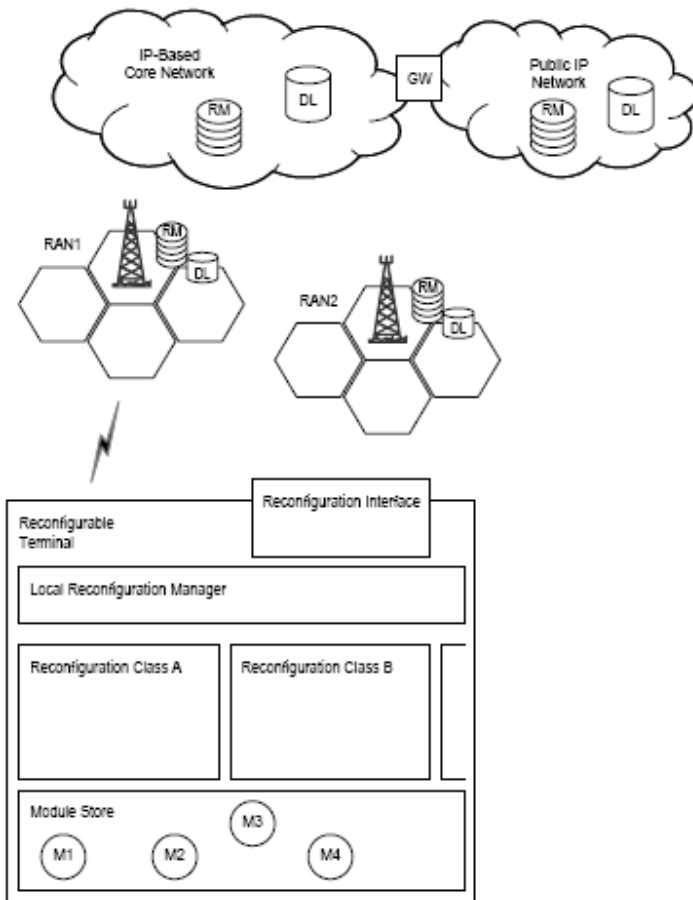
Ένα τερματικό SDR θα μπορούσε να εκτελέσει πολλούς διαφορετικούς τύπους επανασχηματισμού. Για παράδειγμα, η ενημέρωση του firmware που συνδέθηκε στα διαφορετικά μέρη hardware με νέους αλγόριθμους DSP, οι οποίοι θα βελτιώσουν τη σύνδεση στα υπάρχοντα ή στα νέα δίκτυα πρόσβασης, η μεταφόρτωση νέων εφαρμογών όπως η αναπροσαρμογή στη νέα έκδοση WAP και νέων codecs για τις υπάρχουσες εφαρμογές, όπως νέα κωδικοποίηση φωνής ή εικόνας που επιτρέπει μια καλύτερη συμπίεση. Τα δυσλειτουργούντα τερματικά μπορεί να επισκευαστούν με τη βοήθεια νέου λογισμικού εάν το πρόβλημα προκλήθηκε από κάποιο bug στο παλιό λογισμικό. Ακόμη και τα νέα πρωτόκολλα μεταφοράς ή η βελτίωση στα ήδη υπάρχοντα θα μπορούσαν επίσης να προσαρμοστούν από ένα τερματικό SDR μετά από ένα ασφαλές download των απαραίτητων αρχείων.

## 2.2.5 Ασφάλεια αναδιαμόρφωσης

Ένα δίκτυο επικοινωνίας εκτίθεται στις ακόλουθες βασικές απειλές: μηνύματα μπορούν να παρεμποδιστούν, να τροποποιηθούν, να καθυστερήσουν, να επαναληφθούν, ή μπορούν να παρεμβληθούν νέα μηνύματα. Επίσης μπορεί να υπάρξει πρόσβαση χωρίς έγκριση σε ένα δίκτυο και στους παρεχόμενους πόρους, και αυτά μπορούν να γίνουν μη διαθέσιμα με denial-of-service επιθέσεις. Οι υπηρεσίες ασφάλειας που χρησιμοποιούνται ενάντια σε αυτές τις απειλές είναι:

- Εμπιστευτικότητα (Confidentiality): Τα δεδομένα αποκαλύπτονται μόνο στο προοριζόμενο τερματικό,
- Ακεραιότητα (Integrity): Τα δεδομένα δεν μπορούν να τροποποιηθούν χωρίς ανίχνευση,
- Επικύρωση (Authentication): Μια οντότητα έχει στην πραγματικότητα την ταυτότητα που υποστηρίζει ότι έχει,
- Έλεγχος πρόσβασης (Access Control) και Διαθεσιμότητα (Availability): Εξασφαλίζουν ότι μόνο οι εξουσιοδοτημένες ενέργειες μπορούν να εκτελεστούν,
- Ανωνυμία (Anonymity) : Εντοπίζει την ταυτότητα του χρήστη.

Η αναδιαμόρφωση θα επιτρέψει να αλλάξει, να επεκτείνει και να αναβαθμίσει τη λειτουργία που έχει καθοριστεί ήδη. Χωρίς κατάλληλους μηχανισμούς προστασίας, η ευελιξία και η αυξανόμενη λειτουργία του αναδιαμορφώσιμου εξοπλισμού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με λάθος τρόπο. Είναι επομένως ουσιαστικό να εξασφαλιστεί ότι ο αναδιαμορφώσιμος εξοπλισμός μπορεί να διαμορφωθεί μόνο με ασφαλείς και εξουσιοδοτημένους τρόπους όπου οι προτιμήσεις και οι προσδοκίες των οντοτήτων που συμμετέχουν να γίνονται σεβαστές. Μια αρχιτεκτονική αναδιαμόρφωσης περιλαμβάνει τις υπηρεσίες και τους μηχανισμούς ασφάλειας που εφαρμόζουν τους στόχους ασφάλειας επανασχηματισμού.



Εικόνα 12 : Μοντέλο ασφάλειας αναδιαμόρφωσης

Η εικόνα 12 παρουσιάζει το πρότυπο συστημάτων των οντοτήτων σχετικών για την ασφάλεια επανασηματισμού. Οι κόμβοι υποστήριξης αναδιαμόρφωσης ως διευθυντές αναδιαμόρφωσης (reconfiguration managers-RM) και οι download servers (DL) μπορούν να τοποθετηθούν στο ραδιοδίκτυο πρόσβασης (radio access network-RAN), στο κεντρικό δίκτυο, ή σε ένα δημόσιο δίκτυο που συνδέεται με μια πύλη (gateway-GW). Ένα reconfigurable τερματικό παρέχει μια διεπαφή αναδιαμόρφωσης για την επικοινωνία μεταξύ του τοπικού διαχειριστή αναδιαμόρφωσης και του κόμβου με δυνατότητα αναδιαμόρφωσης. Ένα αναδιαμορφώσιμο μέρος καλείται "reconfiguration class". Μια reconfiguration class μπορεί παραδείγματος χάριν να ανταποκρίνεται στη ραδιοδιεπαφή, στη φωνή ή τα βίντεο codecs, στα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τις εφαρμογές χρηστών. Το αναδιαμορφώσιμο τερματικό περιέχει ένα τοπικό χώρο αποθήκευσης module όπου το λογισμικό, οι παράμετροι και οι συμπληρωματικές πληροφορίες διαμόρφωσης αποθηκεύονται.

Οι ακόλουθοι στόχοι ασφάλειας αναδιαμόρφωσης παραθέτουν τις προσδοκίες για τις υπηρεσίες και τους μηχανισμούς ασφάλειας:

- Ασφαλές download και εκτέλεση του λογισμικού απαιτείται για να αποτρέψει την δραστηριότητα από κακόβουλο λογισμικό,
- Ο έλεγχος αναδιαμόρφωσης εξασφαλίζει ότι μόνο οι νόμιμοι επανασηματισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν, δηλαδή ότι μόνο οι εξουσιοδοτημένοι διαχειριστές επανασηματισμού μπορούν να αρχίσουν και να εκτελέσουν έναν επανασηματισμό μόνο στα επιτρεπόμενα μέρη (reconfiguration classes). Η σηματοδότηση πρέπει να προστατευθεί, και οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για τον επανασηματισμό πρέπει να είναι αξιόπιστες,
- Η πρόσβαση στις ιδιωτικές πληροφορίες ενός χρήστη όπως οι προτιμήσεις του και η παρούσα κατάσταση του αναδιαμορφώσιμου τερματικού του και επίσης ο ίδιος ο χρήστης πρέπει να ελεγχθούν. Πρέπει επίσης να είναι δυνατό για έναν χειριστή δικτύων να κρατήσει τις εσωτερικές λεπτομέρειες του δικτύου του εμπιστευτικές,
- Η αναδιαμόρφωση επιτρέπει να προσαρμόσει τη ραδιοδιεπαφή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας με ευέλικτο τρόπο. Οι ρυθμιστικοί οργανισμοί θέτουν τις απαιτήσεις στο ραδιοεξοπλισμό σχετικά με την ασφάλεια χρηστών, την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (immunity EMC), και τη χρήση ραδιοφάσματος (εκπομπή EMC). Πρέπει να εξασφαλιστεί ότι ένα τερματικό μπορεί να διαμορφωθεί μόνο με τέτοιους τρόπους,
- Αν και οι μηχανισμοί διαχείρισης ασφάλειας και διαμόρφωσης πρέπει να αποτρέπουν την ενεργοποίηση μιας κακόβουλης διαμόρφωσης, οι διαδικασίες διαχείρισης ελαττωμάτων (fault management procedures) θα μπορούσαν να εισαχθούν για να ανιχνεύσουν τα τερματικά με δυσλειτουργούσα συμπεριφορά και να εκτελέσουν τις διορθωτικές ενέργειες.

## 2.2.6 Ασφαλές download λογισμικού και εφαρμογών

Το δυναμικό download λογισμικού είναι μια βασική τεχνολογία για την αναδιαμόρφωση. Το κακόβουλο λογισμικό θα μπορούσε να παρακάμψει άλλους μηχανισμούς ασφάλειας που απαιτήθηκαν για την ασφαλή πρόσβαση στο δίκτυο σε ένα κυψελωτό δίκτυο ή σε ένα ενδοδίκτυο μιας επιχείρησης, ή θα μπορούσε να στείλει τα ιδιωτικά στοιχεία ενός χρήστη εκτός δικτύου ή να καταστήσει τη συσκευή απλά ακατάλληλη προς χρήση. Η συσκευή θα μπορούσε επίσης να λειτουργήσει ενάντια στο ενδιαφέρον του χρήστη, παραδείγματος χάριν με την κλήση των υπηρεσιών υψηλής τιμολόγησης χωρίς την συγκατάθεση του χρήστη εν αγνοία του, ή με την εφαρμογή μιας λειτουργίας επιτήρησης (bug). Για να αποτραπεί η ζημιά από το ενδεχομένως κακόβουλο λογισμικό, δύο βασικές μέθοδοι μπορούν να υιοθετηθούν:

- Μέθοδος Sandbox: Σε αυτήν την μέθοδο, το λογισμικό που κατέβηκε εκτελείται σε ένα περιορισμένο και ελεγχόμενο περιβάλλον εκτέλεσης (sandbox). Η εκτέλεση του λογισμικού στο sandbox μπορεί να έχει πρόσβαση μόνο στη λειτουργία που θεωρείται ασφαλής με αποτέλεσμα ένα πρόγραμμα άπρεπης συμπεριφοράς να μην μπορεί να προκαλέσει ζημιά.

- Μέθοδος Trust-based: Μόνο το λογισμικό από τους εμπιστευμένους προμηθευτές γίνεται αποδεκτό, όπου ο προμηθευτής υπογράφει ένα πακέτο λογισμικού χρησιμοποιώντας μια ψηφιακή υπογραφή (π.χ. RSA/PKCS#1 ή DSA) στον υπογεγραμμένο κώδικα. Ο υπογεγραμμένος κώδικας επιτρέπει στο δέκτη για να επιβεβαιώσει τον προμηθευτή και την ακεραιότητα του λαμβανόμενου πακέτου λογισμικού.

### 2.2.7 Έλεγχος αναδιαμόρφωσης

Οι περιορισμοί στον επανασηματισμό πρέπει να είναι σε ισχύ για να εξασφαλίσουν ότι ενεργοποιούνται μόνο οι ασφαλείς διαμορφώσεις που ικανοποιούν τον τελικό χρήστη και τις προτιμήσεις των δικτύων. Οι έλεγχοι εάν μια διαμόρφωση είναι ασφαλής μπορούν να εκτελεστούν από το ίδιο το reconfigurable τερματικό, ή από έναν κόμβο στο δίκτυο.

Επίσης, πρέπει να καθοριστεί ποιος έχει την άδεια πραγματικά για να αρχίσει και να εκτελέσει τύπους επανασηματισμών. Ο κατασκευαστής αναμένεται να είναι αρμόδιος για την εφαρμογή των μηχανισμών προστασίας που εξασφαλίζουν τη ρυθμιστική συμμόρφωση και προστατεύουν το τερματικό από το κακόβουλο λογισμικό. Αλλά επιπλέον πρέπει να ελεγχθεί ποιο λογισμικό μεταφορτώνεται πραγματικά και χρησιμοποιείται, όταν πραγματοποιείται η αναδιαμόρφωση. Αυτές οι αποφάσεις θα μπορούσαν να είναι υπό τον έλεγχο του τελικού χρήστη, του χειριστή δικτύων, του φορέα παροχής υπηρεσιών επικοινωνίας, ή ενός ανεξάρτητου φορέα παροχής υπηρεσιών. Οι φορείς παροχής υπηρεσιών και οι χειριστές δικτύων θέλουν να παρέχουν μια αξιόπιστη υπηρεσία που να ικανοποιεί τις προσδοκίες των τελικών χρηστών. Η ενεργοποίηση μιας διαμόρφωσης που είτε δεν λειτουργεί ή που δεν παρέχει τις υπηρεσίες ζητηθείσες από τους τελικούς χρήστες πρέπει να αποτραπεί για να εξασφαλίσει μια υψηλή ικανοποίηση χρηστών.

Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων που περιλαμβάνονται στον επανασηματισμό πρέπει να προστατευθεί, παραδείγματος χάριν χρησιμοποιώντας IPsec ή TLS. Συγχρόνως, πρέπει να προστατευθούν οι πληροφορίες σχετικές με την αναδιαμόρφωση όπως τα προφίλ, οι προτιμήσεις, και οι πληροφορίες για την παρούσα κατάσταση του τερματικού.

## **2.3 Interface διαχείρισης, ελέγχου και δεδομένων διασυνδέουν την πλατφόρμα SDR και την αρχιτεκτονική λογισμικού SDR**

Η βάση για τον αναδιαμορφώσιμο εξοπλισμό είναι μια ισχυρή πλατφόρμα επεξεργασίας και μια λογική και δομημένη αρχιτεκτονική λογισμικού ικανές να εφαρμόσουν τις απαιτήσεις συστημάτων των διάφορων RATs. Σημαντικός στόχος αυτής της αρχιτεκτονικής SW είναι να ενσωματωθούν οι διαφορετικές τεχνολογίες και οι πλατφόρμες και να χρησιμοποιηθεί η προγραμματισιμότητα αυτών των πλατφορμών για να καταστήσουν τα συστήματα αναδιαμορφώσιμα. Ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο πρέπει να αναπτυχθεί, το οποίο να εξετάζει το συνυπολογισμό των ανοικτών διεπαφών προγραμματισμού και για το στρώμα εφαρμογής αλλά και για τα χαμηλότερα επίπεδα συστημάτων (δηλαδή μια ανοικτή διεπαφή προγραμματισμού για το λογισμικό εφαρμογής RAT).

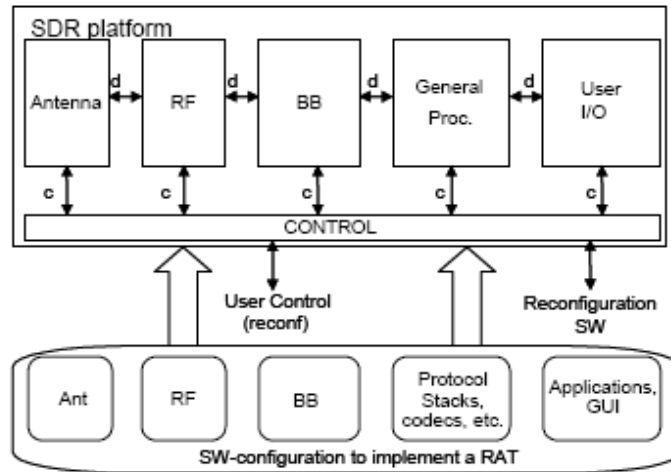
Υποθέτοντας τη διαθεσιμότητα του "ιδανικού" τερματικού SDR, ο καθορισμός των απαραίτητων διεπαφών θα απλοποιούταν. Εντούτοις, η πραγματικότητα απαιτεί τη ρύθμιση των διάφορων λειτουργικών φραγμών μέσα στις αλυσίδες δεκτών και πομπών σημάτων των τερματικών SDR, όπως φαίνεται στην εικόνα 6 και τα τμήματα αναδιαμορφώσιμων μερών RF και του BB. Τα αναδιαμορφώσιμα τερματικά έχουν, σε αντίθεση με τα μη-αναδιαμορφώσιμα, την πρόσθετη ανάγκη να παρέχουν μια βασική συνδετικότητα, ειδικότερα εάν το τερματικό δεν διαμορφώνεται σε έναν διαθέσιμο RAT. Αυτή η συνδετικότητα μπορεί να επιτευχθεί είτε με polling ή με «ανίχνευση» του ραδιοπεριβάλλοντος και την απαραίτητη διαμόρφωση του τερματικού (κάτι τέτοιο απαιτεί ότι ένα RAT εντοπίζεται και ότι το απαραίτητο λογισμικό διαμόρφωσης αποθηκεύεται μέσα στο τερματικό).

Τα επόμενα τμήματα αυτού του κεφαλαίου περιγράφουν τις διάφορες διεπαφές των αναδιαμορφώσιμων συστημάτων, αρχίζοντας από τη διάκριση σε «commercial» και «reconfiguration related» κίνηση, και εξετάζουν το διαχωρισμό ανάμεσα στα reconfigurable μέρη του BB και RF των τερματικών SDR. Το επόμενο βήμα έπειτα θα είναι ο προσδιορισμός των διάφορων διεπαφών ελέγχου και διαχείρισης και τελικά μια επισκόπηση για τις πιθανές δομές λογισμικού των SDR εφαρμογών/διαμορφώσεων.

### **2.3.1 Ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του δικτύου και του τερματικού**

Στο μέλλον τα αναδιαμορφώσιμα radios θα παράσχουν τις εφαρμογές των τερματικών κινητής επικοινωνίας που εμμένουν στα δεδομένα πρότυπα RAT (π.χ. UMTS, GPRS, H2, IEEE802.11, κτλ.). Αυτές οι λογισμικώς καθορισμένες εφαρμογές θα παρέχουν, ως ελάχιστο, όλες τις υπηρεσίες και τις λειτουργίες που ένα hardwired τερματικό των επιλεγμένων προτύπων θα προσέφερε. Εντούτοις, για να αναλάβουν την αναδιαμόρφωση κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης, τα αναδιαμορφώσιμα τερματικά απαιτούν τα μέσα για να ελέγχουν και να ρυθμίζουν τέτοιες διαδικασίες επανασχηματισμού.

Η εικόνα 13 απεικονίζει την παραπάνω αρχή, με την οποία τα δεδομένα και η σηματοδότηση RAN (Radio Access Network) αντιμετωπίζεται στην εφαρμογή RAT μέσα στο τερματικό SDR (χρησιμοποιώντας διεπαφές δεδομένων), ενώ η σχετική με τον επανασηματισμό κυκλοφορία απαιτεί το δικό της (εικονικό) μηχανισμό μεταφορών της (χρησιμοποιώντας διεπαφές ελέγχου).



Εικόνα 13 : Αρχιτεκτονική SDR – Διεπαφές δεδομένων και ελέγχου

Η εικόνα 13 επεξηγεί το χωρισμό μεταξύ διεπαφών ελέγχου και δεδομένων ('c' και 'd' διεπαφές αντίστοιχα), με τον οποίο το ανώτερο μέρος της πλατφόρμας SDR περιέχει διάφορες λειτουργικές δομικές μονάδες όπως: κεραία, RF, BB, γενική επεξεργασία και I/O τμήματα χρηστών που διαμορφώνουν την πλατφόρμα επεξεργασίας για να εκτελεστεί το διαμορφωμένο λογισμικό. Οι ενιαίες δομικές μονάδες μέσα σε αυτήν την δομή διαχωρίζονται κάθετα από διεπαφές 'd'. Το είδος των πληροφοριών που περνούν μέσω αυτών εξαρτάται από την πραγματική θέση μέσα στην τελική δομή. Η διεπαφή 'd' μεταξύ της κεραίας και του module RF παρέχει τα διάφορα (αναλογικά) κυματοειδή RF, ενώ μεταξύ των ενότητων RF και του BB τα σήματα πρέπει να μεταλλαχθούν (ανάλογα με το πεδίο και την ικανότητα της πλατφόρμας SDR RF). Η διεπαφή 'c' στην εικόνα 13 παρέχει την πύλη μεταξύ της διαχείρισης αναδιαμόρφωσης και των ενότητων της πλατφόρμας εφαρμογής.

Μια αναδιαμορφώσιμη ραδιοπλατφόρμα θα παράσχει τη δυνατότητα να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί ενδεχομένως οποιαδήποτε (soft-coded) ραδιοεφαρμογή. Η δυνατότητα προγραμματισμού θα επιτρέψει την εκτέλεση των στοιχείων λογισμικού ή ακόμα και πλήρων SW-διαμορφώσεων, η οποία μπορεί να ληφθεί από έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών πηγών, που περιλαμβάνουν: τελικό κατασκευαστή, χειριστή δικτύων αλλά και προμηθευτές λογισμικού τρίτων. Εντούτοις απαιτείται η αναδιαμόρφωση να μην περιοριστεί ή να μεταβιβαστεί στο τερματικό μόνο. Έτσι, εάν στους χρήστες δίνεται η δυνατότητα να εγκαταστήσουν οποιοδήποτε διαθέσιμο λογισμικό στα ραδιοτερματικά τους, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθεί και να ρυθμιστεί η διοικητική πρόσβαση στην πλατφόρμα SDR και στις διαδικασίες αναδιαμόρφωσης.

### 2.3.2 Αρχιτεκτονική SDR για εξοπλισμό SDR

Ο εξοπλισμός SDR θα ικανοποιήσει πολλές απαιτήσεις όπως η δυνατότητα να εφαρμοστεί οποιοδήποτε πρότυπο air-interface μαζί με μια κατάλληλη υποδομή υποστήριξης το οποίο θα παράσχει τη δυνατότητα στον χρήστη να περιπλανηθεί στα δίκτυα πρόσβασης με μία μόνο τηλεφωνική συσκευή. Μια αλλαγή λειτουργίας σε επίπεδο RAT είναι ταυτόσημη με μια διαμόρφωση λογισμικού από την υπάρχουσα σε μία άλλη. Οι προαναφερθείσες αρχιτεκτονικές μπορούν να υποστηρίξουν την αναδιοργάνωση και τον επανασηματισμό των διάφορων ενοτήτων λογισμικού που εφαρμόζουν μια διαμόρφωση. Σε μια τέτοια δομή, οι εξειδικευμένες και ανοικτές διεπαφές θα επιτρέψουν την προσθήκη των νέων υπηρεσιών χωρίς ανάγκη των τροποποιήσεων των ενοτήτων υλικού.

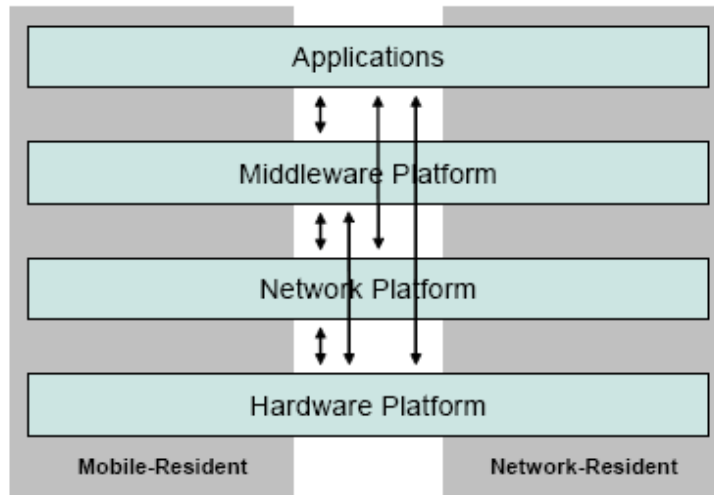
Σε μια αρχιτεκτονική SW για συστήματα τόσο σύνθετα όσο ο εξοπλισμός SDR, η ικανότητα επαναχρησιμοποίησης του κώδικα και τα στοιχεία λογισμικού είναι αναγκαία. Τα νέα πρότυπα air-interface που στηρίζονται στις λίστες πρωτοκόλλου των συστημάτων προκατόχων και τις εφαρμογές SW των ενοτήτων RF/BB μπορούν να έχουν παρόμοια στοιχεία. Η modular ή η object oriented σχεδίαση λογισμικού συνεπάγεται διάφορα πλεονεκτήματα. Η χρησιμοποίηση των καλά καθορισμένων διεπαφών στην πλήρη αρχιτεκτονική SW, θα διευκολύνει τη φορητότητα, την επαναχρησιμοποίηση της ίδιας ενότητας στα διαφορετικά συστήματα και την αναβάθμιση του λογισμικού, δεδομένου ότι οι αντίστοιχες ενότητες μπορούν να ανταλλαχθούν χωριστά.

#### 2.3.2.1 Υποστήριξη υπηρεσιών σε αναδιαμορφώσιμο εξοπλισμό

Για να επιτευχθεί πραγματικό κέρδος για τους χρήστες (και πιθανή αύξηση στα εισοδήματα για τους χειριστές και τους κατασκευαστές), το ζήτημα του απρόβλεπτου και ανεπιθύμητου σχηματισμού ή εμφάνισης των υπηρεσιών πρέπει να ερευνηθεί. Ένα αναδιαμορφώσιμο περιβάλλον επικοινωνίας απαιτείται για να υποστηρίξει τη δημιουργία και την παροχή υπηρεσιών. Έτσι, ολόκληρο το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί να είναι όσο το δυνατόν πιο ευέλικτο και επομένως να παρέχει αναδιαμόρφωση από άκρη σε άκρη και να ενσωματώσει τα ετερογενή περιβάλλοντα επικοινωνίας. Αυτό σημαίνει ότι οι αρχιτεκτονικές λογισμικού πρέπει να καλύψουν το πλήρες σύστημα που κυμαίνεται από τη δικτύωση και τους ασύρματους μηχανισμούς μετάδοσης στις υπηρεσίες τελικών χρηστών.

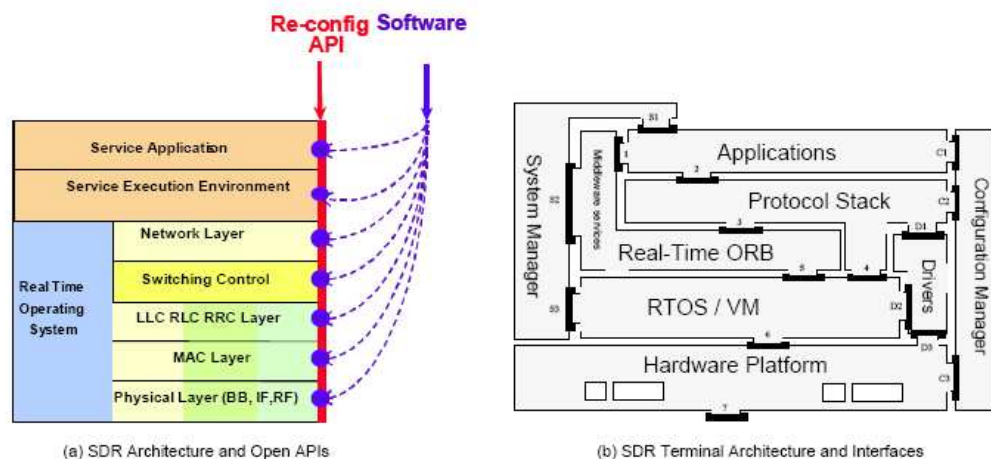
Στην εικόνα 14, φαίνεται η ομαδοποίηση του συστήματος σε στρώματα συμπεριλαμβανομένου του υλικού, της πλατφόρμας δικτύων του υλικολογισμικού και των εφαρμογών. Αντί των αυστηρά απομονωμένων στρωμάτων, η cross-layer συνεργασία θα είναι καθοριστική στο να επιτρέψει διαφορετικούς βαθμούς προσαρμοστικότητας και αναδιαμόρφωσης για τα διαφορετικά μέρη του συστήματος.





Εικόνα 14 : Επικοινωνία στρωμάτων σε σύστημα 4G

Τα τέσσερα στρώματα αλληλεπιδρούν το ένα με το άλλο χρησιμοποιώντας τις καλά καθορισμένες διεπαφές (δηλαδή αυτές οι διεπαφές υπόκεινται στην έρευνα και την προτυποποίηση). Εκτός από τη συνεργασία τους με τα γειτονικά στρώματα σε μια λειτουργική ρύθμιση, κάθε στρώμα πρέπει επίσης να είναι αναδιαμορφώσιμο χωριστά και ανεξάρτητα μέσω των διεπαφών διαμόρφωσης. Οι διεπαφές διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται στην πρόσβαση είτε παραμέτρων στοιχείων μέσα στο στρώμα, είτε για να προσθέσουν, να ανταλλάξουν, είτε να αφαιρέσουν τα πλήρη στοιχεία. Η αρχή αυτού παρουσιάζεται στην εικόνα 15.



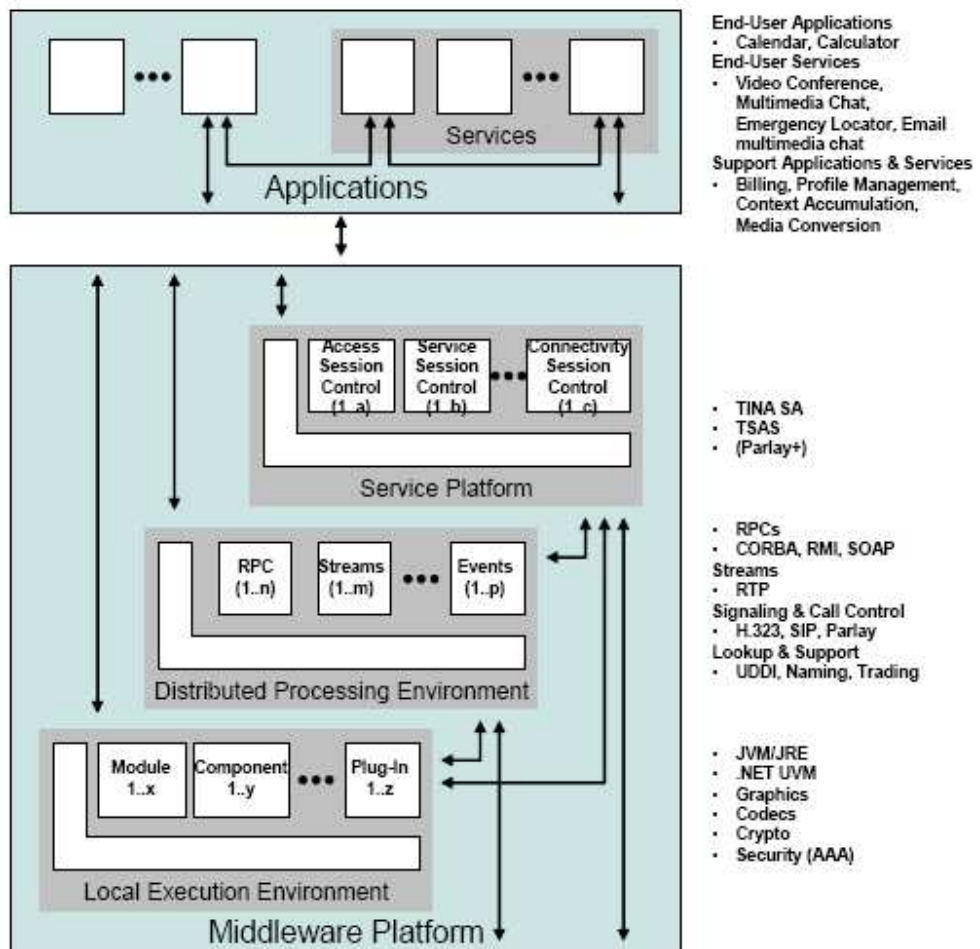
Εικόνα 15 : Αρχιτεκτονική και διεπαφές αναδιαμορφώσιμοι τερματικού SDR

Στη συνέχεια, τα στρώματα πλατφορμών υλικολογισμικού και δικτύων περιγράφονται λεπτομερώς.

### 2.3.2.2 Διαμορφώσιμες υπηρεσίες και πλατφόρμα υλικολογισμικού

Η παροχή και η σχεδίαση πλατφόρμας υλικολογισμικού για αναδιαμορφώσιμο εξοπλισμό είναι, από την άποψη φορέων παροχής υπηρεσιών, η δυνατότητα να αναπτυχθούν αβίαστα και να παρασχεθούν οι νέες, προσαρμοσμένες υπηρεσίες. Οι χειριστές συστημάτων θα αναμείνουν ότι μια πλατφόρμα υλικολογισμικού υποστηρίζει πολύ υψηλή ευελιξία ώστε να είναι εφικτή μια απλή συντήρηση. Το στρώμα πλατφορμών υλικολογισμικού μπορεί να χωριστεί σε τρία μεγαλύτερα λογικά μέρη: το τοπικό περιβάλλον εκτέλεσης, τη διανεμημένη πλατφόρμα επεξεργασίας, και τη πλατφόρμα υπηρεσιών (εικόνα 16):

- Η τοπική πλατφόρμα εκτέλεσης (*local execution platform*) αποσυνδέει τα τμήματα υλικολογισμικού από τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές αλλά και από τις λεπτομέρειες των τμημάτων υλικού και των λειτουργικών συστημάτων.
- Η διανεμημένη πλατφόρμα επεξεργασίας (*distributed processing platform*) αφαιρεί την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών μερών συστημάτων που υπάρχουν είτε σε διαφορετική αλλά και στην ίδια συσκευή. Οι μηχανισμοί που υποστηρίζονται από αυτήν την πλατφόρμα μπορούν να κυμανθούν από τις απλές μακρινές κλήσεις διαδικασίας ως τα σύνθετα streams, τις κλήσεις, ή τον έλεγχο των πόρων.
- Η πλατφόρμα υπηρεσιών (*service platform*) προσφέρει τη σημασιολογία συνόδου (*session semantics*) σε οποιαδήποτε υπηρεσία. Οι σύνοδοι που διατηρούνται με την πλατφόρμα υπηρεσιών μπορούν να χωριστούν στην πρόσβαση, την υπηρεσία και τις συνόδους συνδετικότητας.



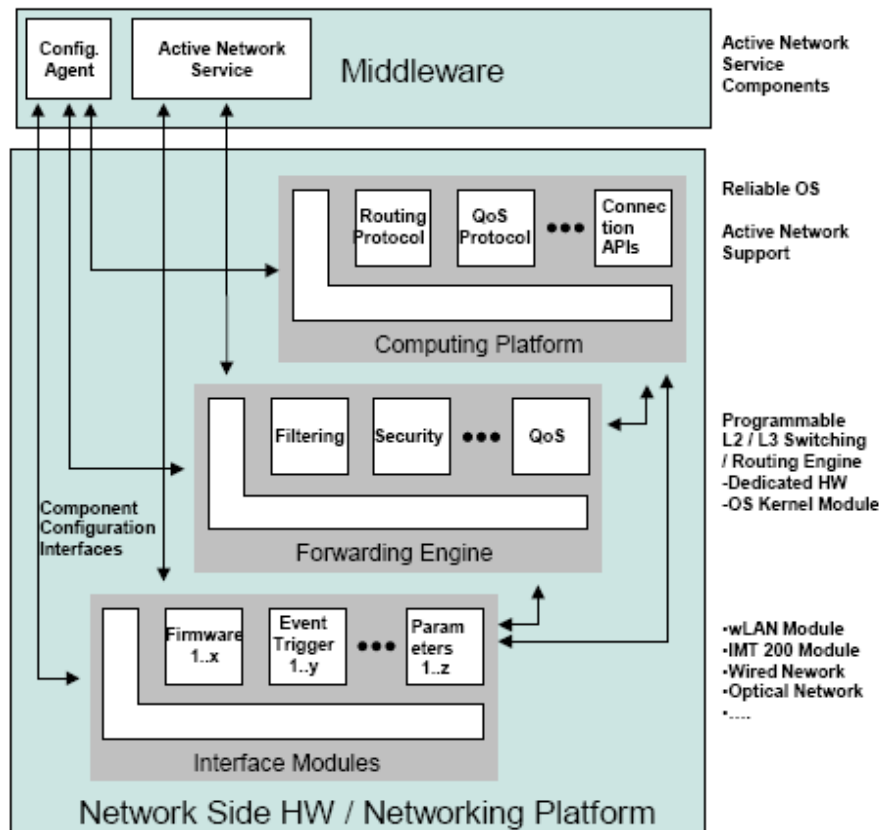
Εικόνα 16 : Πλατφόρμα υλικολογισμικού και εφαρμογές

Το στρώμα εφαρμογών είναι επάνω από την πλατφόρμα υλικολογισμικού και περιέχει τους μηχανισμούς για να αλληλεπιδράσει με τα στρώματα του υλικολογισμικού και της πλατφόρμας δικτύων. Εντούτοις, οι εφαρμογές δε στηρίζονται μόνο στις αλληλεπιδράσεις τους με τα κατώτερα στρώματα, αλλά επιπλέον δρουν ως πελάτες άλλων εφαρμογών. Επομένως, εκτελούνται σε ένα τοπικό περιβάλλον εκτέλεσης αλλά στηρίζονται στη διανεμημένη πλατφόρμα επεξεργασίας. Οι σχετικές με την επικοινωνία υπηρεσίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν την πλατφόρμα και να αποκτήσουν πρόσβαση στις διεπαφές και τη λειτουργία των τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Οι εφαρμογές που εκτελούνται μέσα στο στρώμα εφαρμογής, μπορούν γενικά να ομαδοποιηθούν στις εφαρμογές υποστήριξης και τελικών χρηστών. Αντίθετα, οι υπηρεσίες είναι ειδικές εφαρμογές που απαιτούν την ιδιαίτερη σημασιολογία συνόδου, που παρέχεται με την πλατφόρμα υπηρεσιών.

### 2.3.2.3 Διαμορφωμένη πλατφόρμα δικτύου

Μετά από την προσέγγιση για τον καθορισμό των ανοικτών διεπαφών, όλα τα τμήματα δικτύωσης στο σύστημα πρέπει να βασιστούν στις τεχνολογίες που παρέχουν τις ανοικτές διεπαφές και τις ανοικτές πλατφόρμες υπολογισμού, γεγονός που περιλαμβάνει και τα στρώματα radio και δικτύωσης του προτύπου αρχιτεκτονικής στην εικόνα 14. Αυτό θα απλοποιήσει τη μελλοντική επέκταση των νέων ραδιοτεχνολογιών, των πρωτοκόλλων και των υπηρεσιών. Οι λογισμικώς καθορισμένες τεχνολογίες στα αναδιαμορφώσιμα τερματικά και οι προγραμματίσιμοι, ενεργοί κόμβοι δικτύων θα επιτρέψουν τη γρήγορη επέκταση των νέων υπηρεσιών και των εφαρμογών.

#### A) Κόμβοι δικτυακής υποδομής



Εικόνα 17 : Πλατφόρμα δικτύωσης

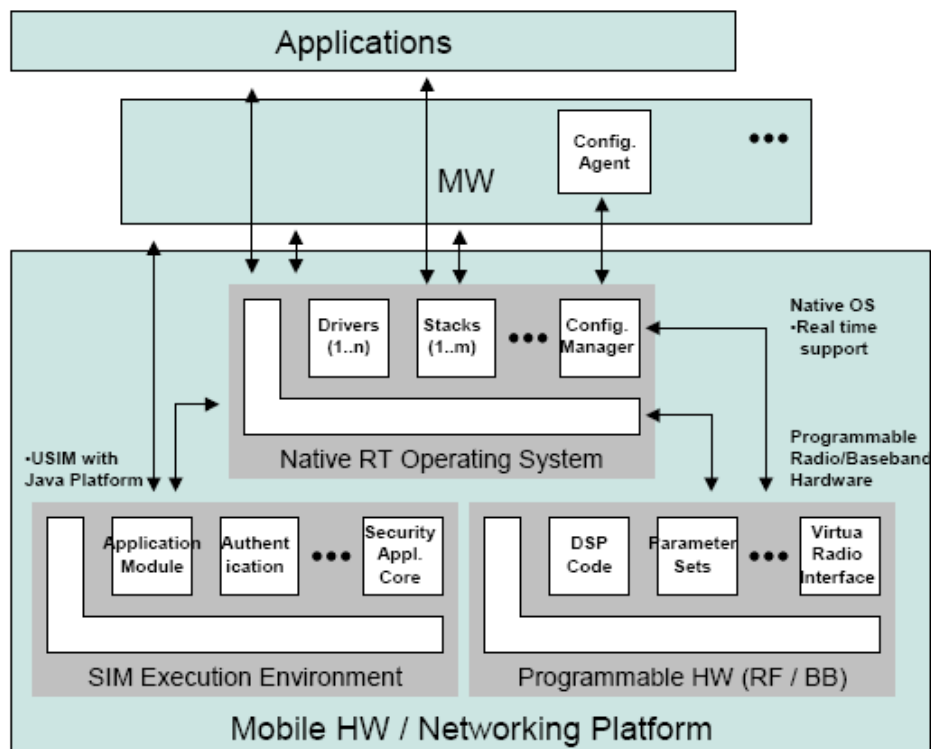
Παρόμοια με το στρώμα υλικολογισμικού, η αρχιτεκτονική για τη δικτύωση σε ένα κινητό δίκτυο παρουσιάζεται στην εικόνα 17. Υπάρχουν τρία προγραμματίσιμα και αναδιαμορφώσιμα συστατικά μέσα στο στρώμα:

- Μια πλατφόρμα υπολογισμού (*computing platform*) χρησιμεύει για την επεξεργασία των stateful πρωτοκόλλων, π.χ. δρομολόγηση, QoS σηματοδότηση ή διαχείριση σύνδεσης,

- Μια μηχανή αποστολής (*forwarding engine*) στην πορεία των δεδομένων ενός κόμβου δικτύου συνδέει τις διαφορετικές ενότητες διεπαφών (π.χ. μέσω μιας μήτρας μεταγωγών). Η μηχανή αποστολής είναι προγραμματίσιμη για εργασίες σχετικές με την απόδοση, οι οποίες εκτελούνται σε μια βάση ανά-πακέτο,
- Οι ενότητες διεπαφών (*interface modules*) εξαρτώνται από τα διαφορετικά ασύρματα ή όχι πρότυπα. Μπορούν να διαμορφωθούν ή να προγραμματιστούν για να προσαρμοστούν στα νέα φυσικά πρωτόκολλα στρώματος ή να δώσουν το έναυσμα σε γεγονότα σε υψηλότερα στρώματα.

Η εγκατάσταση των νέων συστατικών και η αναδιαμόρφωση της λειτουργίας μέσα σε αυτό το στρώμα μπορούν να εκτελεσθούν από μηχανισμούς διαχείρισης αναδιαμόρφωσης.

## B) Αρχιτεκτονική κινητού τερματικού



Εικόνα 18 : Αρχιτεκτονική κινητού τερματικού

Το δεύτερο μέρος μέσα στην πλατφόρμα δικτύωσης είναι ο κινητός εξοπλισμός (όπως απεικονίζεται παραπάνω στην εικόνα 18). Τα κύρια συστατικά μιας τελικής αρχιτεκτονικής μετά από το πρότυπο τεσσάρων στρώματος της εικόνας 14 περιλαμβάνουν:

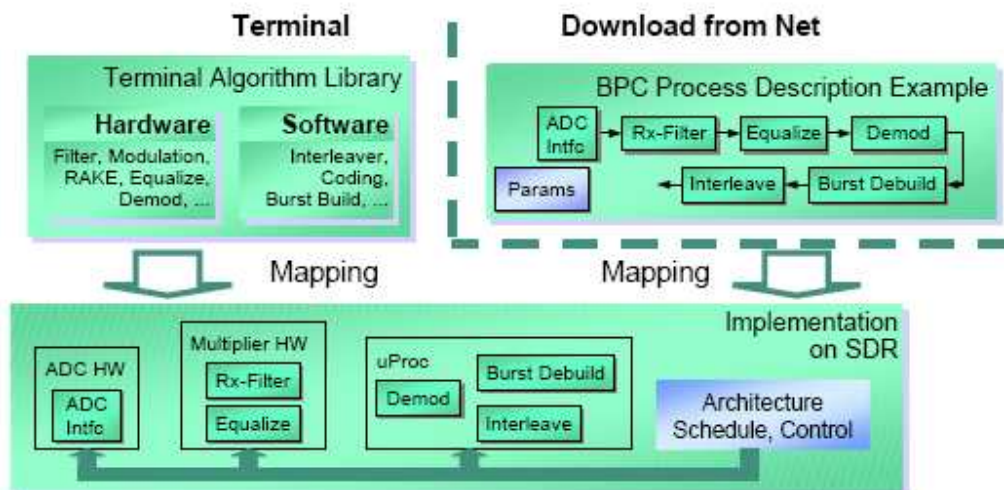
- Κάρτα SIM (*SIM card*), π.χ. USIM για το UMTS, η οποία περιλαμβάνει την ταυτότητα του συνδρομητή και επίσης ένα μικρό, αλλά ιδιαίτερα ασφαλές περιβάλλον εκτέλεσης,
- Προγραμματίσιμο υλικό (*Programmable hardware*), με σκοπό να εφαρμόσει οποιοδήποτε πιθανό RAT,
- Το εγγενές λειτουργικό σύστημα (*Native operating system*) που παρέχει την υποστήριξη πραγματικού χρόνου, που απαιτείται για ορισμένες κρίσιμες εφαρμογές, π.χ. κωδικοποιητές πολυμέσων.

Οι κύριες απαιτήσεις από ένα χειριστή και τους κατασκευαστές περιλαμβάνουν τα εξής:

- Ικανότητα επιβίωσης (*Survivability*), π.χ. «ευρωστία» στις λάθος διαμορφώσεις,
- Ασφάλεια του τελικού χρήστη, του χειριστή, και των απαιτήσεων κατασκευαστών.

### 2.3.2.4 Εγκατάσταση διαμόρφωσης radio

Οι περιγραφές για τους διάφορους αλγόριθμους σε μια ραδιοδιαμόρφωση πρέπει να είναι δομημένες κατά τρόπο ιεραρχικό και να παράγουν ένα ιδιαίτερα διαφανές σύστημα. Η αρχή μιας τέτοιας ιεραρχικά οργανωμένης δομής SW για τις ραδιοεφαρμογές παρουσιάζεται στην εικόνα 19, με την οποία το τερματικό μπορεί να αποθηκεύσει μια βιβλιοθήκη των βασικών αλγορίθμων, ή ακόμα και τις πλήρεις ραδιοδιαμορφώσεις, και να ξέρει τον τρόπο με τον οποίο θα εγκατασταθούν στην πλατφόρμα HW για την εφαρμογή του απαραίτητου RAT.



Εικόνα 19 : Ιεραρχική αρχιτεκτονική SDR

Η αρχή που απεικονίζεται στην εικόνα 19 είναι βασισμένη στην υπόθεση ότι ένα τερματικό αποτελείται από διάφορες κυψέλες επεξεργασίας (Baseband Processing Cell

(BPC) στην εικόνα 19), όπου κάθε μία από αυτές εφαρμόζει ένα module υψηλού επιπέδου (π.χ. BB/RF) μέσα στο τερματικό (βλ. εικόνα 6). Μια διαδικασία αναδιαμόρφωσης θα μπορούσε με αυτόν τον τρόπο να εμπεριέχει την ανταλλαγή λίγων παραμέτρων, απαιτώντας ένα πολύ μικρό download SW, ή μια πλήρη αναδιαμόρφωση τερματικού απαιτώντας τη μεταφόρτωση της πλήρους δομής SW για να εφαρμόσει το απαραίτητο RAT.

Η ιεραρχική περιγραφή μιας ραδιοδιαμόρφωσης συνδυάζει δύο πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι η αφαίρεση των σύνθετων αλγορίθμων και των σύνθετων δομών module SW, οι οποίοι περιγράφονται με ένα όνομα μόνο ενός module, και το δεύτερο είναι η πρόσβαση σε κάθε λεπτομέρεια μέσα στη σύνθετη δομή. Στη συνέχεια περιγράφονται τα γενικά και προσαρμοστικά πρωτόκολλα ως παράδειγμα για μια τέτοια ιεραρχικά οργανωμένη εφαρμογή.

## 2.4 Γενικά και προσαρμοσίμα πρωτόκολλα

Το Software Defined Radio επιτρέπει την ευέλικτη διαμόρφωση υλικού και λογισμικού μέσα σε ένα κινητό τερματικό για μια νέα ραδιοτεχνολογία πρόσβασης. Οι λειτουργίες που απαιτούνται διευκρινίζονται για τον στόχο RAT και το SDR είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση αυτών των λειτουργιών. Αυτό αυξάνει την απαίτηση ότι η πλατφόρμα υλικού και λογισμικού του τερματικού SDR πρέπει να διευκρινιστεί με έναν τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει την εκτέλεση όσων λειτουργιών απαιτηθούν.

Το SDR χαρακτηρίζεται έτσι στην παραμετροποίηση γενικών λειτουργιών στα RF και BB μέρη ενός κινητού πομποδέκτη έτσι ώστε να γίνονται συμβατοί σε μια συγκεκριμένη ραδιοτεχνολογία. Με παρόμοιο τρόπο τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται επάνω από το φυσικό στρώμα μπορούν να προσαρμοστούν σε αυτό το παράδειγμα και να ακολουθήσουν μια παρόμοια προσέγγιση με το να προσδιορίσουν τις γενικές λειτουργίες στα διαφορετικά στρώματα πρωτοκόλλου και να τις καταστήσουν διαμορφώσιμες από τα καθορισμένα σύνολα παραμέτρων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κάτι τέτοιο θα μείωνε το ποσό των δεδομένων που θα πρέπει να σταλούν στο κινητό τερματικό σε περίπτωση που ένα νέο δίκτυο πρόσβασης έρθει σε επαφή με το τερματικό προς διαμόρφωση. Επιπλέον, η παραμετροποίηση θα επιτάχυνε το download και τη διαδικασία αναδιαμόρφωσης καθώς και θα μπορούσε να διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης.

Επομένως, οι έρευνες πρέπει επίσης να ακολουθήσουν στη δομική σύνθεση ενός λογισμικού οδήγησης πρωτοκόλλου. Αυτό μπορεί να βασιστεί σε έναν χωρισμό του λογισμικού, σε «permanent resident code» και «down-loadable add-on modules». Με αυτόν τον τρόπο, το μόνιμα εδρεύον λογισμικό πρέπει να είναι όσο το δυνατόν γενικότερο, (δηλαδή generic software skeleton ή generic protocol stack). Χρησιμοποιώντας τους κοινούς πόρους, ο γενικός σκελετός μπορεί να υποστηρίξει την αποδοτικότητα και την ευελιξία συγχρόνως. Υποθέτοντας ότι οι συσκευές είναι εξοπλισμένες με έναν γενικό πυρήνα, η απαραίτητη αναδιαμόρφωση του λογισμικού μπορεί να κατεβεί 'έξυπνα' δεδομένου ότι μόνο η συγκεκριμένη λειτουργία πρέπει να συμπεριληφθεί. Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής μιας γενικής λίστας πρωτοκόλλου με έναν γενικό τρόπο, που ακολουθείται από ένα πιο συγκεκριμένο παράδειγμα ενός γενικού στρώματος συνδέσεων.

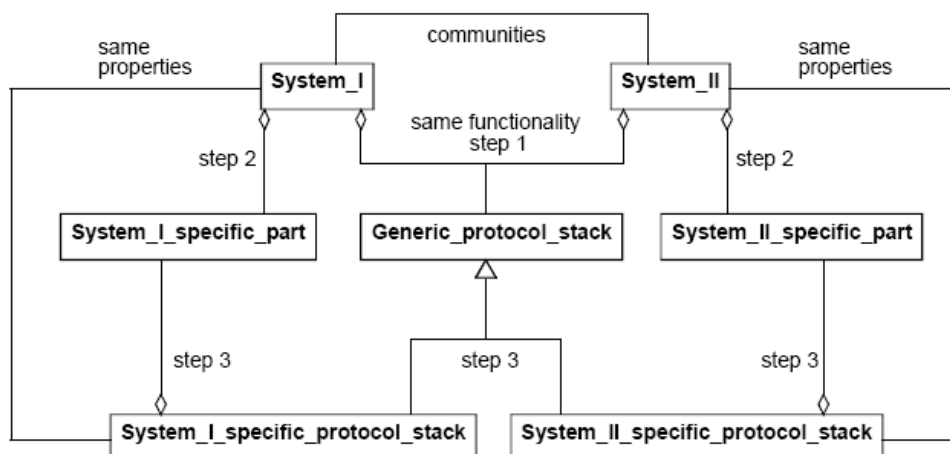
## 2.4.1 Ανάπτυξη γενικής στοίβας πρωτοκόλλου

Χρησιμοποιώντας το πρότυπο αναφοράς ISO/OSI στοίβας πρωτοκόλλου για να συγκρίνουμε τα διαφορετικά RATs, ένας υψηλός βαθμός ομοιότητας μπορεί να βρεθεί. Πολλά από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του λογισμικού ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν ως κοινοί πόροι. Επομένως μια ορισμένη διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού πρέπει να εφαρμοστεί, δηλαδή ο σχεδιασμός του γενικού και προσαρμοστικού λογισμικού πρωτοκόλλου (Design of Generic and Adaptive Protocol Software-DGAPS). Η εφαρμογή DGAPS οδηγεί σε μια γενική στοίβα πρωτοκόλλου που παρέχει μια κοινή βάση για αρκετά συστήματα. Η ειδίκευση με την εισαγωγή των τυποποιημένων λειτουργιών στη γενική στοίβα οδηγεί σταδιακά σε μια πραγματοποίηση προς μια πιο συγκεκριμένη και σαφή στοίβα πρωτοκόλλου.

Στο πρώτο βήμα (step1), δύο διαφορετικά συστήματα, για παράδειγμα σύστημα I και το σύστημα II, πρέπει να αναλυθούν στρώμα προς στρώμα για να προσδιοριστούν οι ομοιότητές τους. Ο αριθμός των διαφορετικών συστημάτων που εξετάζονται μπορεί να είναι δύο ή περισσότερα. Το αποτέλεσμα θα είναι μια προδιαγραφή ενός κοινού υποσυνόλου των στοιβών πρωτοκόλλου πρόσβασης για τα συστήματα. Δεδομένου ότι αυτή η στοίβα παρέχει τα κοινά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων προτύπων air-interface καλείται γενική στοίβα πρωτοκόλλου ή σκελετός πρωτοκόλλου.

Το επόμενο βήμα (step2 στην εικόνα 20) πρόκειται να αναπτύξει προδιαγραφές γύρω από τα δεδομένα πρότυπα air-interface, για παράδειγμα για το σύστημα I ή το σύστημα II. Αυτές περιλαμβάνουν λειτουργίες που είναι συγκεκριμένες για τα αντίστοιχα πρότυπα και αντιπροσωπεύουν έτσι τη μεμονωμένη συμπεριφορά ενός συστήματος.

Για να οδηγηθούμε σε ένα πρότυπο air-interface, πρέπει να συγχωνευθούν η γενική στοίβα πρωτοκόλλου και το συμπλήρωμα σχετικό με το πρωτόκολλο, (step3). Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του inheritance. Η εικόνα 20 παρουσιάζει τους συσχετισμούς και τις εξαρτήσεις των προαναφερθέντων μερών στο σχόλιο της UML. Προκειμένου να διακρίνουμε μια συγκεκριμένης στοίβα πρωτοκόλλου που είναι σχεδιασμένη είτε σύμφωνη με την ανωτέρω προσέγγιση είτε όχι, το σχόλιο System\_X (non-conformant) και System\_X\_specific\_protocol\_stack (conformant) χρησιμοποιούνται.





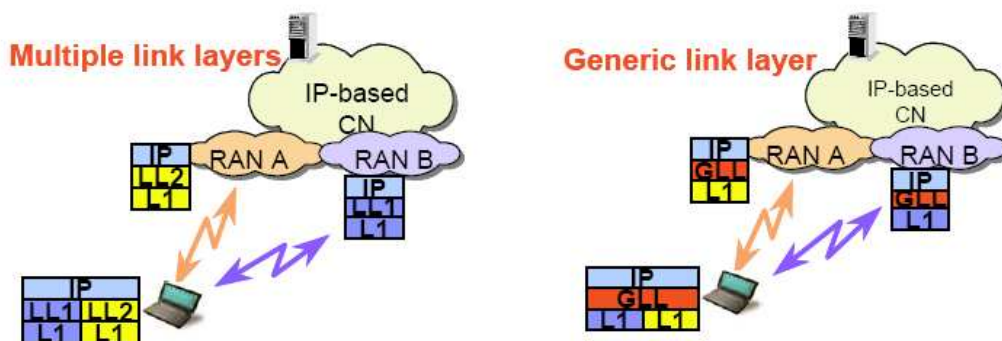
Εικόνα 20 : Αλληλεπίδραση στοιχείων μιας στοίβας πρωτοκόλλου SDR

## 2.4.2 Ορισμός αναδιαμορφώσιμου στρώματος σύνδεσης

Στην κινητές επικοινωνίες η ραδιοσύνδεση από άκρη σε άκρη (end-to-end) είναι δαπανηρή ή ακόμα και ανέφικτη να αυξήσει την ικανότητά της. Επομένως πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι διαθέσιμοι ραδιοπόροι με τον αποδοτικότερο τρόπο. Αυτός ο ρόλος εκτελείται από το φυσικό στρώμα και το στρώμα σύνδεσης, τα οποία βελτιστοποιούνται στην τεχνολογία πρόσβασης που χρησιμοποιείται. Στην εικόνα 21 (στην αριστερή πλευρά) δίνεται μια απλουστευμένη λίστα πρωτοκόλλου, στην οποία ένας αντίστοιχος κόμβος επικοινωνεί με ένα κινητό τερματικό. Η από άκρη σε άκρη σύνδεση καθιερώνεται π.χ. με το πρωτόκολλο (IP) Διαδικτύου. Το γενικό στρώμα σύνδεσης (εδώ αποκαλούμενο GLL) και το φυσικό στρώμα (PHY) επιτρέπουν τη μετάδοση όλων των δεδομένων πάνω στο radio-link.

Υποθέτοντας ότι η ραδιοσύνδεση είναι το φυσικό μέσο, τα περισσότερα δεδομένα που είναι αυτήν την περίοδο στο στάδιο της μετάδοσης από άκρη σε άκρη είτε περιμένουν σε ουρά είτε μέσα στο στρώμα σύνδεσης. Η παραπάνω προσέγγιση είναι ιδιαίτερα αποδοτική, εντούτοις, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στα πλαίσια των συνεργαζόμενων δικτύων, στα οποία η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω ενός πλήθους κινητών δικτύων, τα οποία μπορούν να επεκτείνουν τις διαφορετικές ραδιοτεχνολογίες πρόσβασης.

Αυτό το σενάριο απεικονίζεται στην εικόνα 21, όπου ένα κινητό τερματικό επιλέγει δυναμικά ένα από τα διαθέσιμα ραδιοδίκτυα πρόσβασης -Radio Access Network-(RAN A ή RAN B) κατά τη διάρκεια μιας συνόδου. Κάθε ραδιοδίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιεί το δικό του στρώμα σύνδεσης και το δικό του φυσικό στρώμα (αριστερή πλευρά της εικόνας 21). Κατά τη διάρκεια του handover (παράδοσης) μεταξύ των RAN A και RAN B, η ραδιοσύνδεση RAN A πέφτει και μια νέα ραδιοσύνδεση αρχίζει στο RAN B. Μια τέτοια παράδοση μπορεί να είναι χωρίς απώλειες μόνο εάν ένα περαιτέρω στρώμα της αποκατάστασης λάθους εφαρμόζεται, π.χ. απ' άκρη σ' άκρη πάνω από το IP.



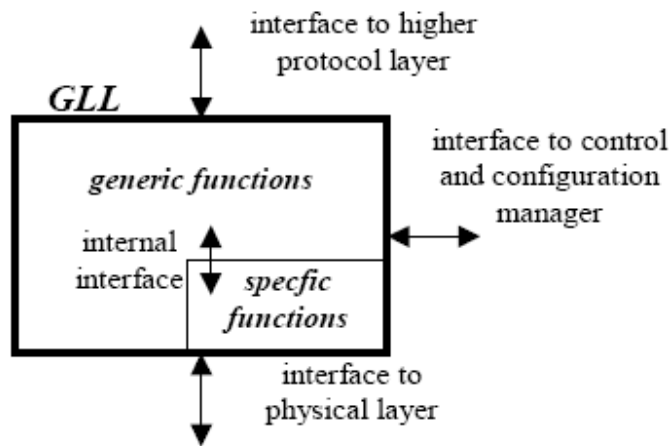
*Εικόνα 21 : Σενάριο πολλαπλού στρώματος σύνδεσης σε σύγκριση με το σενάριο γενικού στρώματος σύνδεσης (GLL – generic link layer, LL – link layer, LI – layer 1, RAN – radio access network, CN – core network)*

Δεδομένου ότι τα διαφορετικά στρώματα σύνδεσης έχουν γενικά την ίδια λειτουργία σε όλες τις ραδιοτεχνολογίες πρόσβασης, αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί εάν τα στρώματα σύνδεσης γίνουν συμβατά. Η παλιά κατάσταση του στρώματος σύνδεσης μπορεί να παραδώσει τον έλεγχο στο νέο στρώμα σύνδεσης, το οποίο συνεχίζει κανονικά τη μετάδοση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό ενός γενικού στρώματος συνδέσεων (generic link layer), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στρώμα σύνδεσης για όλες τις ραδιοσυνδέσεις (δεξιά πλευρά της εικόνας 21).

Το γενικό στρώμα σύνδεσης (GLL) είναι ένα πρωτόκολλο στρώματος, το οποίο παρέχει τις λειτουργίες στρώματος σύνδεσης που απαιτούνται σε κάθε στρώμα σύνδεσης. Μπορεί να διαμορφωθεί κατά τρόπο εύκαμπτο για να εκτελέσει αυτές τις λειτουργίες στρώματος σύνδεσης με έναν βελτιστοποιημένο τρόπο για τις διαφορετικές ραδιοτεχνολογίες πρόσβασης με διαφορετικές ιδιότητες. Οι γενικές προδιαγραφές των λειτουργιών του στρώματος σύνδεσης επιτρέπουν την αναδιαμόρφωση του GLL στο οποίο το υπάρχον πλαίσιο επικοινωνίας κατά τη διάρκεια την αναδιαμόρφωσης μετασχηματίζεται σε ένα νέο πλαίσιο μέσα στη νέα διαμόρφωση. Κατά συνέπεια η σύνοδος επικοινωνίας μπορεί να 'επιζήσει' της διαδικασίας αναδιαμόρφωσης χωρίς απώλειες.

Η έννοια του γενικού στρώματος σύνδεσης απαιτεί έναν επανασχηματισμό του GLL και στις δύο πλευρές της ασύρματης σύνδεσης, στο κινητό τερματικό καθώς επίσης και στο ραδιοκόμβο πρόσβασης. Για να εφαρμοστεί ένα GLL με βάση τα συγκεκριμένα interfaces και τα σημεία αναφοράς πρέπει να είναι καθοριστούν τα εξής (εικόνα 22):

- Η υψηλότερη διεπαφή στρώματος (higher layer interface): Μέσω της διεπαφής στο υψηλότερο στρώμα πρωτοκόλλου τα δεδομένα παραλαμβάνονται για μετάδοση και μεταφέρονται μετά από την αποδοχή. Αυτή η διεπαφή διαμορφώνει τις απαιτήσεις QoS για τη μετάδοση δεδομενογραμμμάτων υψηλότερου στρώματος,
- Η φυσική διεπαφή στρώματος (physical layer interface): Στη διεπαφή του φυσικού στρώματος στέλνονται radio-blocks στο φυσικό στρώμα για τη μετάδοση πάνω στο radiolink,
- Η διεπαφή ελέγχου (control interface): Μέσω της διεπαφής ελέγχου το γενικό στρώμα σύνδεσης διαμορφώνεται και μετατρέπεται,
- Η εσωτερική διεπαφή (internal interface) για την ενσωμάτωση συγκεκριμένων λειτουργιών: Μέσω αυτής της διεπαφής θα είναι δυνατό να περιληφθεί μια συγκεκριμένη λειτουργία, π.χ. ένας κρυπτογραφημένος αλγόριθμος.



Εικόνα 22 : Λειτουργίες και διεπαφές του γενικού στρώματος σύνδεσης GLL

## 2.5 Αρχιτεκτονική αναδιαμορφώσιμου Software radio

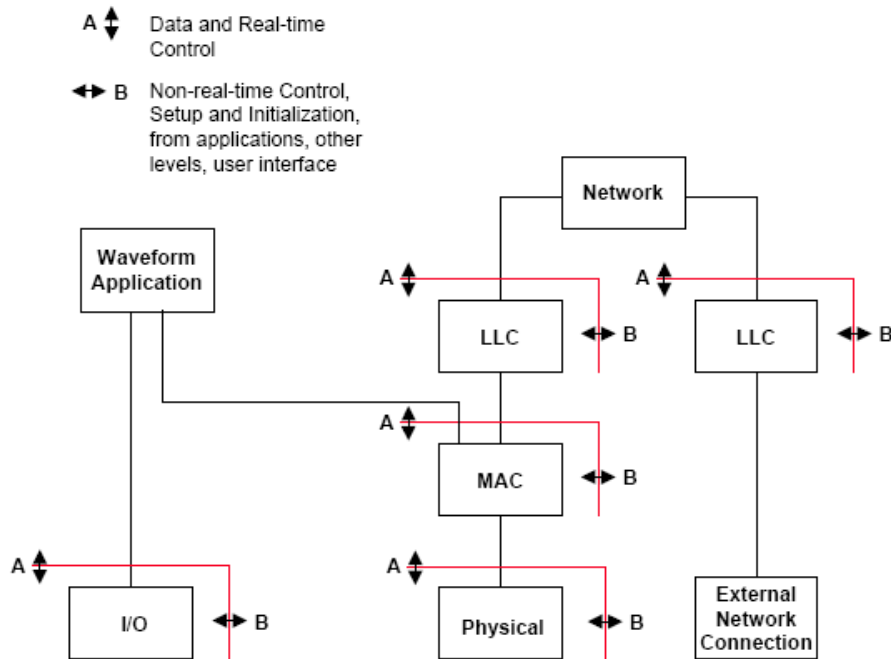
Η κυματομορφή ορίζεται ως εξής: «Είναι ένα πρωτόκολλο που καθορίζει τη μορφή του προς εκπομπή H/M σήματος». Η προτεινόμενη SRA (Software Radio Architecture) προσέγγιση είναι βασισμένη σε μια λογική διάσπασης της κυματομορφής και στη χρήση ενός Core Framework (CF). Η SRA συμβάλλει θετικά στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών στα στρώματα σε συμφωνία με το πρότυπο του ISO/OSI:

- Η κυματομορφή πρέπει να χωριστεί σε 3 κομμάτια : το φυσικό, το LLC και το MAC όπου το καθένα έχει ένα υποστρώμα,
- Η δικτυακή εφαρμογή πρέπει να εφαρμοστεί ως τμήμα OSI δικτύου.

Αυτό το πρότυπο επιτρέπει την υλοποίηση των διάφορων προτύπων αναφοράς βασικής ζώνης που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 23, η SRA προσδιορίζει δύο είδη εσωτερικών διεπαφών:

- Ο τύπος A είναι διεπαφές (hard) real-time constrained,
- Ο τύπος B είναι διεπαφές statistical (soft) real-time.

Οι προδιαγραφές SRA προσδιορίζουν το αντίστοιχο API για κάθε στρώμα. Κάποιες κυματομορφές έχουν εφαρμοστεί από τις βιομηχανίες όσον αφορά αυτό το πρότυπο, στο φάσμα HF και VHF. Σημαντική πρόκληση αυτού του προτύπου είναι να σχεδιαστεί το στρώμα όσον αφορά το πρότυπο, κυρίως για την επεξεργασία δεδομένων και ελέγχου.



Εικόνα 23 : Μοντέλο στοιχείου κυματομορφής

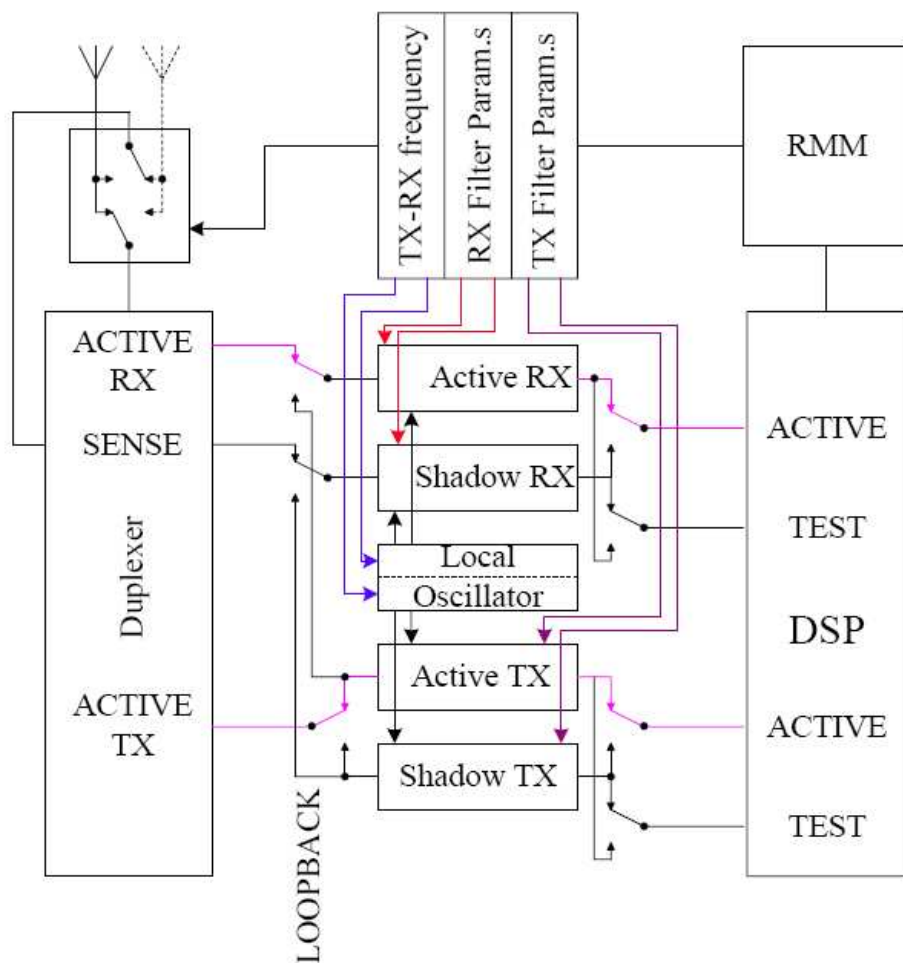
## 2.5.1 Μοντέλα και αρχιτεκτονικές βασικής ζώνης SDR

Η αρχιτεκτονική βασικής ζώνης του αναδιαμορφώσιμου εξοπλισμού SDR πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι η δυνατή η ολική αλλά και η μερική αναδιαμόρφωση. Σε περίπτωση μεταγωγής από μια ραδιοτεχνολογία πρόσβασης σε μια άλλη απαιτείται συνολική αναδιαμόρφωση, με αποτέλεσμα να χρειάζονται σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία, τη συμπεριφορά, και τις διεπαφές των modules βασικής ζώνης. Η μερική αναδιαμόρφωση εκτελείται εάν μόνο οι παραμέτρους μιας ή περισσότερων ενότητων βασικής ζώνης πρέπει να αλλάξουν χωρίς αλλαγή των προτύπων air-interface. Ορισμένα modules, παραδείγματος χάριν, μπορούν να μετατραπούν προκειμένου να βελτιωθεί η βελτίωση της υπηρεσίας QoS ενώ συγχρόνως παραμένει στα τρέχοντα λειτουργούντα πρότυπα.

Εάν η βασική ζώνη αναδιαμορφωθεί χωρίς διακοπή της τρέχουσας υπηρεσίας, ένας δεύτερος αποκαλούμενος πομποδέκτης σκιών (shadow transceiver) πρέπει να προστεθεί στην αρχιτεκτονική βασικής ζώνης. Ο πομποδέκτης shadow παρουσιάζεται στην εικόνα 24. Εντούτοις, δεδομένου ότι το κόστος και η πολυπλοκότητα της απαραίτητης πλατφόρμας υλικού αυξάνονται σημαντικά, οι εναλλακτικές αλλά λιγότερο ευέλικτες λύσεις πρέπει να ερευνηθούν. Για παράδειγμα, μπορεί να αποφευχθεί ο διπλασιασμός των modules με το σχεδιασμό των γενικευμένων modules που θα μπορούν να αλλάξουν τη λειτουργούσα παράμετρό τους κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης. Αυτή η τεχνικά εφικτή προσέγγιση απαιτεί έναν πίνακα αναδιαμόρφωσης, που απαριθμεί

όλες τα modules και τις απαιτήσεις παραμέτρων τους για όλα τα πρότυπα που υποστηρίζονται από το SDR.

Η αρχιτεκτονική βασικής ζώνης του αναδιαμορφώσιμου εξοπλισμού SDR πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε μπορεί να εκτελέσει τα σημερινά και αυριανά ασύρματα σχέδια πρόσβασης σε μια μελλοντική πλατφόρμα υλικού και να μπορεί να ενσωματωθεί σε μια γενική αρχιτεκτονική συστημάτων που θα επιτρέπει να αναδιαμορφωθεί η πλατφόρμα με την εκτέλεση ενός προγράμματος. Αυτοί οι αντίθετοι στόχοι σχεδίασης εισάγουν δύο πρότυπα αρχιτεκτονικής βασικής ζώνης, όπου το ένα θα δίνει έμφαση σε ζητήματα software και το άλλο σε ζητήματα hardware. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δύο αυτές γενικές αρχιτεκτονικές πρέπει να συμπληρώνουν η μια την άλλη και δεν πρέπει να είναι αντιφατικές.



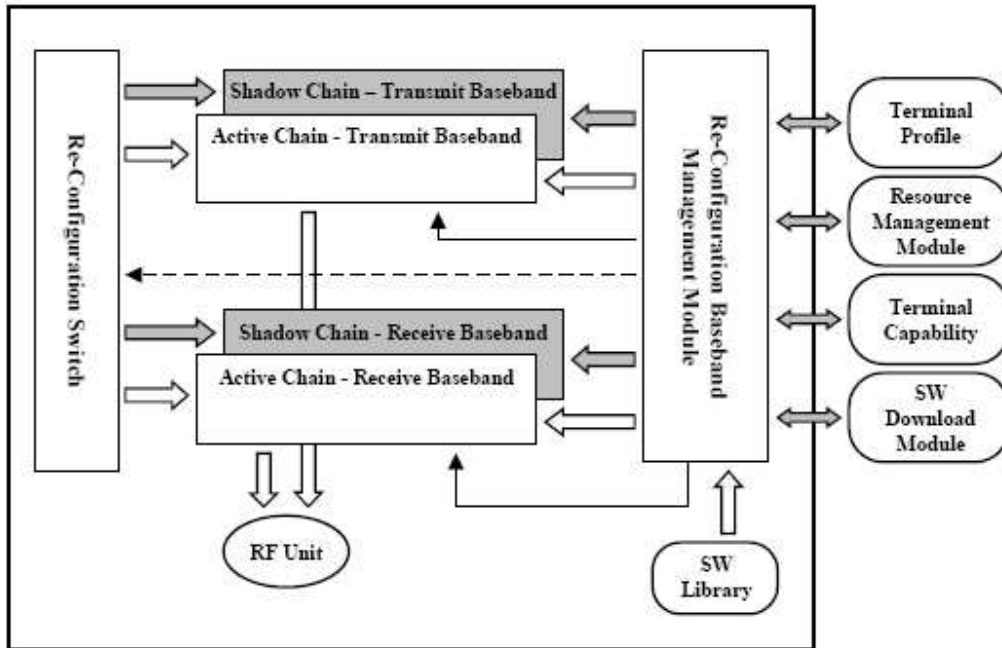
Εικόνα 24 : Μπλοκ διάγραμμα ενός Shadow Chain Transceiver

#### A) Αρχιτεκτονική software αναδιαμορφώσιμης βασικής ζώνης

Μια γενική αρχιτεκτονική λογισμικού για μια αναδιαμορφώσιμη βασική ζώνη μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα γενικό σύστημα και μια αρχιτεκτονική δικτύου που θα μπορούν να υποστηρίξουν και να εκμεταλλευτούν τον εξοπλισμό SDR. Περιλαμβάνει ένα module διαχείρισης βασικής ζώνης που ελέγχει τη διαμόρφωση της βασικής ζώνης. Η αρχιτεκτονική του λογισμικού της αναδιαμορφώσιμη βασικής ζώνης είναι βασισμένη στην αντικειμενοστρεφή μεθοδολογία και κάθε module της αλυσίδας πομποδεκτών βασικής ζώνης είναι αναδιαμορφώσιμο.

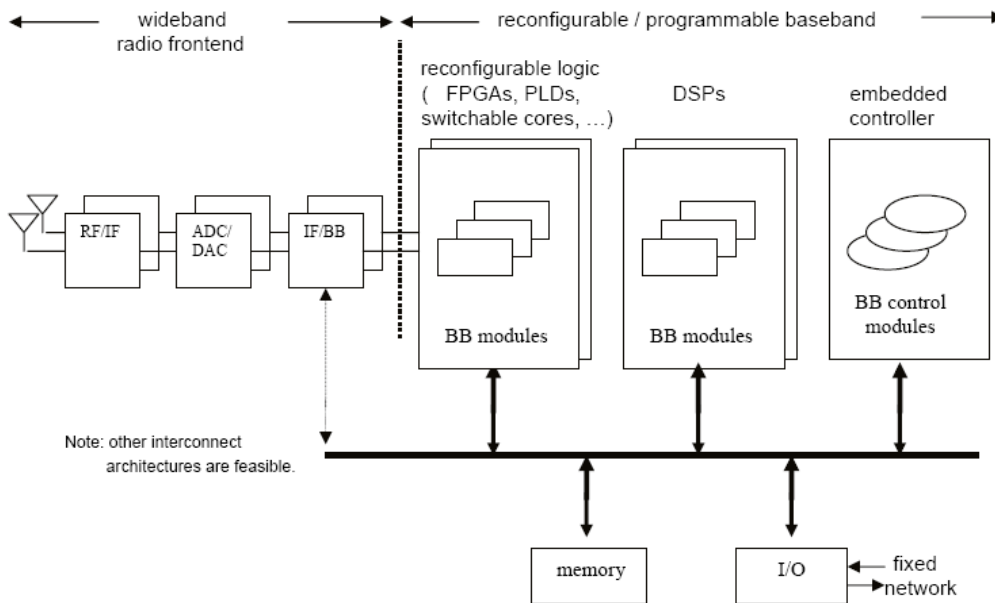
Η εικόνα 25 επεξηγεί τη αναδιαμορφώσιμη αρχιτεκτονική βασικής ζώνης, η οποία αποτελείται από τα ακόλουθα:

- **Re-Configurable Baseband Management Module (R-BBMM):** γενικός ελεγκτής του υποσυστήματος R-BB. Είναι αρμόδιο για τη διαπραγμάτευση του επανασηματισμού, της δημιουργίας ενεργών πομποδεκτών αλυσίδων, και τον έλεγχο του χρόνου εκτέλεσης κάθε module,
- **Active Baseband Transceiver Chain:** Κάθε αλυσίδα αποτελείται από διάφορα modules, και κάθε module αναφέρεται ως κύτταρο επεξεργασίας βασικής ζώνης (Baseband Processing Cell-BPC),
- **Shadow Baseband Transceiver Chain:** Περιέχει τις αναφορές των BPCs που κρατούνται αμετάβλητες από την ενεργό αλυσίδα, και ένα ή περισσότερα νέα BPCs.
- **Baseband Software Library:** Περιέχει τους ενεργούς και τους κρυφούς 'χάρτες' διαμόρφωσης, που αντιστοιχούν στις αλυσίδες ενεργών και κρυφών πομποδεκτών. Ένας χάρτης διαμόρφωσης είναι ένας κατάλογος από modules βασικής ζώνης (τύπος, λειτουργία, αλγοριθμική ταυτότητα...) και τις διασυνδέσεις των διεπαφών. Η βιβλιοθήκη αποθηκεύει επίσης όλες τις classes των module βασικής ζώνης που είναι αυτήν την περίοδο σε χρήση και εκείνων που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως,
- Ένας προεπιλεγμένος (μόνο για ανάγνωση) χάρτης διαμόρφωσης μαζί με όλους τα module classes και τους καταλόγους παραμέτρων. Αυτό θα επέτρεπε στη βασική ζώνη να αναδιαμορφωθεί προς ένα γνωστό πρότυπο που είναι συμβατό με το προφίλ του χρήστη,
- Ένα πλήρες αντίγραφο της προηγούμενης διαμόρφωσης. Αυτό πρέπει να περιλάβει το χάρτη διαμόρφωσης, τις σχετικές με τη βασική ζώνη κλάσεις, τους καταλόγους παραμέτρων, τα λειτουργούντα πρότυπα... Μια τέτοια αποθήκευση θα επέτρεπε στο τερματικό να επιστρέψει πίσω σε μια διαμόρφωση βασικής ζώνης, χωρίς να κάνει επανεκκίνηση,
- **Μεταγωγέας αναδιαμόρφωσης:** κλασσικός μεταγωγέας ON/OFF. Εφαρμόζει το σήμα ON/OFF από το R-BBMM, προκειμένου να ενεργοποιηθεί η κρυφή αλυσίδα (shadow chain) και να απενεργοποιηθεί η ενεργός αλυσίδα (active chain).



Εικόνα 25 : Αρχιτεκτονική software αναδιαμορφώσιμης βασικής ζώνης

### B) Αρχιτεκτονική hardware αναδιαμορφώσιμης βασικής ζώνης



*Εικόνα 26 : Αρχιτεκτονική hardware αναδιαμορφώσιμης βασικής ζώνης*

Η εικόνα 26 παρουσιάζει μια αρχιτεκτονική hardware βασικής ζώνης για ένα software-defined radio που μπορεί να εφαρμοστεί στο σχέδιο των τερματικών χρηστών και των σταθμών βάσης για τα συστήματα κινητής επικοινωνίας πέρα από 3G. Αυτή η αρχιτεκτονική καλύπτει τουλάχιστον αρκετά από την πλατφόρμα υλικού που είναι διαθέσιμη σήμερα στην αγορά.

Το σήμα που παραλαμβάνεται στην κεραία υποβάλλεται σε επεξεργασία αρχικά με ένα ευρυζωνικό σήμα front end προτού πάει στην μονάδα ψηφιακή βασικής ζώνης επεξεργασίας σήματος (BB). Το σήμα κατω-μετατρέπεται (down-converted) με έναν αναλογικό μίκτη σε μια ενδιάμεση ζώνη συχνότητας (IF), που δειγματοληπτείται από έναν A/D μετατροπέα ευρείας ζώνης, υψηλής ανάλυσης, και συνεχίζει προς το digital radio-frontend.

Αυτός το ψηφιακό και αναδιαμορφώσιμο module του BB επιλέγει τη συχνότητα που θέλουμε (channelization). Επίσης, εξάγει από το λαμβανόμενο σήμα τα κανάλια ενός ή περισσοτέρων χρηστών για περαιτέρω επεξεργασία στη βασική ζώνη και εφαρμόζει διαδικασίες επεξεργασίας σήματος όπως το φιλτράρισμα και η κάτω-μετατροπή. Ανάλογα με το είδος της πρόσβασης και τα επιλεγμένα κανάλια χρηστών, διαφορετικά χαρακτηριστικά και παράμετροι συχνότητας καναλιών πρέπει να εφαρμοστούν.

Οι περισσότερες από τις λειτουργίες επεξεργασίας σήματος βασικής ζώνης των διάφορων ασύρματων πλάνων πρόσβασης εκτελούνται ως ανεξάρτητα modules BB είτε σε αναδιαμορφώσιμους επεξεργαστές είτε σε ψηφιακούς (digital signal processors-DSPs). Τα απαραίτητα modules επεξεργασίας σήματος και οι παράμετροι διαμόρφωσής τους δίνονται από το επιλεγμένο ασύρματο πλάνο πρόσβασης.

Πρέπει να καθορίσουμε τα modules για κάθε πλάνο, να προσδιορίσουμε τις ομοιότητες στις διαφορετικές λειτουργίες, και να προσπαθήσουμε να χρησιμοποιήσουμε κοινές αναδιαμορφώσιμες συσκευές ή DSP για να τα εφαρμόσουμε. Αυτός είναι ένας δύσκολος στόχος εξετάζοντας την διαφορετική φύση των διαφορετικών λειτουργιών επεξεργασίας σήματος των ανωτέρω πλάνων πρόσβασης καθώς επίσης και του ευρέος φάσματος των περιληφθεισών ραδιοδιεπαφών.

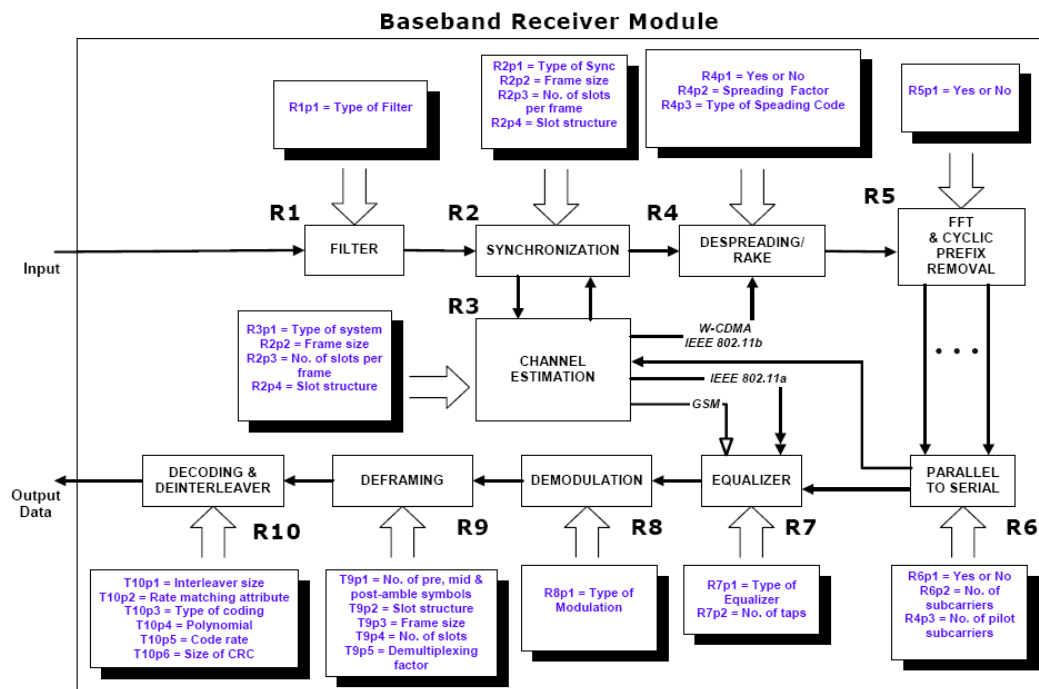
Συγχρόνως θα ήταν προτιμητέο να κατασταθούν οι ενότητες λογισμικού ανεξάρτητες από την πλατφόρμα υλικού. Αυτό θα επέτρεπε την αναβάθμιση της πλατφόρμας υλικού χωρίς μεταβαλλόμενες ενότητες λογισμικού. Μια απαίτηση θα ήταν να ελαχιστοποιηθούν τα δεδομένα αναδιαμόρφωσης που μεταφορτώνονται και περιορίζουν τη συνολική μνήμη.

Αυτή η πλατφόρμα υλικού πρέπει να είναι εν μέρει αναδιαμορφώσιμη καθώς κάποιο μέρος της εκτελεί διάφορες λειτουργίες. Μια ιδανική λύση θα ήταν ένας συνδυασμός από ανεξάρτητες ενότητες υλικού (hardware modules) και ανεξάρτητων του hardware ενότητες λογισμικού που συνδέονται από ένα process control module. Επίσης, τα BB control modules πρέπει να εφαρμόζονται ως ανεξάρτητες διαδικασίες σε ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου (RTOS) σε έναν ενσωματωμένο ελεγκτή. Η μια διαδικασία θα είναι αρμόδια για την επιλογή των απαραίτητων modules BB σύμφωνα με τα επιλεγμένα πρότυπα, τη διαμόρφωση των παραμέτρων των modules, και τον καθορισμό της σειράς εκτέλεσής τους. Οι εκτελέσιμοι κώδικες DSP για την εφαρμογή των modules BB αποθηκεύονται στις συσκευές μνήμης. Μπορούν να μεταφορτωθούν στη μνήμη πέρα από το σταθερό δίκτυο ή over-the-air (OTA) προτού να αρχίσει η

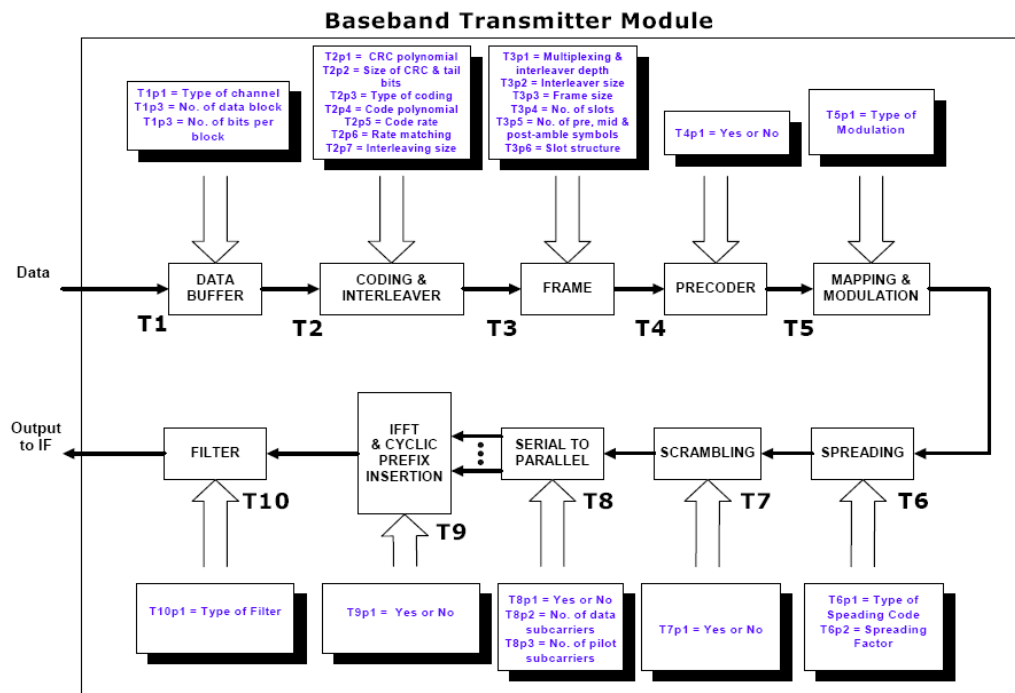


λειτουργία πομποδεκτών βασικής ζώνης. Οι αναδιαμορφώσιμες λογικές συσκευές, οι DSPs, ο ενσωματωμένος ελεγκτής, η μνήμη, και οι εξωτερικές I/O συσκευές επικοινωνούν μέσω ενός τοπικού διαύλου συστημάτων, που επιτρέπει την παράλληλη εφαρμογή των λειτουργιών επεξεργασίας σήματος βασικής ζώνης για πολλούς ραδιοπομποδέκτες.

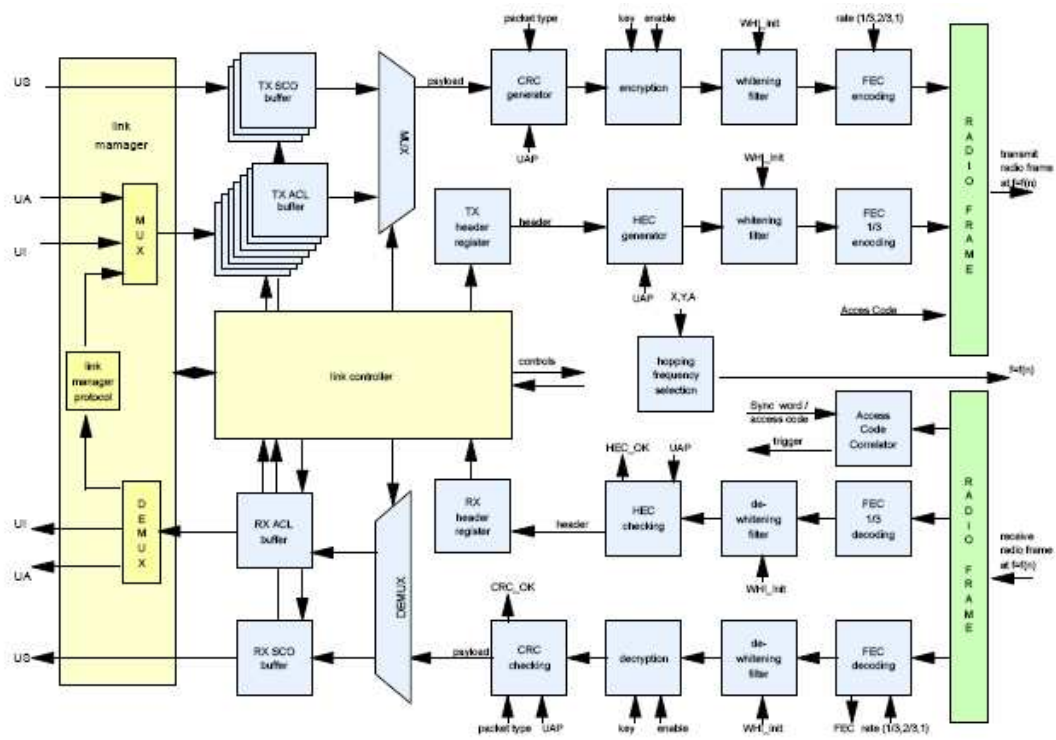
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μπλοκ διαγράμματα δέκτη και πομπού BB module, και ο πομποδέκτης βασικής ζώνης για Bluetooth:



Εικόνα 27 : Δέκτης BB module



Εικόνα 28 : Πομπός BB module



Εικόνα 29 : Πομποδέκτης βασικής ζώνης για Bluetooth

## 2.6 Η τεχνολογία Software Radio

Αποτελεί γενικώς αποδεκτή εκτίμηση ότι στο μέλλον η αγορά στον τομέα των τηλεπικοινωνιών αλλά και των συσκευών κινητών σταθμών θα είναι πλουραλιστική και ετερογενής και όπως συνέβη στο παρελθόν, δεν αναμένεται να κυριαρχήσει καθολικά κάποιο πρότυπο. Η μεταβαλλόμενη με γρήγορους ρυθμούς γενικότερη αγορά τηλεπικοινωνιών αντικατοπτρίζει τον εξίσου δυναμικό χώρο της ανάπτυξης προτύπων. Διαφορετικοί operators αναπτύσσουν διαφορετικά πρότυπα ανά τον κόσμο κινούμενοι με γνώμονα το εμπορικό κέρδος υπό καθεστώς σφοδρού ανταγωνισμού και στοχεύοντας στην εκμετάλλευση της αγοράς, πράγμα που έρχεται σε αντίθεση με την τάση των κατασκευαστών συσκευών αλλά και των χρηστών για ενοποίηση της αγοράς. Η κυρίαρχη πρόβλεψη για το μέλλον υποστηρίζει ότι οι απαιτήσεις του χρήστη τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών δεν θα μπορούν να καλυφθούν από τερματικές συσκευές οι οποίες θα μπορούν να υποστηρίξουν ένα υποσύνολο μόνον από υπηρεσίες ενός ή κάποιων από τα υπάρχοντα δίκτυα. Η πρόβλεψη αυτή ενισχύεται από την ενδεχόμενη μείωση του κόστους για τους κατασκευαστές, την οποία θα είχε ως αποτέλεσμα η χρήση μιας κοινής hardware πλατφόρμας.

Εξετάζοντας τα κυρίαρχα πρότυπα αλλά και αυτά που ολοένα κερδίζουν μερίδιο στην αγορά των τηλεπικοινωνιών, παρατηρούμε ότι βασίζονται σε έναν περιορισμένο αριθμό από κεντρικές ιδέες και αρχές που σκοπό έχουν την βελτιστοποίηση του διαμοιρασμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης συχνοτήτων μεταξύ των χρηστών. Κυρίαρχες αρχές αποτελούν οι TDMA (Time Division Multiple Access), FDMA (Frequency Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) αλλά και κάποιοι συνδυασμοί τους. Εντούτοις, τα διαφορετικά standards διαφοροποιούνται μεταξύ τους σε πληθώρα αρχών και τεχνικών που χρησιμοποιούν σε διάφορα επιμέρους τμήματά τους όπως είναι ο τύπος της διαμόρφωσης, η κωδικοποίηση φωνής, καναλιού, η μορφή της εκπομπής των κεραιών που χρησιμοποιούνται (beam-forming), οι τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών κ.α.. Ο συνδυασμός που προκύπτει από την επίγνωση των διαφορών που υφίστανται μεταξύ των προτύπων αλλά και από την αυξανόμενη τάση και ζήτηση τερματικών συσκευών ικανών να υποστηρίξουν πλειάδα υπηρεσιών (και προτύπων) στην οποία οδηγείται η αγορά των τηλεπικοινωνιών, είχε ως αποτέλεσμα την εισαγωγή νέων τεχνολογιών για ανάπτυξη προγραμματιζόμενων και παραμετροποιήσιμων μέσω λογισμικού τερματικών συσκευών των λεγόμενων συσκευών τεχνολογίας Software Radio. Η τεχνολογία του Software Radio βασίζεται στη χρήση πλατφόρμας υλικού γενικού σκοπού ικανή να ανταπεξέλθει στις μέγιστες απαιτήσεις που μπορεί να έχει κάποιο τηλεπικοινωνιακό πρότυπο και στον επαναπρογραμματισμό της έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών όσον αφορά τις παρεχόμενες σε αυτούς υπηρεσίες αλλά και πρότυπα.

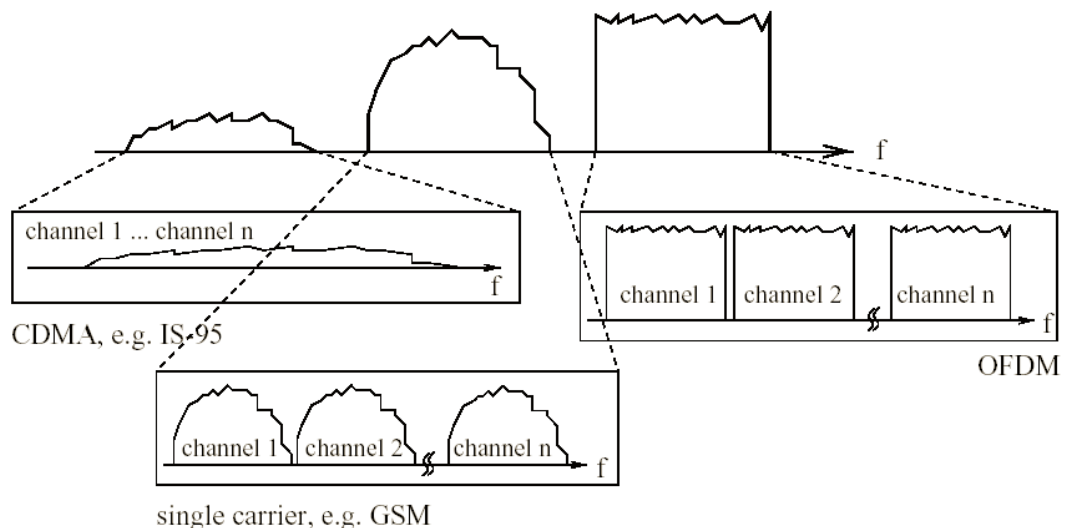
Δείχνει πιθανότερο η ενοποίηση της αγοράς κινητών επικοινωνιών να λάβει χώρα στην πλευρά του χρήστη και όχι στην πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά η ιστορία δείχνει ότι οι παροχείς υπηρεσιών του δικτύου έχουν την τάση να αντιδρούν ταχύτατα σε αλλαγές στην συμπεριφορά, στις προτιμήσεις των χρηστών ή στις τεχνολογικές αλλαγές, γεγονός που εξηγεί την προσπάθεια ανάπτυξης software programmable σταθμών βάσης για δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Τα προβλήματα που καλείται να λύσει η καινούρια τεχνολογία του Software Radio σχετίζονται περισσότερο με το υλικό πάνω στο οποίο θα

τρέχει το λογισμικό και λιγότερο με το λογισμικό καθεαυτό όπως παραπλανητικά ίσως παραπέμπει ο όρος “Software Radio”. Το υποκείμενο υλικό θα πρέπει να ανταπεξέλθει στις διαφορετικές απαιτήσεις που εγείρουν τα υπάρχοντα αλλά και τα μελλοντικά πρότυπα κινητής τηλεπικοινωνίας.

Στην συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των καινούριων ιδεών που καθιστούν πραγματοποιήσιμη την τεχνολογία του Software Radio. Αναλύονται οι πτυχές των υποψήφιων πρότυπων που αφορούν την υλοποίησή τους με τη νέα τεχνολογία και ερευνώνται οι κρισιμότερες από τις λειτουργίες τους. Διερευνώνται οι διάφορες αρχιτεκτονικές που μπορεί να έχει ένας δέκτης καθώς επίσης και η εφαρμοσιμότητα της κάθε μιας.

### 2.6.1 Τα χαρακτηριστικά του σήματος

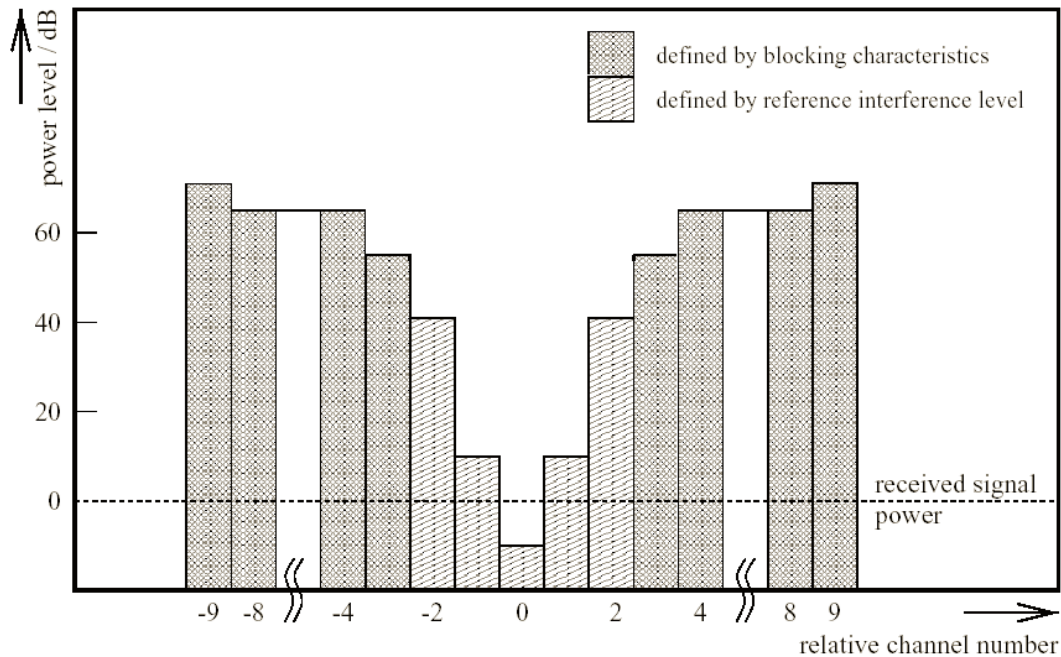
Το τηλεπικοινωνιακό σήμα της κινητής επίγειας επικοινωνίας χαρακτηρίζεται από παραμέτρους όπως το δυναμικό του εύρος (dynamic range) το οποίο καθορίζεται από την παρεμβολή στην οποία υπόκειται στο σήμα και από τις στοχαστικές του ιδιότητες. Μιλώντας γενικά, ένα τηλεπικοινωνιακό σήμα μπορεί να αποτελείται από εύρος συχνοτήτων πολλών MHz τα οποία μπορεί να είναι συνεχόμενα ή και διακεκομμένα και στο οποίο κάθε υπηρεσία προς τον χρήστη αντιστοιχεί στην μπάντα συχνοτήτων κάποιου πρότυπου η οποία μπορεί να αποτελεί ένα μικρό μόλις κλάσμα του συνολικού φάσματος του σήματος, το οποίο χρησιμοποιεί ο πάροχος της υπηρεσίας. Η παρακάτω κατάσταση περιγράφεται στην εικόνα 30. Οι ζώνες συχνοτήτων στις οποίες λειτουργούν τα διάφορα πρότυπα μπορεί να είναι συνεχόμενες ή απομακρυσμένες μεταξύ τους. Κάθε τέτοια ζώνη χωρίζεται συνήθως σε κανάλια τα οποία – ένα κάθε φορά ή και περισσότερα - αφιερώνονται για την επικοινωνία με τους χρήστες, παρέχοντάς τους υπηρεσίες.



Εικόνα 30 : Πρότυπα και υπηρεσίες στο πεδίο της συχνότητας

### 2.6.1.1 Παρεμβολή

Τα χαρακτηριστικά της παρεμβολής είναι διαφορετικά μεταξύ των διαφόρων προτύπων. Για παράδειγμα, στα πρότυπα εξάπλωσης φάσματος κάθε κανάλι καταλαμβάνει το συνολικό εύρος συχνοτήτων του συστήματος πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει σε αυτήν την οικογένεια προτύπων παρεμβολή γειτονικού καναλιού, τουλάχιστον όχι με την έννοια με την οποία αυτό το είδος παρεμβολής υφίσταται σε άλλα πρότυπα όπως το FDMA. Σε αντίθεση με τα συστήματα διαίρεσης συχνότητας, στα συστήματα εξάπλωσης φάσματος όλα τα σήματα του συστήματος συνυπάρχουν στο ίδιο συχνοτικό εύρος και το καθένα έχει τον δικό του βαθμό συμμετοχής στο επίπεδο της παρεμβολής που υπάρχει στο σύστημα. Το παραπάνω βέβαια δεν αποκλείει την παρεμβολή από σήματα προερχόμενα από γειτονικές μπάντες συχνοτήτων. Η φιλοσοφία των συστημάτων FDMA είναι πολύ διαφορετική. Στα συστήματα αυτά ορίζονται διαδοχικά κανάλια στο πεδίο της συχνότητας εντός των ορίων των οποίων διεξάγεται η επικοινωνία. Ο δέκτης πρέπει να επιτύχει τη σωστή λήψη του καναλιού που επιθυμεί, πράγμα που γίνεται με την εξασθένιση των γειτονικών συχνοτήτων με χρήση κατάλληλων φίλτρων και την ενίσχυση του επιθυμητού καναλιού συχνότητας. Όσον αφορά την τεχνολογία του Software Radio και την περίπτωση της wideband υλοποίησης FDMA τεχνολογιών, ο στόχος είναι να γίνεται ταυτόχρονη λήψη και επεξεργασία πολλών καναλιών. Το δυναμικό εύρος ενός τέτοιου πολυκαναλικού σήματος καθορίζεται από την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ εκπομπής (reference sensitivity level) που προδιαγράφεται από το πρότυπο και από τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα ισχύος των γειτονικών φορέων παρεμβολής (interference blocking characteristics). Τα παραπάνω επίπεδα για το σύστημα GSM παρουσιάζονται στην εικόνα 31. Από την εικόνα προκύπτει ότι το δυναμικό εύρος του σήματος GSM όπως λαμβάνεται από έναν wide-band δέκτη εύρους 4MHz στην εικόνα είναι μεγαλύτερο από 70dB που ισοδυναμεί με ισχύ σήματος 10,000,000 φορές ασθενέστερη από την ισχύ της παρεμβολής. Είναι προφανές ότι η κατασκευή οποιουδήποτε wideband Software Radio τερματικού σταθμού θα πρέπει να είναι ικανή να λάβει σωστά ένα FDMA σήμα όπως το παραπάνω. Οι απαιτήσεις που εγείρονται και οι οποίες αφορούν το υποκείμενο υλικό είναι σημαντικές και υφίστανται για όλα τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν διαίρεση συχνότητας ως τεχνική πρόσβασης.



Εικόνα 31 : Χαρακτηριστικά σήματος και σήματος παρεμβολής στο GSM

## 2.6.2 Η αρχιτεκτονική του δέκτη

Στο ξεκίνημα των ασύρματων επικοινωνιών οι δέκτες που κατασκευάζονταν ήταν δέκτες αρχιτεκτονικής άμεσης μετατροπής (direct conversion receivers). Το όνομα της αρχιτεκτονικής αυτής προέκυψε αργότερα σε σύγκριση με διαφορετικές αρχιτεκτονικές δεκτών, είναι όμως χαρακτηριστικό της ευθείας προσέγγισης του προβλήματος της λήψης την οποία υλοποιεί η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική. Η αμεσότητα στην προσέγγιση συνίσταται στην μετατροπή του σήματος λήψης σε σήμα βασικής ζώνης με τον πιο απλό και προφανή τρόπο. Η υλοποίηση λαμβάνει χώρα στον ελάχιστο αριθμό σταδίων τα οποία είναι δύο: το στάδιο της αποκοπής των ανεπιθύμητων συχνοτήτων το οποίο υλοποιείται με την βοήθεια διατάξεων φίλτρων και το στάδιο της μετατροπής του σήματος από ζωνοπερατό σε σήμα βασικής ζώνης. Οι δέκτες αρχιτεκτονικής άμεσης μετατροπής είναι απλοί, μικροί σε διαστάσεις και έχουν μικρή κατανάλωση ισχύος. Αν και η αρχιτεκτονική αυτή παρουσιάζεται να ταιριάζει στα χαρακτηριστικά του υλικού που θα απαιτούσαν τεχνολογίες όπως το SDR, εντούτοις παρουσιάζει το δυσεπίλυτο πρόβλημα της παρουσίας συνεχούς συνιστώσας στο σήμα βασικής ζώνης. Το πρόβλημα συνίσταται στο ότι η συνεχής συνιστώσα ισχύος μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές και η ισχύς της δεν είναι απόλυτα προβλέψιμη. Για υψηλά επίπεδα ισχύος η συνιστώσα συνεχούς μπορεί να φέρει μέχρι και σε κατάσταση κορεσμού τα αναλογικά κυκλώματα του δέκτη και να προκαλέσει απώλεια της επικοινωνίας. Σε χαμηλότερα επίπεδα, πράγμα που αποτελεί και τη συνήθη περίπτωση, η συνεχής συνιστώσα προκαλεί

αυξημένο ρυθμό λαθών ο οποίος αποτελεί μέγεθος πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές της τιμής της ισχύος συνεχούς συχνότητας όπως έχει αποδειχθεί.

Το πρόβλημα της εμφάνισης συνεχούς συνιστώσας καθιστά την αρχιτεκτονική δέκτη άμεσης μετατροπής σχεδόν μη εφαρμόσιμη σε συστήματα όπου η σύνδεση πομπού και δέκτη απαιτείται να γίνει σε επίπεδο σημάτων βασικής ζώνης. Σε περιπτώσεις όπου η εφαρμογή αυτής της συνθήκης δεν είναι επιτακτική, όπως για παράδειγμα σε συστήματα ειδοποίησης και σε δορυφορικά συστήματα η αρχιτεκτονική αυτή χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς. Η εναλλακτική αρχιτεκτονική που είναι απαλλαγμένη από τα προβλήματα παρουσίας ισχύος στη συνεχή συχνότητα είναι η αρχιτεκτονική υπερετεροδύνου δέκτη (super-heterodyne receiver) η οποία έχει εφαρμοστεί και κυριαρχεί μέχρι και σήμερα ως αρχιτεκτονική εμπορικών δεκτών. Η φιλοσοφία της αρχιτεκτονικής αυτής βασίζεται στην απαλλαγμένη από προβλήματα συνεχούς συνιστώσας λήψη. Ο μόνος τρόπος για να υλοποιηθεί το παραπάνω είναι η εισαγωγή τουλάχιστον ενός παραπάνω σταδίου φιλτραρίσματος του σήματος εισόδου πριν από την μετατροπή του σε σήμα βασικής ζώνης. Στο πρώτο στάδιο φιλτραρίσματος στον υπερετεροδύνο δέκτη χρησιμοποιούν αναλογικά φίλτρα για την απόρριψη κατοπτρικών συχνοτήτων (image-rejection) τα οποία αποσβένουν το κατοπτρικό συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος. Στη συνέχεια ακολουθεί ενίσχυση του σήματος και κατόπιν το σήμα περνάει από δεύτερο φίλτρο απόσβεσης συχνοτήτων εκτός της επιθυμητής ζώνης. Στο επόμενο στάδιο το σήμα μετατοπίζεται σε σχετικά χαμηλή συχνότητα με κατάλληλη μείξη. Στη συχνότητα αυτή η οποία ονομάζεται ενδιάμεση (intermediate frequency) περνάει από δεύτερο φίλτρο που απομονώνει το σήμα πληροφορίας πραγματοποιώντας την επιλογή του καναλιού. Στο δεύτερο στάδιο φιλτραρίσματος αποκόπτονται οι συχνότητες εντός των οποίων ήταν και η μηδενική στο αρχικό σήμα εισόδου και στη συνέχεια γίνεται μετατροπή στη βασική ζώνη συχνοτήτων. Η αρχιτεκτονική του υπερετεροδύνου δέκτη παρουσιάζει ανώτερα επίπεδα ευαισθησίας και επιλεκτικότητας σε σχέση με τον δέκτη άμεσης μετατροπής. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί αρκετά αναλογικά στοιχεία, τα οποία δεν μπορούν να προσφέρουν στον δέκτη την απαραίτητη ευελιξία για λειτουργία σε περισσότερες από μια ζώνες συχνοτήτων. Ο υπερετεροδύνος δέκτης παρουσιάζει πολύ μεγάλη κατανάλωση ισχύος η οποία οφείλεται κυρίως σε απώλειες στα δύο στάδια φίλτρων. Οι απώλειες αυτές πρέπει να αντιμετωπιστούν με ενίσχυση του σήματος, πράγμα που είναι μεν εφικτό αλλά βαραίνει αρνητικά στην ευκολία με την οποία ολοκληρώνεται η αρχιτεκτονική, στο ελάχιστο κόστος, στις ελάχιστες διαστάσεις και την ελάχιστη κατανάλωση. Είναι επίσης λογικό το κόστος μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής να είναι αυξημένο λόγω των παραπάνω αλλά και λόγω των απαιτήσεων σε αναλογικά στοιχεία υψηλής απόδοσης.

Η προοπτική της δυνατότητας ολοκλήρωσης των τερματικών συσκευών σε επίπεδο λήψης ευρείας ζώνης έχει φέρει στο προσκήνιο την αρχιτεκτονική άμεσης μετατροπής και πάλι. Ο σκοπός είναι το εισερχόμενο ραδιοσήμα να μπορεί να μετατραπεί σε σήμα βασικής ζώνης σε ένα στάδιο. Αν η μετατόπιση του σήματος γίνει με αξιόπιστο τρόπο τότε η επιλογή των καναλιών μπορεί να γίνεται με ψηφιακό τρόπο στο ψηφιακό πεδίο. Όπως φαίνεται και από τις εικόνες που ακολουθούν και όπως αναφέραμε και παραπάνω πρόκειται για την αρχιτεκτονική με την απλούστερη ραδιοδιεπαφή, γεγονός που την καθιστά πιο προσαρμοστική από όλες τις διαθέσιμες. Παρότι όμως η αρχιτεκτονική της άμεσης μετατροπής μπορεί να αποτελεί πολύ καλή λύση, δεν είναι πραγματοποιήσιμη τουλάχιστον σε ευρυζωνικό (broadband) επίπεδο

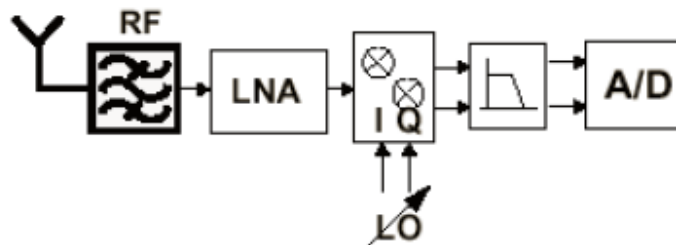
λόγω της αδυναμίας στην αντιμετώπιση των προβλημάτων παρουσίας ισχύος στην συνεχή συνιστώσα. Ο τοπικός ταλαντωτής που χρησιμοποιείται για την μετατροπή του σήματος σε σήμα βασικής ζώνης λειτουργεί σε ίδιες συχνότητες με την κεραία και συνεπώς μπορεί να προκληθεί λήψη σήματος από τον ταλαντωτή και να υπερτεθεί στο λαμβανόμενο ραδιοσήμα. Με αυτόν τον τρόπο κλείνει ένας βρόχος που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση χρονικά μεταβαλλόμενης συνεχούς συνιστώσας στην έξοδο του μίκτη. Ακόμη και στην υποθετική περίπτωση που η λήψη μπορούσε να είναι απαλλαγμένη από την συνεχή συνιστώσα χωρίς καμία αλλαγή στην αρχιτεκτονική οι τεχνικές απαιτήσεις στις οποίες θα πρέπει να ανταπεξέλθουν τα στοιχεία του δέκτη είναι σημαντικές με κυρίαρχες τις απαιτήσεις για το υλικό μετατροπής από το αναλογικό στο ψηφιακό πεδίο. Όπως θα δούμε και σε επόμενη παράγραφο ο μετατροπέας αυτός θα πρέπει να έχει ιδιαίτερα μεγάλο δυναμικό εύρος ώστε να έχει επαφή με πολύ ασθενή σήματα πληροφορίας σε θορυβώδες περιβάλλον ευρείας ζώνης. Αλλά ακόμη και να είχε την απαιτούμενη διακριτική ικανότητα ο μετατροπέας, οι συχνότητες λειτουργίας του θα ήταν ιδιαίτερα μεγάλες πράγμα που θα είχε ως αναπόφευκτο αποτέλεσμα την ανάλογα μεγάλη κατανάλωση. Είναι επίσης δύσκολη η κατασκευή μετατροπέων ικανών να λειτουργούν σε τέτοιο φάσμα σημάτων με ικανοποιητικά γραμμικά χαρακτηριστικά. Οι δέκτες άμεσης μετατροπής και υπερτεροδύνης λήψης παρουσιάζονται στις εικόνες 32α και 32β.

Ενδιάμεσες λύσεις μεταξύ των παραπάνω δύο αρχιτεκτονικών αποτελούν οι αρχιτεκτονικές δέκτη χαμηλής ενδιάμεσης συχνότητας απλής μετατροπής (Low-IF single conversion receiver) και wideband ενδιάμεσης συχνότητας διπλής μετατροπής (wideband IF double conversion). Οι αρχιτεκτονικές αυτές προέκυψαν από την ανάγκη για ολοκλήρωση εντός ενός chip δεκτών με χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις multimode επικοινωνίας. Η αρχιτεκτονική που ακολουθεί ο δέκτης χαμηλής ενδιάμεσης συχνότητας απλής μετατροπής αντιμετωπίζει τα περισσότερα προβλήματα συνεχούς συνιστώσας της αρχιτεκτονικής άμεσης μετατροπής με μετατόπιση του σήματος σε χαμηλή ενδιάμεση συχνότητα ίση με μια ή δύο φορές το εύρος ζώνης του καναλιού. Στη συνέχεια το σήμα περνάει από ζωνοπερατό φίλτρο το οποίο απομονώνει το σήμα πληροφορίας το οποίο ακυρώνει συχνοτικές συνιστώσες που κατά την μετατόπιση στη βασική ζώνη θα έδιναν ισχύ στο συνεχές. Στη συνέχεια το σήμα μετατρέπεται σε σήμα διακριτού χρόνου και στο πεδίο αυτό μετατρέπεται σε σήμα βασικής ζώνης. Η αρχιτεκτονική αυτή είναι ιδιαίτερα δημοφιλής και χρησιμοποιείται ευρέως στις υλοποιήσεις συστημάτων όπως το DECT και το GSM. Σε σχέση με τον δέκτη άμεσης μετατροπής ο δέκτης χαμηλής ενδιάμεσης συχνότητας πλεονεκτεί λόγω της απόρριψης της συνεχούς συνιστώσας ενώ δεν περιλαμβάνει τοπικούς ταλαντωτές που λειτουργούν σε συχνότητες κοντά σε αυτήν του φορέα. Και στις δύο αρχιτεκτονικές η επιλογή καναλιού γίνεται στη βασική ζώνη πράγμα που επιτρέπει υλοποιήσεις για διαφορετικά πρότυπα. Η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί επίσης να ολοκληρωθεί σε ένα chip. Σε σύγκριση με τον υπερτεροδύνη δέκτη ο δέκτης χαμηλής ενδιάμεσης συχνότητας είναι πιο οικονομικός μια και η ενδιάμεση συχνότητα μετατόπισης είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη του τελευταίου και συνεπώς το φίλτρο που λειτουργεί σε αυτήν την συχνότητα καταναλώνει σημαντικά μικρότερη ισχύ. Παρόλα αυτά το σήμα που μετατρέπεται σε βασικής ζώνης δεν έχει περάσει από φίλτρο απόρριψης κατοπτρικής συχνότητας. Από τα παραπάνω είναι προφανείς οι συμβιβασμοί που συνοδεύουν την

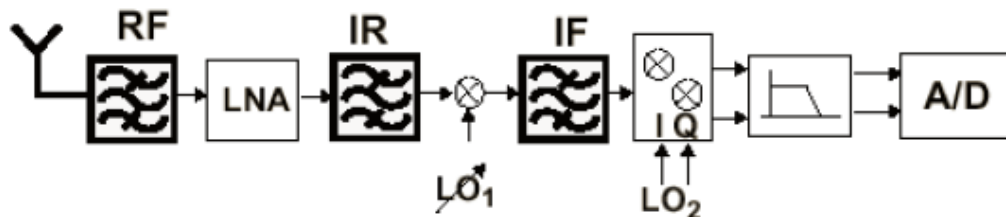


επιλογή αρχιτεκτονικής δέκτη. Ο δέκτης μετατροπής χαμηλής ενδιάμεσης συχνότητας παρουσιάζεται στην εικόνα 32γ.

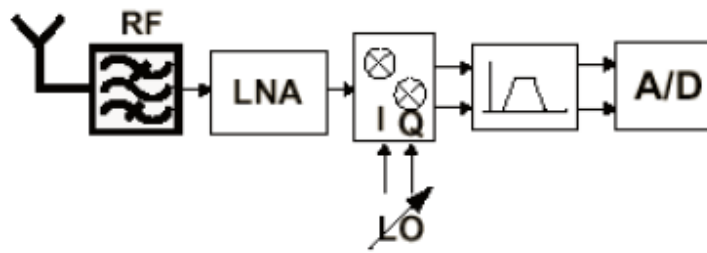
Εξίσου δημοφιλής και με ευρεία εφαρμογή είναι και η αρχιτεκτονική wideband IF διπλής μετατροπής. Όπως και στην αρχιτεκτονική υπερετερόδυνου δέκτη, ο δέκτης αυτός αποτελείται από δύο αναλογικά στάδια μετατροπής του σήματος στη βασική ζώνη. Το πλεονέκτημα του δέκτη αυτού σε σχέση με τον υπερετερόδυνου δέκτη έγκειται στο γεγονός ότι δεν χρησιμοποιούνται πολλά αναλογικά φίλτρα. Ολόκληρο το σήμα που λαμβάνεται από την κεραία μετατοπίζεται σε σταθερή ενδιάμεση συχνότητα (από το γεγονός αυτό η αρχιτεκτονική λαμβάνει την ονομασία) και το ανώτερο συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος που παρουσιάζεται ως αποτέλεσμα της μείξης αποκόπτεται με κατωδιαβατό φίλτρο. Ο δεύτερος τοπικός ταλαντωτής που επιλέγει το εύρος ζώνης των συχνοτήτων που θα μετατραπούν αποτελεί τον προγραμματιζόμενο ταλαντωτή επιλογής καναλιού. Η αρχιτεκτονική του δέκτη αυτού φαίνεται στην εικόνα 32δ. Ο δέκτης wideband IF διπλής μετατροπής έχει δυνατότητες μετατροπής μεγάλου εύρους ζώνης στη βασική ζώνη πράγμα που εγείρει σημαντικές απαιτήσεις από τα αναλογικά του κυκλώματα τα οποία πρέπει αποδίδουν το απαιτούμενο δυναμικό εύρος ώστε να μπορούν να επεξεργάζονται σήματα πληροφορίας με πολύ χαμηλή ισχύ σε περιβάλλοντα όπου υπάρχουν γειτονικά σήματα με ισχύ πολύ υψηλότερη. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην υλοποίηση της αρχιτεκτονικής περιλαμβάνουν περιορισμένη ισχύ στη συχνότητα του συνεχούς, θόρυβο ενδοδιαμόρφωσης λόγω μη γραμμικότητας των στοιχείων του δέκτη και θόρυβο Flicker. Η αρχιτεκτονική αυτή έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα στους δέκτες για Bluetooth, GSM και σε δέκτες για ασύρματα τοπικά δίκτυα.



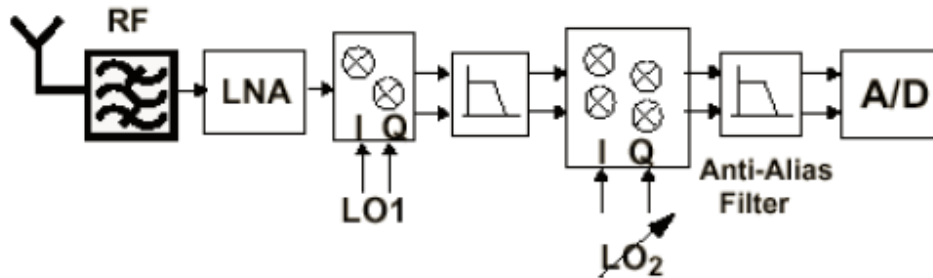
α) Δέκτης άμεσης μετατροπής (Direct Conversion)



β) Υπερετερόδυνος δέκτης (Super Heterodyne)

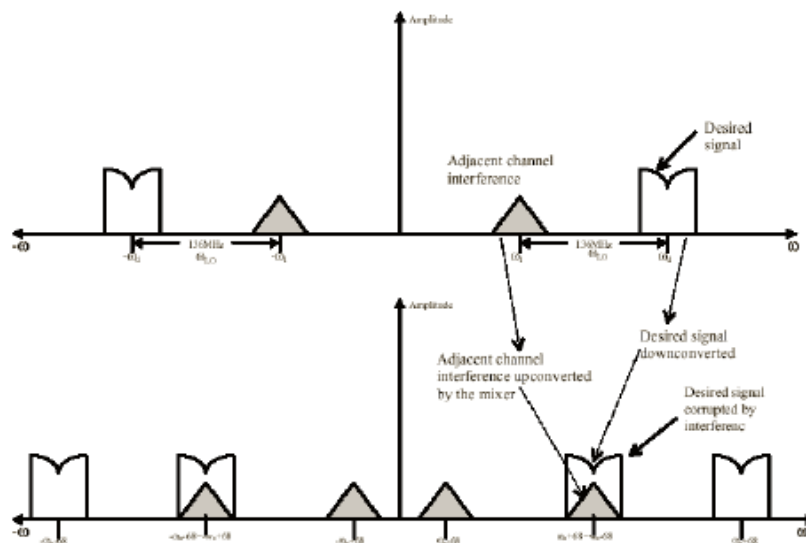


γ) Δέκτης χαμηλής ενδιάμεσης συχνότητας απλής μετατροπής (Low-IF single conversion receiver)



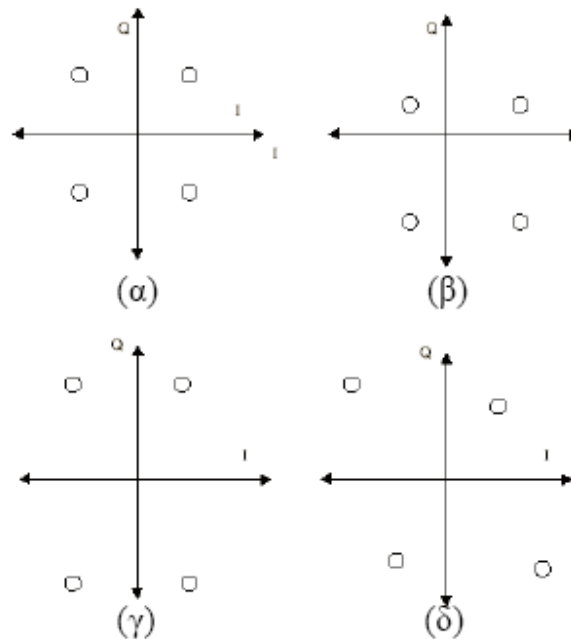
δ) Ευρυζωνικός IF δέκτης διπλής μετατροπής (Wideband IF double conversion receiver)

Εικόνα 32 : Αρχιτεκτονικές δεκτών Software Defined Radio

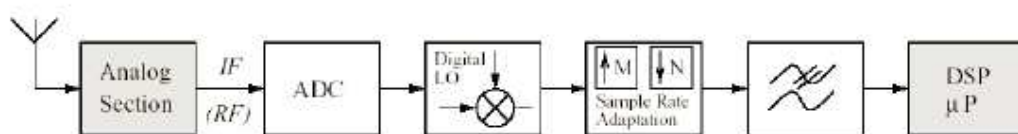


Εικόνα 33 : Το πρόβλημα της υπέρθεσης συχνοτήτων στον υπερτεροδύνο δέκτη

Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόβλημα όλων των αρχιτεκτονικών πλην του δέκτη άμεσης μετατροπής αποτελεί η επίτευξη συμφωνίας των χαρακτηριστικών των σημάτων εντός και εκτός φάσης κατά την μετατροπή από σε βασική ζώνη. Αν οι δύο συνιστώσες του σήματος δεν έχουν τιμές πλάτους ή/και φάσης οι οποίες έχουν αρκετή διαφορά μεταξύ τους τότε η μετατροπή στο τελικό σήμα μπορεί να απέχει αρκετά από την αναμενόμενη δίνοντας παραμορφωμένους αστερισμούς σημάτων ή ακόμα και λάθη.



Εικόνα 34 : Παραμορφώσεις του λαμβανόμενου σήματος για αναλογική μετατροπή σε σήμα βασικής ζώνης (α) ιδανικός αστερισμός, (β) παραμόρφωση λόγω συνεχούς συνιστώσας ισχύος, (γ) ασυμφωνία πλάτους I-Q συνιστωσών και (δ) ασυμφωνία φάσης I-Q συνιστωσών



Εικόνα 35 : Γενικευμένη μορφή δέκτη

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να περιγραφεί ένα γενικό μοντέλο δέκτη για Software Radio το οποίο θα περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες. Το παραπάνω μοντέλο παρουσιάζεται στην εικόνα 35. Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου του δέκτη είναι το bandwidth  $B$  που συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό δειγματοληψίας  $f_s$  και το δυναμικό εύρος του σήματος (dynamic range) λήψης. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να προσαρμόζονται κατά τα πρότυπα που υπαγορεύει η

εκάστοτε υπηρεσία, είτε θα πρέπει να υποστηρίζονται τα μέγιστα επίπεδα που υπαγορεύει η «δυσκολότερη» από όλες τις υπηρεσίες.

### 2.6.3 Λειτουργίες και κρισιμότητα

Το παραπάνω μοντέλο δέκτη αποτελείται από σειρά δομικών μπλοκ που αντιστοιχούν στις διάφορες λειτουργίες του και οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 : Παράμετροι του γενικευμένου δέκτη

<i>Functionality</i>	<i>Parameters</i>	<i>Variability of Parameters</i>
Antenna	bandwidth $B$ , gain	parameterizable or fixed with widest bandwidth and highest gain
LNA	Noise Figure, gain	parameterizable or fixed with highest gain and best noise figure
System Filter	bandwidth $B$ , loss	parameterizable or fixed with highest gain and best noise figure
Mixer (Down Conversion)	bandwidth $B$ , image rejection	fixed with widest bandwidth and strongest image rejection
ADC	Resolution, bandwidth, sample rate	parameterizable or fixed with highest resolution, widest bandwidth
Sample Rate Adaptation	bandwidth $B$ , SNR	parameterizable/ programmable
Channelization/ De-Spreading	bandwidth $B$ , sample rate $f_S$	programmable
Channel Estimation, Equalization	algorithm	programmable
Decoding	algorithm	programmable

Στα πλαίσια της προσαρμοστικότητας που πρέπει να διέπει την τεχνολογία του Software Radio, όσο το δυνατόν περισσότερες λειτουργίες πρέπει να είναι παραμετροποιήσιμες ή προγραμματιζόμενες και για να συμβεί αυτό θα πρέπει να μετατοπιστεί το όριο μεταξύ του αναλογικού και του ψηφιακού πεδίου όσο το δυνατόν προς την κεραία. Τα αναλογικά στοιχεία θα πρέπει να περιοριστούν κατά το δυνατόν στα ελάχιστα και όσο το δυνατόν σταθερά και μη μεταβαλλόμενα. Στην ιδανική περίπτωση ενός δέκτη γενικού φάσματος (broadband receiver) το αναλογικό μέρος πρέπει να βρίσκεται πριν από το στάδιο της RF-δειγματοληψίας, ή από το στάδιο IF-

δειγματοληψίας στη συνήθη περίπτωση δέκτη (wideband receiver). Τα αναλογικά στοιχεία περιορίζονται στην κεραία του συστήματος, στον ενισχυτή χαμηλού θορύβου ο οποίος προσαρμόζει την ισχύ του σήματος τις προδιαγραφές των κυκλωμάτων (LNA – Low Noise Amplifier), στο φίλτρο του συστήματος και στην περίπτωση που η υλοποιείται μετάφραση σε ενδιάμεση συχνότητα (IF-sampling) στο αναλογικό κύκλωμα μεταφοράς του σήματος στην IF συχνότητα. Τα παραπάνω αναλογικά στοιχεία θα πρέπει να είναι ικανά να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις των υποστηριζόμενων υπηρεσιών. Οι μέγιστες απαιτήσεις που προκύπτουν για τα αναλογικά στοιχεία αφορούν το δυναμικό εύρος των ευρείας ζώνης και, στην ιδανική περίπτωση, γενικής ζώνης σημάτων εισόδου πράγμα που σε συνδυασμό με το εύρος ζώνης των σημάτων αυτών καθιστούν ιδιαίτερα κρίσιμη λειτουργία την μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό. Δεύτερη σε κρίσιμότητα λειτουργία είναι η προσαρμογή του ρυθμού δειγματοληψίας του σήματος στα επίπεδα που υπαγορεύει η υπηρεσία ή η τεχνολογία που πρόκειται να υλοποιηθεί. Μια και οι διάφορες υπηρεσίες γενικά βασίζονται σε διαφορετικά πρότυπα, γενικά υποστηρίζουν αρκετά διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας που δεν είναι σχετικοί μεταξύ τους – ώστε να μπορεί να προκύπτει ο ένας από τον άλλον με σχετικά τετριμμένες και εύκολες διαδικασίες – το σήμα εξόδου του μετατροπέα ψηφιακού σήματος (ADC) πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται. Το προκύπτον σήμα συχνά θα πρέπει να βρίσκεται υπό αρκετά υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας και θα πρέπει στη συνέχεια να περάσει από φίλτρο καναλιού ή *dispreading*. Όχι σπάνια, οι ρυθμοί δειγματοληψίας που θα προκύπτουν από την προσαρμογή του ρυθμού δειγματοληψίας θα είναι πιο υψηλοί από αυτούς στους οποίους μπορούν να εκτελέσουν τις παραπάνω λειτουργίες οι σημερινοί επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων (DSP). Το ίδιο θα μπορεί να συμβεί και με άλλες λειτουργίες σχετικά απαιτητικές σε υπολογιστική ισχύ οι οποίες εκτελούνται σε χαμηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας υπό κανονικές συνθήκες, όπως η εξισορρόπηση και ανάλυση του καναλιού και η αποκωδικοποίηση.

## **2.6.4 Μετατροπή ψηφιακού σήματος**

### **2.6.4.1 Εύρος ζώνης**

Η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό μπορεί να εκτελεστεί στην ραδιοσυχνότητα του σήματος (RF sampling) είτε σε μια ενδιάμεση συχνότητα στην οποία θα έχει μετατραπεί το σήμα (IF sampling), όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους. Η πρώτη τεχνική ονομάζεται και ψηφιοποίηση πλήρους μπάντας (full band digitization), ενώ η δεύτερη ονομάζεται και ψηφιοποίηση μερικής μπάντας (partial band digitization), τεχνικές που παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα. Η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνικών είναι ουσιαστική και χαρακτηρίζει τον δέκτη ως δέκτη γενικών ή ευρέων συχνοτήτων, *broadband* ή *wideband* αντίστοιχα αντικατοπτρίζοντας τις δυνατότητες του συστήματος. Στη περίπτωση της ψηφιοποίησης πλήρους μπάντας το εύρος ζώνης που ψηφιοποιείται από τον ADC περιλαμβάνει όλες τις υπηρεσίες που είναι επιθυμητό να υποστηριχθούν, ενώ στην περίπτωση της ψηφιοποίησης μερικής μπάντας το εύρος ζώνης που ψηφιοποιείται τον ADC περιλαμβάνει μέρος μόνο του συνολικού, και συγκεκριμένα το μέγιστο εύρος καναλιού που μπορεί κάποια υπηρεσία να

χρησιμοποιεί. Το εύρος ζώνης που μπορεί να υποστηρίξεται είναι εύκολο να μετράται σε αρκετές εκατοντάδες MHz ενώ το δυναμικό εύρος των αναλογικών υποσυστημάτων μπορεί να είναι της τάξης των 100dB αλλά και παραπάνω ανάλογα με το πρότυπο κυψελοειδούς ραδιοεπικοινωνίας το οποίο χρησιμοποιείται, όπως είπαμε στις πρώτες παραγράφους. Με τα σημερινά δεδομένα πάντως, η ψηφιοποίηση πλήρους μπάνας δεν είναι υλοποιήσιμη, γεγονός που δεν διαφαίνεται ιδιαίτερα πιθανό να αλλάξει στο κοντινό μέλλον, αφήνοντας ως δεύτερη – και μοναδική – τη λύση της ψηφιοποίησης μερικής μπάνας.

### 2.6.4.2 Flash μετατροπείς ψηφιακού σήματος

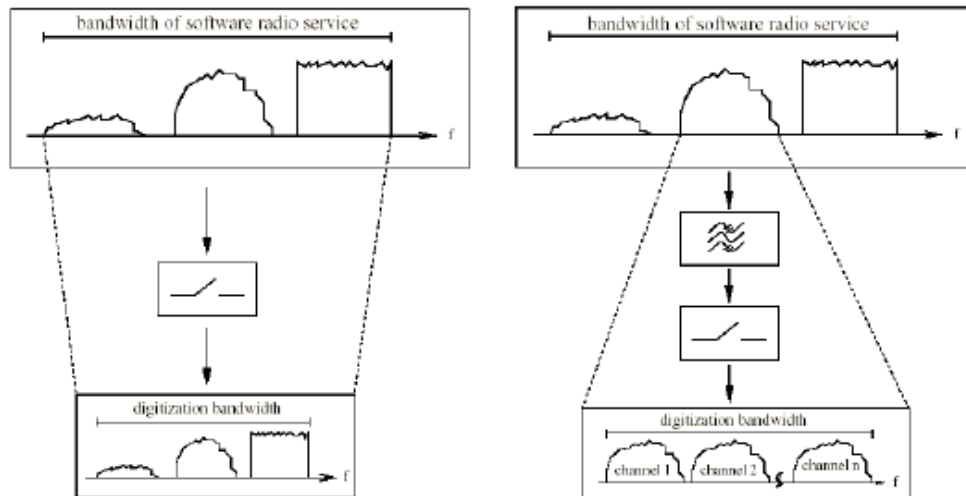
Μια και στην είσοδο του μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα το σήμα δεν περιέχει κάποιον κυρίαρχο στατικό φορέα σήματος, το μοντέλο του λευκού θορύβου κβαντοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά. Αν  $\Delta$  συμβολίζεται το γραμμικό βήμα κβαντισμού,  $V_{pp}$  το μέγιστο peak to peak εύρος τάσης που δεν φέρνει σε κορεσμό τον μετατροπέα και  $b$  ο αριθμός bits του κβαντιστή, τότε η σχέση που δίνει το  $\Delta$  μπορεί να γραφτεί:

$$\Delta = \frac{V_{pp}}{2^b} \quad (1)$$

Η πυκνότητα θορύβου του  $S_{N_q N_q}$  για λευκό θόρυβο κβαντισμού είναι:

$$S_{N_q N_q}(f) = \frac{\Delta^2}{12f_s}, \quad -\frac{f_s}{2} \leq f \leq \frac{f_s}{2} \quad (2)$$

όπου  $f_s$  η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό. Αν θεωρήσουμε σήμα με πλάτος που ακολουθεί κανονική κατανομή, με μηδενική μέση τιμή και μεταβλητότητα  $\sigma^2_x$  στην είσοδο του κβαντιστή, και  $U$  τον



Εικόνα 36 : Ψηφιοποίηση πλήρους και μερικής ζώνης

ρυθμό υπερδειγματοληψίας (oversampling ratio) τότε ο λόγος σήματος προς θόρυβο εντός της ζώνης συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει ( $U$ -οστό κλάσμα της  $f_s$ ) θα είναι (για αντίσταση  $1\Omega$ ):

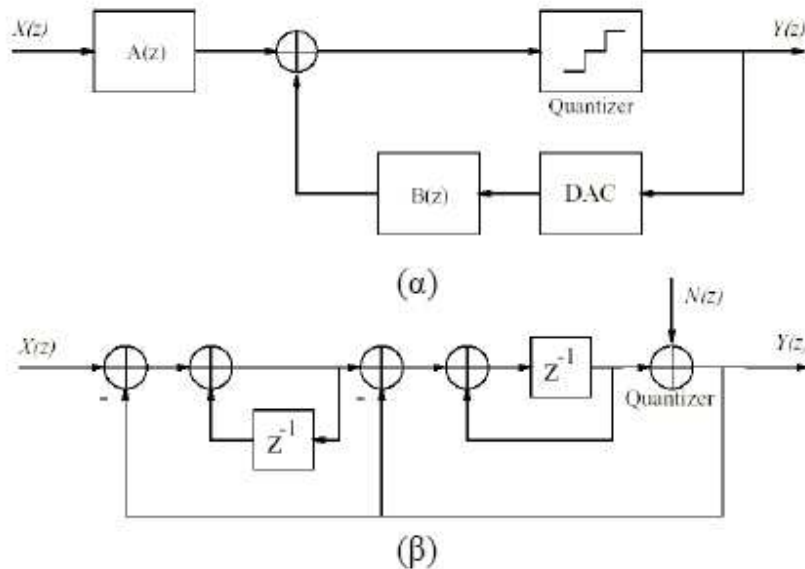
$$SNR_U |_{dB} = 10.8 + 6.02b + 10 \log U + 20 \log \frac{\sigma_x}{V_{pp}} \quad (3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση έχουμε να παρατηρήσουμε τα εξής: ο λόγος σήματος προς θόρυβο αυξάνει κατά παράγοντα 6.02 dB περίπου ανά πρόσθετο bit αύξησης στην ανάλυση του κβαντιστή, και 3.01 dB περίπου ανά διπλασιασμό του ρυθμού υπερδειγματοληψίας πράγμα που ισοδυναμεί σε αύξηση της ανάλυσης κατά μισό bit περίπου.

### 2.6.4.3 Σίγμα-Δέλτα μετατροπείς

Σε αντίθεση με τους Flash, οι Σίγμα-Δέλτα μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό ανήκουν στην οικογένεια των noise-shaping μετατροπέων, πράγμα που σημαίνει ότι παράγουν θόρυβο κβαντοποίησης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και μορφή. Το χαρακτηριστικό που παρουσιάζει ο θόρυβος που παράγεται από έναν  $\Sigma$ - $\Delta$  μετατροπέα είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειάς του βρίσκεται έξω από τις συχνότητες του σήματος (out of band noise) και συνεπώς μπορεί να αποκοπεί χωρίς προσθήκη καινούριων φίλτρων. Οι Σίγμα-Δέλτα μετατροπείς συνήθως διαιρούνται σε δύο μέρη, έναν Σίγμα-Δέλτα διαμορφωτή ο οποίος αποτελεί τη διεπαφή μεταξύ αναλογικού και ψηφιακού σήματος, και έναν decimator. Η διαμόρφωση Σίγμα-Δέλτα μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός διαφορικής διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης εντός ενός συστήματος και μόνο όπως φαίνεται στην εικόνα 37. Η ιδέα βασίζεται στην υπερδειγματοληψία του σήματος και στην εισαγωγή βρόχου αρνητικής ανάδρασης στον οποίο η τιμή του σήματος έχει ανακατασκευαστεί. Με αυτόν το τρόπο γίνεται πρόβλεψη

της επόμενης τιμής της εισόδου με επιτυχία μια και οι  $\Sigma$ - $\Delta$  μετατροπείς παρουσιάζουν έξοδο που κατά μέσον όρο έχει ίδια τιμή με την είσοδο.



Εικόνα 37 : Σίγμα-Δέλτα διαμορφωτές  
(α) Γενικό σχήμα (β)  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτής δεύτερης τάξης

Ο διαμορφωτής Σίγμα-Δέλτα δεν αποτελεί γραμμικό χρονικά αναλλοίωτο σύστημα και συνεπώς δεν έχει καμία από τις ιδιότητες των συστημάτων αυτών. Αν  $A(z)$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς του διαμορφωτή δέλτα και  $B(z)$  η συνάρτηση μεταφοράς του loop filter, ενώ στην διαμόρφωση δέλτα επιλέγεται  $A(z) = B(z)$  στην περίπτωση της Σίγμα-Δέλτα διαμόρφωσης γίνεται επιλογή  $A(z) \neq B(z)$  και με κατάλληλη επιλογή των  $A(z)$  και  $B(z)$  συχνά επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση. Παρόλα αυτά παρακάτω λαμβάνεται η ισότητα. Η διαδικασία του κβαντισμού καθορίζεται από τις συναρτήσεις μεταφοράς  $A(z)$  και  $B(z)$ , την ανάλυση του κβαντιστή σε αριθμό από bits, και τον ρυθμό υπερδειγματοληψίας. Οι συναρτήσεις μεταφοράς σήματος και θορύβου δίνονται από τις εξής εξισώσεις:

$$NTF(s) = \frac{Y(z)}{N(z)} = \frac{1}{1 - B(z)} \quad (4\alpha)$$

$$STF(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{A(z)}{1 - B(z)} \quad (4\beta)$$

Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί από τις παραπάνω εξισώσεις είναι ότι οι συναρτήσεις μεταφοράς για το σήμα και για τον θόρυβο κβαντισμού είναι διαφορετικές και έτσι είναι δυνατόν να διαχωριστεί στο σήμα από τον θόρυβο. Για τον διαμορφωτή



Σίγμα-Δέλτα 2ας τάξης με χρήση διπλής ολοκλήρωσης που παρουσιάζεται στην εικόνα 37β θα ισχύει:

$$NTF(s) = \frac{Y(z)}{N(z)} = (1 - z^{-1})^2 \quad (5\alpha)$$

$$STF(s) = \frac{Y(z)}{X(z)} = z^{-1} \quad (5\beta)$$

Το σήμα εισόδου  $X(z)$  φιλτράρεται από ένα ολοπερατό φίλτρο και ο θόρυβος κβαντοποίησης  $N(z)$  από ένα high pass φίλτρο. Αν με  $P_s$  συμβολίζεται η ισχύς του σήματος και  $N_Q$  ο θόρυβος κβαντοποίησης η σχέση του λόγου σήματος προς θόρυβο δίνεται από την εξίσωση:

$$SNR_U |_{dB} = 10 \log \frac{P_s}{\Delta^2} + 10 \log \frac{\pi}{\int_0^{\frac{\pi}{U}} 16 \sin^4 \frac{\omega}{2} d\omega} \quad (6)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το  $U$  συμβολίζει το κλάσμα του εύρους ζώνης συχνοτήτων στο οποίο λαμβάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης αντιστοιχεί στον λόγο σήματος προς θόρυβο κβαντισμού που προκύπτει χωρίς τη χρήση εξομάλυνσης θορύβου (noise shaping), ενώ ο δεύτερος αντιστοιχεί στην αυξητική συνεισφορά στον λόγο σήματος προς θόρυβο που προκύπτει από την χρήση εξομάλυνσης θορύβου εντός του  $U$ -ιστού κλάσματος του συνολικού εύρους ζώνης συχνοτήτων, στο οποίο χρησιμοποιείται Σίγμα-Δέλτα διαμόρφωση. Με ανάπτυξη σε σειρά Taylor και για  $U \geq 4$  λαμβάνεται η εξής σχέση:

$$SNR_U |_{dB} \approx 6.02b + 50 \log U + 20 \log \frac{\sigma_x}{V_{pp}} - 2.1, \quad U \geq 4 \quad (7)$$

Γενικεύοντας για SDMs τάξης  $L$  με ημιτονοειδές φίλτρο εξομάλυνσης θορύβου ο λόγος σήματος προς θόρυβο θα είναι:

$$SNR_U |_{dB} \approx 10.8 + 6.02b + (2L + 1)10 \log U + 20 \log \frac{\sigma_x}{V_{pp}} + 20 \log \frac{2L + 1}{\pi^{2L}}, \quad (8)$$

$$U \geq 4$$

Παρατηρώντας τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνουμε ότι ο λόγος σήματος προς θόρυβο αυξάνει κατά 6 περίπου dB ανά πρόσθετο bit στην ανάλυση του κβαντιστή και κατά  $6(L+1/2)$  dB ανά διπλασιασμό του ρυθμού υπερδειγματοληψίας, πράγμα που ισοδυναμεί σε αύξηση  $L+1/2$  στην ανάλυση του κβαντιστή. Γενικά, η υπερδειγματοληψία με oversampling παράγοντα  $U$  σε έναν  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτή τάξης  $L$  ισοδυναμεί με αύξηση στην ανάλυση του κατά παράγοντα  $b$  ίσο με:

$$b = (L + \frac{1}{2}) \log_2 U \quad \text{bits} \quad (9)$$

Όσον αφορά το δυναμικό εύρος του κβαντιστή για αυτό αποδεικνύεται ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$DR_{\Sigma-\Delta} = 10 \log \left[ \frac{3}{2} (2^b - 1)^2 \frac{2L+1}{\pi^{2L}} U^{2L+1} \right] \quad (10)$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι το δυναμικό εύρος ενός  $\Sigma$ - $\Delta$  μετατροπέα μπορεί να αυξηθεί με τρεις βασικούς τρόπους, αυξάνοντας είτε τον παράγοντα υπερδειγματοληψίας, είτε την τάξη του μετατροπέα ή είτε την ανάλυση του κβαντιστή. Με τον διπλασιασμό του παράγοντα υπερδειγματοληψίας παράγεται ισοδύναμη αύξηση του δυναμικού εύρους ζώνης κατά  $3(2L+1)$  ή αύξηση της ανάλυσης του κβαντιστή κατά  $L+0.5$  bits (αποφεύγεται η χρήση  $\Sigma$ - $\Delta$  μετατροπέων ανώτερης τάξης ( $L>3$ ) για την αύξηση του δυναμικού εύρους λόγω περιορισμένης σταθερότητάς τους. Παρόλα αυτά υπάρχουν υλοποιήσεις μετατροπέων τέταρτης τάξης που επιτυγχάνουν με 14bits ανάλυση και ρυθμό δειγματοληψίας 200Ksps πάνω από 90dB δυναμικό εύρος, για μετατροπή GSM σήματος ).

Η παραπάνω ανάλυση αφορούσε διαμορφωτές  $\Sigma$ - $\Delta$  με μέγιστο λόγο σήματος προς θόρυβο στο συνεχές (μηδενική συχνότητα). Τέτοιου τύπου «κατωδιαβατοί»  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτές μπορούν να μετασχηματιστούν σε «ζωνοδιαβατούς» με ισοδύναμα χαρακτηριστικά στην εξομάλυνση του θορύβου και μέγιστο λόγο σήματος προς θόρυβο σε οποιαδήποτε επιθυμητή συχνότητα.

#### 2.6.4.4 Flash ή ΣΔΜ

Για να απαντηθεί η ερώτηση σχετικά με το ποια τεχνολογία είναι καταλληλότερη για την υλοποίηση δεκτών για τεχνολογία Software Radio πρέπει να αναλογιστούμε κατά πόσο μπορεί η κάθε μια να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής που μπορεί να υποστηρίζεται. Ας υποθεθεί εφαρμογή για τερματικό που υποστηρίζει τα πρότυπα GSM, GPS και DECT. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά των τριών αυτών προτύπων δίνονται στον πίνακα 2. Από τον πίνακα 2 μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι οι πιο σκληρές απαιτήσεις προβάλλουν από το πρότυπο του GSM. Οι απαιτήσεις σε δυναμικό εύρος ενός μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα για εύρος ζώνης 2MHz δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.

Πίνακας 2 : Παράμετροι λειτουργίας των προτύπων GSM, DECT και GPS

	<i>GSM</i>	<i>DECT</i>	<i>GPS</i>
Mobile Receive Band	935-960 MHz	1880-1900 MHz	1575 MHz
Channel Separation / Channel Bandwidth	200 kHz	1728 kHz	2046 kHz
minimum SNR at receiver ADC (hardware dependent)	9-12 dB	10 dB	6-12 dB (theoretically 1 Bit resolution)

Πίνακας 3 : Δυναμικό εύρος των σημάτων κινητής επικοινωνίας των προτύπων GSM, DECT και GPS για ψηφιοποίηση ευρέως φάσματος

<i>Digitization Bandwidth = 2 MHz</i>	<i>GSM</i>	<i>DECT</i>	<i>GPS</i>
Dynamic Range	75 dB	10 dB	6 dB
Channel Bandwidth	200 kHz	≈1000 kHz	2000 kHz

Πίνακας 4 : Χαρακτηριστικά των μετατροπέων

<i>ADC resolution [bit]</i>	<i>resulting oversampling ratio</i>	<i>minimum sample rate for GSM (B = 200 kHz)</i>	<i>SNR at DECT bandwidth</i>	<i>SNR at GPS bandwidth</i>
1 (SDM)	75	15 MHz	45 dB	30 dB
8 (Flash)	5011	1 GHz	73 dB	70 dB
10 (Flash)	316	63 MHz	73 dB	70 dB

Για να επιτευχθεί απαίτηση δυναμικού εύρους 80 dB εντός της ζώνης συχνοτήτων των 200 KHz που αποτελεί το εύρος καναλιού για το GSM από την εξίσωση 3 και με χρήση των τιμών που πρακτικά χρησιμοποιούνται για την μεταβλητότητα που χαρακτηρίζει σήματα που ακολουθούν κανονική κατανομή πλατών,

$$\frac{V_{pp}}{2} = 3\sigma_x \quad (11)$$

λαμβάνουμε για έναν κβαντιστή Flash ρυθμό υπερδειγματοληψίας ίσο με:

$$80 = 10.8 + 6.02b + 10\log U + 20\log \frac{1}{6} \quad (12)$$

Η παραπάνω τιμή προσεγγίζεται ως:

$$U \approx 10^{8.5} \times 10^{-0.6b} \quad (13)$$

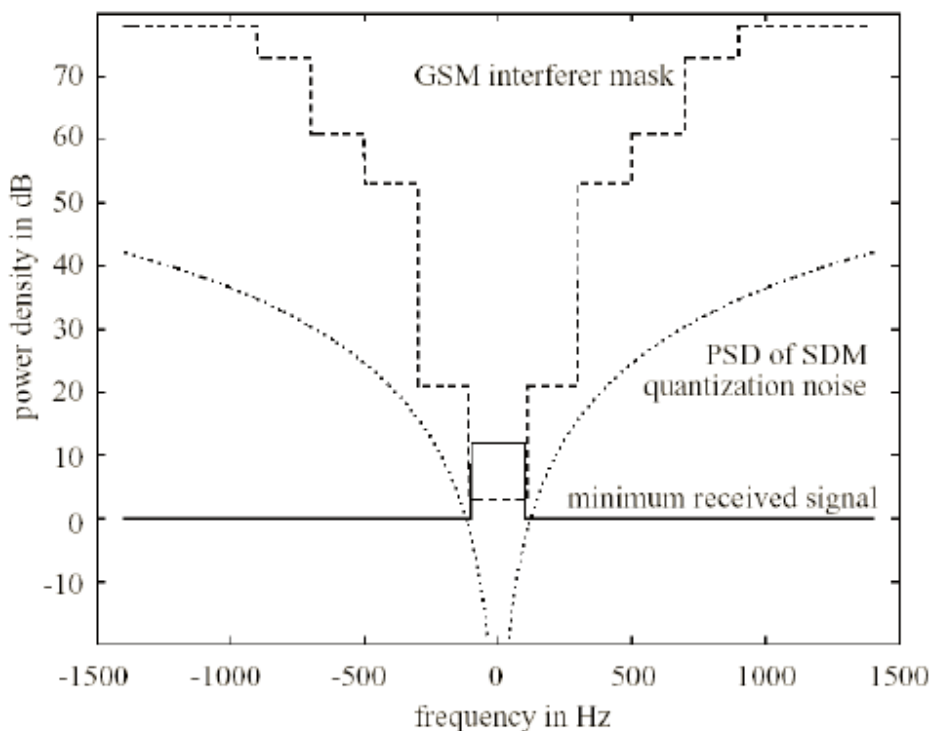
Αντίστοιχα, για έναν Σ-Δ διαμορφωτή 2ας τάξης ο ρυθμός υπερδειγματοληψίας μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις 7 και 11, δίνοντας αποτέλεσμα,

$$80 = 6.02b + 50\log U + 20\log \frac{1}{6} - 2.1 \quad (14)$$

δηλαδή,

$$U \approx 10^2 \times 10^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Στον πίνακα 4 δίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω εξισώσεις. Ένας από τους λίγους υπάρχοντες Flash μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό που θα μπορούσε να ικανοποιήσει τις εν λόγω απαιτήσεις υπό κατανάλωση 735 mW, η οποία είναι υπερβολικά υψηλή για κινητές τερματικές συσκευές θα μπορούσε να είναι ο AD9042 με ρυθμό δειγματοληψίας 41 Mbps σε ανάλυση 12bit. Οι παραπάνω απαιτήσεις ικανοποιούνται και από έναν Σ-Δ διαμορφωτή δευτέρας τάξης με ρυθμό δειγματοληψίας 15 Mbps και ανάλυση κβαντιστή 1bit.



Εικόνα 38 : Ψηφιοποίηση ευρείας ζώνης και μορφοποίηση θορύβου

Στην εικόνα 38 παρουσιάζονται η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου κβαντοποίησης ενός διαμορφωτή Σίγμα-Δέλτα, η μάσκα παρεμβολής για το πρότυπο GSM και το ελάχιστο λαμβανόμενο σήμα για λόγο σήματος προς θόρυβο. Η γραμμή 0dB αντιπροσωπεύει το επίπεδο λευκού θορύβου κβαντοποίησης που παράγεται από τους Flash μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι οι Flash διαμορφωτές που ικανοποιούν τις απαιτήσεις που GSM υπερκαλύπτουν σε υπερβολικό βαθμό τις απαιτήσεις των συστημάτων DECT και GPS. Οι Σ-Δ διαμορφωτές παρουσιάζουν μικρότερη διαφορά μεταξύ απαιτούμενου και τελικά επιτεύξιμου λόγου σήματος προς θόρυβο. Συνεπώς οι διαμορφωτές Σ-Δ δείχνουν καταλληλότεροι για την μετατροπή του σήματος του παραδείγματος σε ψηφιακό.

Βασιζόμενοι στην ανάλυση των παραπάνω δύο παραγράφων και προκειμένου να εξεταστεί ποιος τύπος μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό είναι καταλληλότερος για ψηφιοποίηση μερικής ζώνης δύο ακόμη σημαντικοί παράγοντες πρέπει να εξεταστούν: ο περιοριστικός για τον σχεδιασμό παράγοντας της κατανάλωσης ισχύος και η αποφυγή του φαινομένου aliasing που μπορεί να εμφανιστεί κατά την ψηφιοποίηση. Γενικά, υψηλότεροι χρόνοι δειγματοληψίας οδηγούν σε χαλαρωμένους aliasing περιορισμούς και συνεπώς σε απλούστερο σχεδιασμό anti-aliasing φίλτρων. Παρόλα αυτά αντίβαρο αποτελεί το κόστος λόγω μεγαλύτερης κατανάλωσης ισχύος. Η χρήση μεγαλύτερων χρόνων δειγματοληψίας έχει ως συνέπεια υψηλότερη αναλογία υπερδειγματοληψίας (oversampling ratio), πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα κέρδος λόγω ισοδύναμης αύξησης την ανάλυσης του κβαντιστή όπως είδαμε παραπάνω. Το κέρδος αυτό αντισταθμίζει το κόστος λόγω υψηλής κατανάλωσης ισχύος. Από τις εξισώσεις που

δίνουν την ανάλυση συναρτήσεως του λόγου υπερδειγματοληψίας για τους δύο τύπους μετατροπών εξάγεται ότι οι Σ-Δ διαμορφωτές επιτυγχάνουν μεγαλύτερο κέρδος σε ανάλυση πράγμα που οδηγεί σε πιο αποδοτικές και οικονομικές υλοποιήσεις, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν σημαντική αύξηση στο λόγο σήματος προς θόρυβο σε σύγκριση με τους Flash μετατροπείς, πράγμα ιδιαίτερα επιθυμητό στις κινητές τηλεπικοινωνίες. Οι Σ-Δ διαμορφωτές δείχνουν να ταιριάζουν στα χαρακτηριστικά του σήματος και συνεπώς κρίνονται κατάλληλοι για την ευρείας ζώνης ψηφιοποίηση σημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών.

## 2.6.5 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος

Πέραν των λειτουργιών που καθίστανται δύσκολο να υλοποιηθούν στο αναλογικό μέρος του συστήματος λόγω των απαιτήσεων που προβάλλουν υπάρχουν αναλόγως κρίσιμες λειτουργίες και στο ψηφιακό μέρος. Η μεταφορά του σήματος από τη μια ζώνη συχνοτήτων σε μια άλλη (down-conversion), η προσαρμογή του ρυθμού δειγμάτων (sample rate adaptation – decimation/interpolation) και λειτουργίες όπως η δημιουργία των καναλιών, η ακύρωση των παρεμβολών και η ανάκτηση του «σκορπισμένου» σήματος για spread spectrum συστήματα αποτελούν λειτουργίες που καταναλώνουν με ταχύ ρυθμό τους πόρους ενός Software Radio συστήματος.

### 2.6.5.1 Ψηφιακή μεταφορά σήματος σε χαμηλή συχνότητα

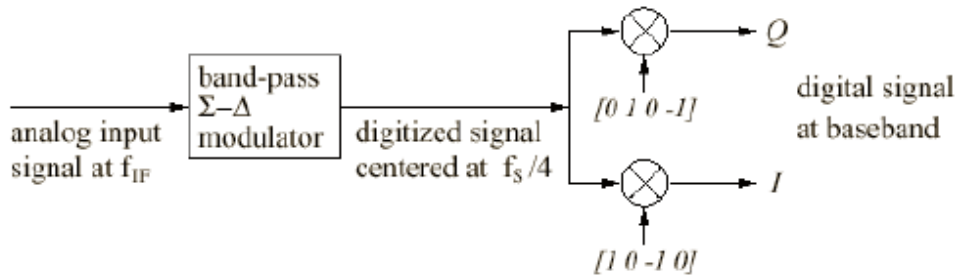
Παραπάνω παρουσιάστηκε η τεχνική της ψηφιοποίησης μερικής ζώνης σε ενδιάμεση συχνότητα ως η καταλληλότερη για τις απαιτήσεις της σημερινής Software Radio τεχνολογίας. Μια και η επεξεργασία του σήματος είναι συνήθως ευκολότερη και κοστίζει λιγότερο όταν αυτό βρίσκεται στη βασική ζώνη, είναι σκόπιμη η μεταφορά του από την ενδιάμεση συχνότητα στην μηδενική πριν την επεξεργασία. Η ψηφιακή μεταφορά σήματος σε χαμηλή συχνότητα μετά από μετατροπή του από αναλογικό σε ψηφιακό παρουσιάζει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με την αναλογική μεταφορά σήματος σε χαμηλή συχνότητα - που γίνεται πριν από την μετατροπή του σήματος σε ψηφιακό – το οποίο είναι η επίτευξη πολύ ικανοποιητικής συμφωνίας των καθέτων συνιστωσών εντός και εκτός φάσης του σήματος (I,Q matching). Η συμφωνία των συνιστωσών έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την μη εμφάνιση των μη επιθυμητών παραμορφώσεων στον αστερισμό του σήματος οι οποίες αναφέρθηκαν και σε προηγούμενη παράγραφο.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την υλοποίηση της ψηφιακής μετατροπής σήματος στη βασική ζώνη είναι η ενδιάμεση συχνότητα IF και ο χρόνος δειγματοληψίας, πόσο χρόνο διαρκεί κάθε δείγμα του σήματος. Αν η ενδιάμεση συχνότητα IF και ο χρόνος δειγματοληψίας επιλεγούν ώστε να υπακούουν στη σχέση:

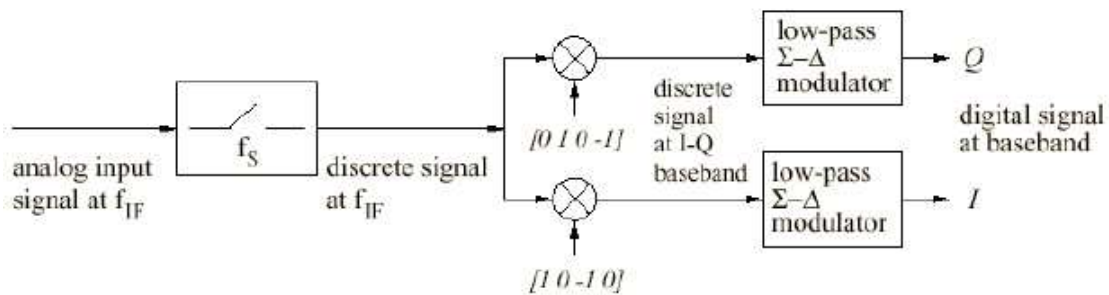
$$f_{IR} = \frac{n}{4} f_s, \quad n = 1,3,5,\dots \quad (16)$$

αν δηλαδή η ενδιάμεση συχνότητα είναι περιττό πολλαπλάσιο του τετάρτου κλάσματος του ρυθμού δειγματοληψίας τότε η ψηφιακή μετατροπή του σήματος σε σήμα βασικής ζώνης μπορεί να υλοποιηθεί με πολλαπλασιασμό του σήματος με τις ακολουθίες

$[0\ 1\ 0\ -1]$  και  $[1\ 0\ -1\ 0]$  οι οποίες αναπαριστούν το ψηφιακό σήμα ημιτόνου και συνημιτόνου αντίστοιχα. Για  $n=1$  το σήμα που μεταφέρεται στη βασική ζώνη είναι το αρχικό ψηφιοποιημένο σήμα, ενώ για  $n>1$  ένα κατοπτρικό του αρχικού ψηφιοποιείται και στη συνέχεια μετατρέπεται σε σήμα βασικής ζώνης. Η δεύτερη περίπτωση αντιστοιχεί στην τεχνική υποδειγματοληψίας (sub-sampling).



(α) Μετατροπή σήματος σε αναλογικό και μεταφορά στη βασική ζώνη



(β) Μεταφορά σήματος στη βασική ζώνη στο διακριτό πεδίο και μετατροπή σε αναλογικό

Εικόνα 39 : Μετατροπή σήματος σε ψηφιακό και μεταφορά στη βασική ζώνη

Σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος που περιγράφηκε είναι αυτή που πραγματοποιεί την μετατροπή του σήματος στην βασική ζώνη με την μικρότερη κατανάλωση πόρων.

Δεδομένης της προηγούμενης εξίσωσης που συνδέει την ενδιάμεση συχνότητα μεταφοράς του λαμβανόμενου σήματος και του ρυθμού δειγματοληψίας παρατηρείται ότι είναι δυνατόν να συνδυαστούν σε ένα στάδιο του δέκτη η μετατροπή του σήματος σε ψηφιακό και η μεταφορά του στη βασική ζώνη, όπως φαίνεται εικόνα 39α. Η εναλλαγή της σειράς των σταδίων της μετατροπής του από αναλογικό σε ψηφιακό γενικά και της μεταφοράς του σήματος στη βασική ζώνη γενικά δεν μπορεί να γίνει για λόγους που έχουμε ήδη αναφέρει. Παρόλα αυτά, υπό τους περιορισμούς που επιβάλλει η εξίσωση (16) η σειρά των δύο σταδίων μπορεί να αντιστραφεί. Στην περίπτωση αυτή πριν από τον αναλογικό μίκτη εισάγεται κύκλωμα που δειγματοληπτεί το σήμα στον επιθυμητό ρυθμό κρατώντας την τιμή του κάθε δείγματος σταθερή (κύκλωμα sample-and-hold) ενώ το κύκλωμα που ακολουθεί είναι η μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό. Ο λόγος για τον

οποίο η εναλλαγή των συστημάτων είναι θεμιτή ανάγεται στην χρήση  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτών για την μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό μια και οι κατωδιαβατοί  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτές είναι πιο εύκολοι στην υλοποίηση από τους αντίστοιχους ζωνοδιαβατούς. Ακόμη, από πλευράς κατανάλωσης ισχύος, η χρήση ενός ζωνοδιαβατού  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτή ισοδυναμεί με χρήση δύο κατωδιαβατών.

### 2.6.5.2 Προσαρμογή του χρόνου δειγματοληψίας

Ένας δέκτης Software Radio θα πρέπει εξορισμού να μπορεί να λαμβάνει σήματα διαφορετικών προτύπων και συνεπώς διαφόρων ρυθμών συμβόλων ή δειγμάτων. Ο ρυθμός στον οποίο γίνεται δειγματοληψία είναι παράμετρος του υλικού μετατροπής σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και το εύρος στο οποίο ο ρυθμός αυτός μπορεί να μεταβάλλεται χαρακτηρίζει, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το σύστημα. Ο ρυθμός δειγματοληψίας μπορεί είτε να προσαρμόζεται στις ανάγκες του κάθε πρότυπο είτε να παραμένει σταθερός σε μια μέγιστη ανεκτή τιμή και να προσαρμόζεται στη συνέχεια σε μια προσπάθεια ικανοποιητικής μείωσής του. Έχει αναφερθεί η λύση των  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτών όσον αφορά το κομμάτι της μετατροπής του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό. Οι διαμορφωτές αυτοί χαρακτηρίζονται υπερδειγματοληπτικοί (oversampling)  $\Sigma$ - $\Delta$  διαμορφωτές μια και λειτουργούν σε μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας συνεπώς είναι απαραίτητη η προσαρμογή του ρυθμού του σήματος μετά από αυτούς.

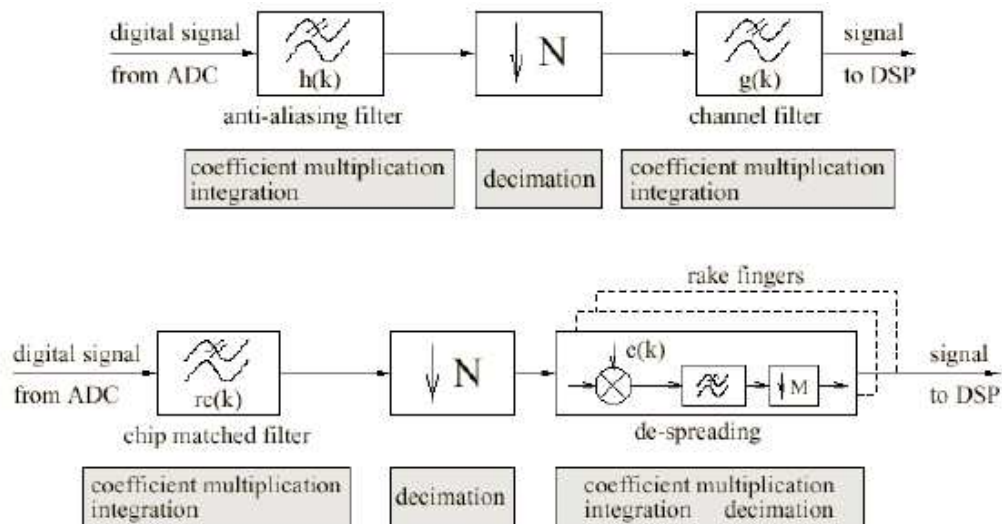
Οι επιλογές που υπάρχουν για την προσαρμογή του χρόνου δειγματοληψίας του σήματος είναι αρκετές. Μια λύση είναι η διατήρηση της σχέσης μεταξύ της ενδιάμεσης συχνότητας και του χρόνου δειγματοληψίας που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο έτσι ώστε να τηρούνται οι προδιαγραφές για εύκολη μεταφορά του σήματος στην βασική ζώνη. Ταυτόχρονα, η συσχέτιση των  $f_{IF}$  και  $f_s$  καθιστά και τα δύο αυτά μεγέθη μεταβλητά, παραμέτρους δηλαδή της υλοποίησης, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν από πρότυπο σε πρότυπο. Η αντιδιαμετρική λύση είναι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η χρήση σταθερού ρυθμού δειγματοληψίας σε σταθερή ενδιάμεση συχνότητα ακολουθούμενη από διατάξεις ή λογισμικό προσαρμογής του ρυθμού δειγματοληψίας με χρήση μεθόδων παρεμβολής (interpolation). Μια επιλογή για την υλοποίηση της προσαρμογής του ρυθμού δειγματοληψίας είναι ο συνδυασμός των τεχνικών παρεμβολής και μείωσης ρυθμού (decimation) για αυξομείωσή του κατά ακέραιους παράγοντες. Η τεχνική αυτή στοχεύει σε κλασματική μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας και γενικά θεωρείται ακριβή για τις ανάγκες ενός δέκτη Software Radio συστήματος λόγω των αναγκών που προκύπτουν για αποκοπή κατοπτρικών συχνοτήτων και απόρριψη αντιγράφων (aliases) μετά από τα στάδια κλασματικής αύξησης ή μείωσης του ρυθμού για σήματα εισόδου που έχουν μεγάλο δυναμικό εύρος. Μια δεύτερη επιλογή στην προσαρμογή του ρυθμού δειγματοληψίας συνίσταται στην χρήση απότομων φίλτρων επιλογής καναλιών τα οποία μειώνουν δραστικά το δυναμικό εύρος του σήματος εισόδου και καθιστούν την χρήση της προηγούμενης μεθόδου ελκυστικότερη μια και με αυτή οι απαιτήσεις για απόρριψη κατοπτρικών συχνοτήτων και φαινομένων alias είναι σημαντικά ελαστικότερες. Μια απλούστερη τακτική ονομάζεται ασύγχρονη μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας (asynchronous decimation). Σε κάθε στάδιο μείωσης του ρυθμού δειγματοληψίας ένας αριθμός από δείγματα απορρίπτονται, μέχρι επίτευξης του τελικού ρυθμού δειγματοληψίας. Με την μέθοδο αυτή εισάγεται σφάλμα στο σήμα το οποίο είτε



θα πρέπει να είναι ανεκτό, είτε να μπορεί να ακυρωθεί. Μια τεχνική που χρησιμοποιείται χρησιμοποιεί εκούσια προ-παραμόρφωση του σήματος (pre-distorting) έτσι ώστε η απόρριψη δειγμάτων να οδηγεί σε «καθαρό» σήμα. Η τεχνική αυτή αποτελεί την απλούστευση όσων έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα και αυτό γιατί αποφεύγει την παραμετροποίηση αναλογικών στοιχείων ενώ η μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας γίνεται με άμεσο τρόπο.

### 2.6.5.3 Επιλογή καναλιού και αποεξάπλωση

Το στάδιο της επιλογής του καναλιού και αποεξάπλωσης του σήματος για συστήματα φασματικής εξάπλωσης αποτελεί το πρώτο στάδιο ενός δέκτη στο οποίο μπορεί να μεταβάλλονται εκτός από παράμετροι όπως το λαμβανόμενο εύρος ζώνης, ο ρυθμός δειγματοληψίας και οι αλγόριθμοι που υλοποιούν ένα ή περισσότερα τμήματά του.

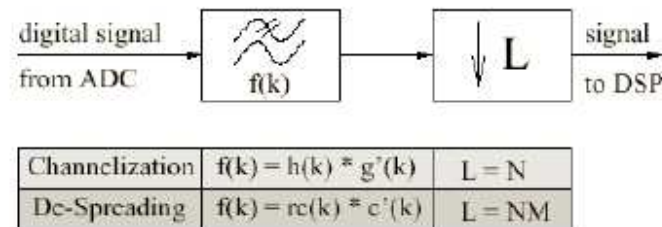


Εικόνα 40 : Προσαρμογή του εύρους ζώνης και επιλογή καναλιού / αποεξάπλωση

Το στάδιο αυτό αποτελεί επομένως το πρώτο προγραμματιζόμενο και όχι απλά παραμετροποιήσιμο στάδιο ενός δέκτη Software Radio. Σε ένα σύστημα FDMA επιλογή καναλιού είναι η λειτουργία στην οποία με κατάλληλο φίλτρο επιλογής λαμβάνεται η το εκπεμπόμενο σήμα, ενώ ταυτόχρονα αποκλείονται τα σήματα παρεμβολής. Η παραπάνω λειτουργία μπορεί να συνδέεται με το στάδιο της προσαρμογής του ρυθμού δειγματοληψίας. Μια και τα φίλτρα που εκτελούν decimation είναι κατωδιαβατά ταυτόχρονα λειτουργούν κατά μια έννοια και ως φίλτρα επιλογής καναλιού, ή τουλάχιστον βοηθούν τα μετέπειτα φίλτρα επιλογής καναλιού. Τα φίλτρα επιλογής καναλιού σχεδιάζονται ώστε να έχουν πολύ πιο απότομες μεταβάσεις μεταξύ των ζωνών αποκοπής και διάβασης και συχνά υλοποιούνται προσαρμοσμένα φίλτρα για τον σκοπό αυτόν. Το στάδιο της επιλογής καναλιού μπορεί να τοποθετηθεί πριν ή μετά το στάδιο

της προσαρμογής του ρυθμού δειγματοληψίας, με την δεύτερη επιλογή να είναι πιο συμφέρουσα από την άποψη της κατανάλωσης ισχύος αφού το φίλτρο θα λειτουργεί σε χαμηλότερους ρυθμούς. Σε αντιστοιχία με την επιλογή καναλιού, στα συστήματα φασματικής εξάπλωσης πρέπει να εκτελεστεί η αποεξάπλωση του σήματος για να ληφθεί το σήμα πληροφορίας. Οι λειτουργίες που πρέπει να γίνουν είναι (από)συσχέτιση και μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας για να επιτευχθεί ο προδιαγεγραμμένος ρυθμός συμβόλων.

Παρατηρώντας τις βασικές λειτουργίες οι οποίες πρέπει να γίνουν και στις δύο περιπτώσεις βλέπουμε ότι οι λειτουργίες της συσχέτισης και του φιλτραρίσματος συνίστανται στον πολλαπλασιασμό του σήματος με γνωστούς συντελεστές και στη συνέχεια ολοκλήρωση (ή άθροιση). Η επόμενη λειτουργία που πρέπει να εκτελεστεί και στις δύο περιπτώσεις είναι η μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας. Στην εικόνα 40 παρουσιάζονται οι λειτουργίες επιλογής καναλιού, αποεξάπλωσης σήματος και μείωσης του ρυθμού δειγματοληψίας σε συστήματα διαίρεσης συχνότητας και φασματικής εξάπλωσης.



Εικόνα 41 : Γενικευμένο στάδιο επιλογής καναλιού και αποεξάπλωσης

Λόγω των υψηλών ρυθμών δειγματοληψίας στους οποίους γίνονται υπολογισμοί οι παραπάνω λειτουργίες δεν μπορούν να εκτελεστούν από ψηφιακούς επεξεργαστές σημάτων (DSPs) με τις σημερινές επιδόσεις, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να εκτελεστούν σε υλικό σχεδιασμένο για ειδικά για τις λειτουργίες αυτές. Το υλικό αυτό θα πρέπει να είναι «γενικό» και παραμετροποιήσιμο έτσι ώστε να μπορούν να τρέξουν πάνω σε αυτό όλα τα επιθυμητά πρότυπα.

#### 2.6.5.4 Θέματα που σχετίζονται με την υλοποίηση

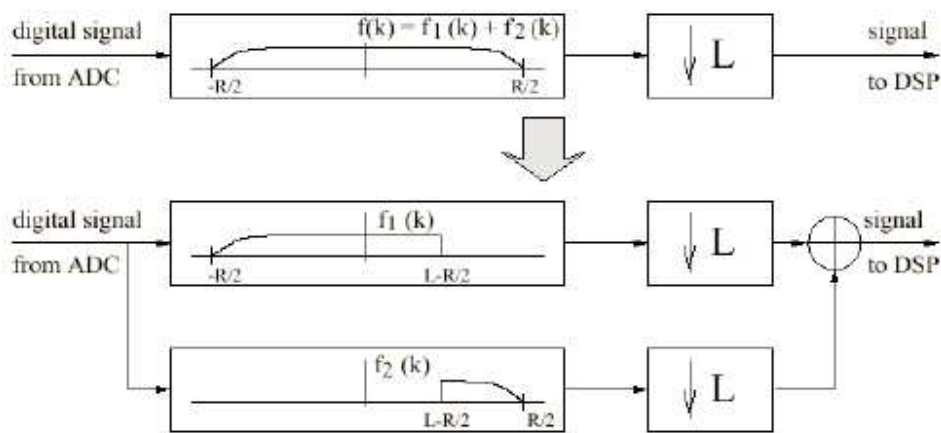
Είναι γνωστό ότι η συνέλιξη ενός σήματος  $x(t)$  με σήμα  $h(t)$  μπορεί να υλοποιηθεί με την βοήθεια της συσχέτισης του σήματος με το σήμα  $h(-t)$ . Η σχέση αυτή μεταξύ συνέλιξης και συσχέτισης γίνεται προφανής από τους ορισμούς των δυο μεγεθών:

$$y_{corr}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t + \tau)d\tau \quad (17)$$

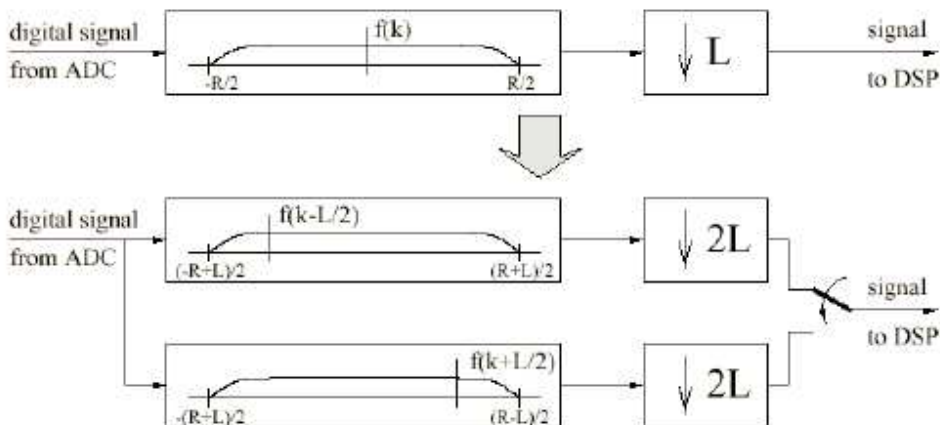
$$y_{conv}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (18)$$

Θα μπορούσε λοιπόν να συνδεθεί η λειτουργία ενός φίλτρου η οποία βασίζεται ως γνωστό στην πράξη της συνέλιξης με την τυπική λειτουργία αποεξάπλωσης η οποία βασίζεται στην συσχέτιση και να χρησιμοποιηθεί μη-εξειδικευμένο υλικό για την αποπεράτωση των δυο αυτών λειτουργιών. Καταρχήν παρατηρούμε ότι η αποσυσχέτιση σήματος με χρήση κώδικα  $c(k)$  ισοδυναμεί με την είσοδο του σήματος σε φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR – Finite Impulse Response) με κρουστική απόκριση ίση με  $c(k)$  το οποίο ακολουθείται από διάταξη που μειώνει τον ρυθμό δειγματοληψίας. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι τα στάδια της μείωσης του ρυθμού δειγματοληψίας κατά παράγοντα  $N$  και του φίλτρου επιλογής καναλιού για το σύστημα διαίρεσης συχνότητας ή του φίλτρου αποεξάπλωσης για σύστημα εξάπλωσης φάσματος μπορούν να αλλάξουν σειρά αν η κρουστικές αποκρίσεις «γεμίσουν με μηδενικά» (zero padding), αφού το φίλτρο θα λειτουργεί πλέον σε μεγαλύτερο ρυθμό. Το φίλτρο που προκύπτει, έστω  $g'(k)$  και  $c'(k)$  αντίστοιχα, μπορεί να συνδυαστεί σε ένα και μόνο φίλτρο με το anti-aliasing φίλτρο να προηγείται του σταδίου μείωσης του ρυθμού δειγματοληψίας κατά παράγοντα  $N$  στην αρχική αρχιτεκτονική. Το προκύπτον αποτέλεσμα είναι να έχει η γενική πλατφόρμα υλικού την δυνατότητα να εκτελεί και φιλτράρισμα αποκοπής καναλιού και αποεξάπλωση, πράγμα που φαίνεται στην εικόνα 41.

Αν και η παραπάνω αρχιτεκτονική είναι βολική και αρκετά γενική για τους σκοπούς του δέκτη για Software Radio, λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού από συντελεστές οι οποίοι πρέπει να υπολογιστούν για το φίλτρο δεν μπορεί να υλοποιηθεί αποτελεσματικά με τον συγκεκριμένο αριθμό συντελεστών. Αν όμως ο αριθμός των συντελεστών του φίλτρου  $R$  και ο παράγοντας μείωσης του ρυθμού δειγματοληψίας  $L$  είναι ίσοι, τότε μόνο ένα δείγμα εξόδου υπολογίζεται για  $R$  δείγματα εισόδου πράγμα που επιτρέπει την υλοποίηση του κυκλώματος με τετριμμένο τρόπο – ένα κύκλωμα πολλαπλασιασμού και ένα κύκλωμα ολοκλήρωσης. Δυστυχώς όμως στην γενική περίπτωση οι συντελεστές  $R$  και  $L$  δεν είναι ίσοι. Γενικά ισχύει  $R > L$  πράγμα που οφείλεται είτε στο πλήθος των συντελεστών που απαιτούνται για την υλοποίηση απότομου φίλτρου πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης στη περίπτωση φίλτρου καναλιού για σύστημα διαίρεσης συχνότητας, είτε στις πολλές τιμές που απαιτούνται για την συσχέτιση του σήματος με την ακολουθία των chips στην περίπτωση του συστήματος εξάπλωσης φάσματος.



(α) Υλοποίηση με χωρισμό σε υποφίλτρα

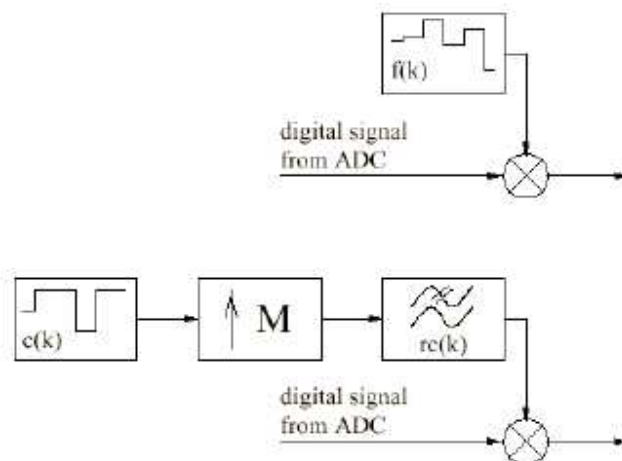


(β) Υλοποίηση με επικάλυψη υποφίλτρων

Εικόνα 42 : Υλοποίηση του φίλτρου επιλογής καναλιού και αποεξάπλωσης

Για να χρησιμοποιήσουμε την εν λόγω αρχιτεκτονική θα πρέπει να χρησιμοποιούμε συντελεστές φίλτρου λιγότερους από  $L$ . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί από την διαίρεση της συνολικής απόκρισης συχνότητας του φίλτρου, η οποία έχει μήκος  $R$  σε τμήματα μήκους  $R_{sub} \leq L$ . Η απόκριση συχνότητας, και συνεπακόλουθα το φίλτρο, χωρίζονται και αυτά σε τμήματα τα οποία εκτελούνται παράλληλα και συντίθενται όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 42α. Μια διαφορετική προσέγγιση συνίσταται στην προτιμότερη αύξηση του συντελεστή μείωσης του χρόνου δειγματοληψίας  $L$  αντί για την μείωση του αριθμού των συντελεστών του φίλτρου, πράγμα που επίσης οδηγεί στην υλοποίηση πολλών παράλληλων φίλτρων, όπως φαίνεται στην εικόνα 42β. Οι παραπάνω αρχιτεκτονικές θυμίζουν πολυφασικές υλοποιήσεις γραμμικών χρονικά αναλλοίωτων συστημάτων. Ωστόσο, η κλασική πολυφασική προσέγγιση αναλύει ένα σήμα σε διαφορετικές υποδειγματοληπτούμενες φάσεις που αποτελούν το αρχικό σήμα. Στις πολυφασικές όμως υλοποιήσεις ο ρυθμός του ρολογιού έρχεται σε trade-off με τις

απαιτήσεις από το υλικό, κάτι που δεν συμβαίνει με την παρούσα περίπτωση η οποία απλά χρησιμοποιεί παραλληλισμό. Ο κατακερματισμός και παραλληλισμός του FIR φίλτρου δεν επιφέρει πρόσθετο κόστος στο υλικό και αυτό γιατί οι λειτουργίες που εκτελούνται παράλληλα δεν έχουν διαφορετικές απαιτήσεις η μια από την άλλη όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα. Ένα πλεονέκτημα του τρόπου υλοποίησης αποτελεί η δυνατότητα που προσφέρεται για υλοποίηση rake δεκτών στους οποίους κάθε «δάκτυλο» του δέκτη μπορεί να επαναχρησιμοποιείται είτε για σύστημα διαίρεσης συχνότητας είτε για το σύστημα εξάπλωσης φάσματος. Το προσαρμοσμένο φίλτρο στα chips του συστήματος φασματικής εξάπλωσης μπορεί για παράδειγμα να είναι κοινό για όλα τα fingers του rake δέκτη. Ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί έμφαση αποτελεί ο πολλαπλασιασμός που εκτελείται στον κάθε παράλληλο κλάδο του φίλτρου. Το σήμα εισόδου πολλαπλασιάζεται με την μετατοπισμένη κρουστική απόκριση  $f(k)$  στην περίπτωση του κερματισμού της απόκρισης του φίλτρου ή με ένα μέρος της  $f(k)$  στην περίπτωση της αύξησης του παράγοντα μείωσης του ρυθμού δειγματοληψίας. Στην πρώτη περίπτωση η  $f(k)$  παράγεται ως το αποτέλεσμα της συνέλιξης αρκετών φίλτρων ενώ στην δεύτερη προκύπτει μετά από αποσυσχέτιση και συνελίξεις. Ο εν λόγω πολλαπλασιασμός μπορεί συνεπώς να εκτελεστεί όπως δείχνει η εικόνα 43. Ο τρόπος αυτός εξοικονομεί μνήμη γιατί η αποθήκευση του  $c(k)$  ή του  $h(k)$  είναι πολύ πιο εύκολη και καταλαμβάνει πολύ πιο λίγο χώρο από την αποθήκευση του  $f(k)$ .



Εικόνα 43 : Υλοποίηση της μείξης του σήματος με την έξοδο του γενικευμένου φίλτρου επιλογής καναλιού και αποεξάπλωσης

## 2.6.6 Σύνοψη

Η εφαρμογή της τεχνολογίας του Software Radio είναι εφικτή με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα υπό σχετικά χαμηλό κόστος και κατανάλωση ισχύος ακόμη και για τερματικούς σταθμούς κινητής επικοινωνίας. Αν και τεχνικές όπως η ψηφιοποίηση γενικής ζώνης συχνοτήτων δεν μπορούν να υλοποιηθούν εκ των πραγμάτων για τα συστήματα κυψελοειδούς επικοινωνίας, η ψηφιοποίηση μερικής ζώνης είναι τεχνική

υλοποιήσιμη παρά τα προβλήματα κατανάλωσης σε ισχύ και αντιμετώπισης της παρεμβολής τα οποία παρουσιάζονται. Οι αρχιτεκτονικές λύσεις υπάρχουν για την ψηφιοποίηση μερικής ζώνης με κύρια την μετατροπή του σήματος σε ενδιάμεση συχνότητα, ενέργεια που καθίσταται αναγκαία για την αντιμετώπιση της ισχύος στην συνεχή συνιστώσα. Το πλήθος των αναλογικών στοιχείων που θα περιλαμβάνει η αρχιτεκτονική εξαρτάται από το πόσο «ψηφιακό» μπορεί να είναι το σύστημα. Οι Σίγμα-Δέλτα μετατροπείς είναι ικανοί για την αποτελεσματική μετατροπή του σήματος GSM το οποίο είναι το σήμα προτύπου από το οποίο εγείρουν οι πιο ισχυροί περιορισμοί στο δυναμικό εύρος μετατροπέων. Παρόλα αυτά, η πρόοδος που επιτελείται πάνω στην έρευνα για την ανάπτυξη μετατροπέων σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό πεδίο εγγυάται ότι πολύ σύντομα θα μπορούν και άλλες τεχνολογίες μετατροπέων να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της τεχνολογίας του Software Radio. Το πλήθος των αναλογικών στοιχείων μπορεί επομένως να μειωθεί στο ελάχιστο και συνεπώς το σήμα μπορεί να υποστεί ψηφιακή επεξεργασία. Οι ρυθμοί που προκύπτουν από την επεξεργασία αυτή είναι αρκετά υψηλοί πράγμα το οποίο οδηγεί σε κατανάλωση αλλά και κόστος. Αναζητούνται τεχνικές απλής επεξεργασίας σήματος ενώ παράλληλα ερευνώνται οι τρόποι συνδυασμού των διαφορετικών λειτουργιών σε ζωνοπερατό επίπεδο. Σε βασικό επίπεδο η συνδυαστική λύση για όλες τις τεχνολογίες είναι οι επεξεργαστές ψηφιακού σήματος ή οι επεξεργαστές γενικού σκοπού ή οποιαδήποτε κατάλληλη τεχνολογία επεξεργαστών.

## Κεφάλαιο 3

### 3 Θέματα γύρω από το Cognitive Radio

#### 3.1 Cognitive radios : Το μέλλον του Software Defined Radio

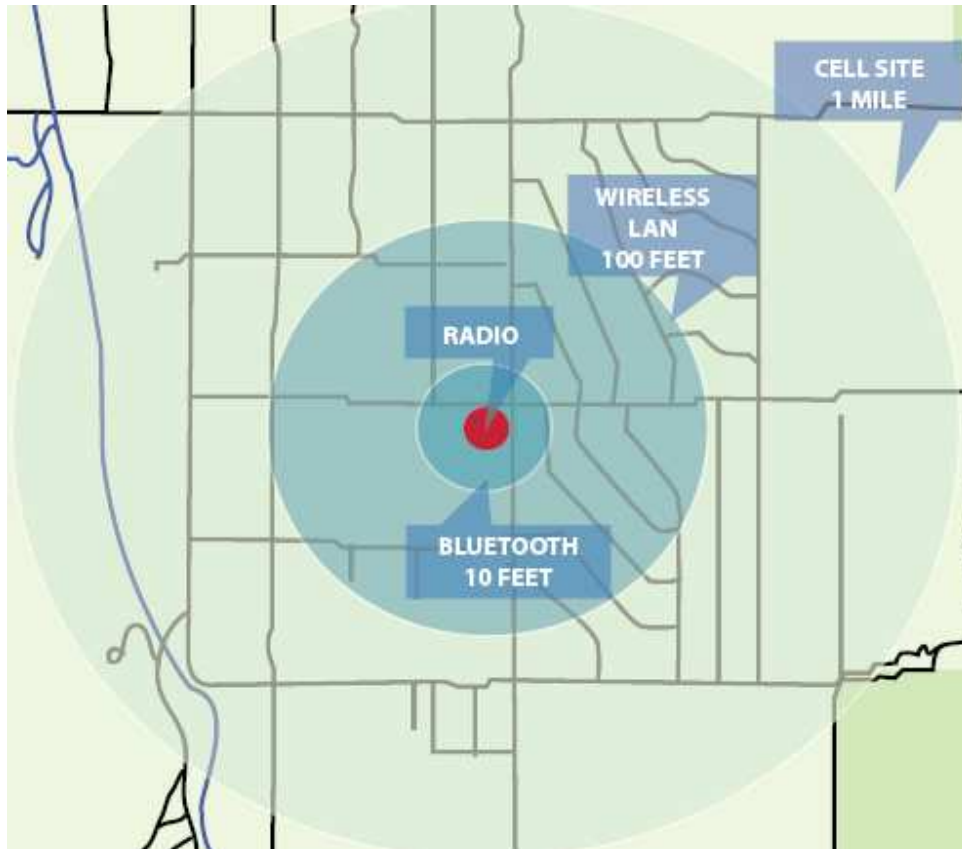
Το μέλλον των ραδιοεπικοινωνιών έγκειται στη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί μια μόνο συσκευή στο δίκτυο με άλλους τύπους συσκευών, η οποία μεγιστοποιεί το περιορισμένο εύρος ζώνης και χρησιμοποιεί ευέλικτα και προσαρμόσιμα πρωτόκολλα βασισμένα στο λογισμικό. Έτσι, το cognitive radio χρησιμοποιεί τη ραδιοτεχνολογία SDR για την ανάπτυξή του. Τα cognitive radios θα μαθαίνουν και θα εκτελούν αυτόνομα τις γνωστικές λειτουργίες ως μορφή νοημοσύνης που προέρχεται από τη δυνατότητά τους να είναι διαμορφώσιμα να αναβαθμίζονται χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό. Το SDR είναι το θεμέλιο επάνω στο οποίο το cognitive radio θα χτιστεί. Στο προηγούμενο μέρος της εργασίας έχει αναπτυχθεί εκτενώς η τεχνολογία του software defined radio. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μετάβαση από το SDR στο Cognitive Radio (CR), η τεχνολογία γύρω από το CR και τα θέματα που προκύπτουν.

##### 3.1.1 Η μετάβαση από το SDR στο CR

Το CR στηρίζεται στην τεχνολογία SDR. Αντιπροσωπεύει ένα SDR με όχι μόνο τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στη διαθεσιμότητα φάσματος, τα πρωτόκολλα, και τη διαμόρφωση του σήματος αλλά και την ικανότητα να ενημερώνεται για τις διαμορφώσεις σήματος και τα πρωτόκολλα, να προσαρμόζεται στην τοπική δραστηριότητα φάσματος, και να μαθαίνει τις τρέχουσες ανάγκες του χρήστη του. Η τεχνολογία CR επιτρέπει το ίδιο το radio να μάθει, επιτρέποντας το να εκτελέσει "γνωστικές" λειτουργίες όπως ο προσδιορισμός και η χρησιμοποίηση του κενού φάσματος για να επικοινωνεί αποτελεσματικότερα. Τα CRs θα 'αισθάνονται' και θα προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους σύμφωνα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Μόλις υπάρχει μια ενσωματωμένη μηχανή στην οποία το λογισμικό εφαρμόζει πρωτόκολλα προγραμματισμένα για αυτό, το radio είναι σε θέση να μπορεί "διαπραγματευτεί" με το περιβάλλον του. Παραδείγματος χάριν, ένα CR θα ενημερωνόταν για πολλές υπηρεσίες που θα ενδιέφεραν τον χρήστη με το να γνωρίζει τις δραστηριότητές του. Παραδείγματος χάριν, ένα CR θα μπορούσε να αντιληφθεί ένα δίκτυο Bluetooth και ποιες υπηρεσίες είναι διαθέσιμες για τον χρήστη του μέσα στη ζώνη υπηρεσιών Bluetooth.

Η ερώτηση που προκύπτει είναι πώς είναι τόσο 'έξυπνο' ένα CR; Εδώ πρέπει να αναφερθεί μια διαδικασία αποκαλούμενη βρόχος OODA (Observe, Orient, Decide, and Act) δηλαδή παρατήρηση, προσανατολισμός, απόφαση, και ενέργεια. Είναι παρόμοιο με την ανθρώπινη διαδικασία που εκτελείται καθώς παίρνουμε μια απόφαση για το πώς θα πράξουμε σε μια κατάσταση. Εκείνες οι έννοιες μπορούν να επεκταθούν για να

περιλάβουν τον προγραμματισμό και την εκμάθηση στον κύκλο γνώσης. Το CR μπορεί να κάνει πολλά από τα παραπάνω. Για παράδειγμα, μπορεί να παρατηρήσει και να προσανατολιστεί στο περιβάλλον φάσματος και να αποφασίσει και να ενεργήσει με βάση ορισμένες ανάγκες και επιθυμίες του χρήστη. Η ακαδημαϊκή έρευνα, η βιομηχανική έρευνα, και η κρατική έρευνα θα συνθέσουν νέα πρωτόκολλα και τεχνολογίες υπό μορφή λογισμικού που ενσωματώνει το CR. Τα SDRs και τα CRs πρέπει να χρησιμοποιήσουν τους κανόνες συμπεριφοράς (etiquettes) για να ξέρουν πότε είναι αρμόζον να αλληλεπιδράσουν και πώς να αλληλεπιδράσουν με το περιβάλλον τους.



Εικόνα 44 : Οι «γνώσεις» ενός CR

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα δεδομένα που αισθάνεται ένα CR. Αυτά είναι η

- τοποθεσία του CR,
- ποιες υπηρεσίες είναι διαθέσιμες,
- εύρεση και χρησιμοποίηση του άδειου φάσματος δυναμικά,
- ποιες υπηρεσίες ενδιαφέρουν τον χρήστη και πώς θα τις βρει
- εφαρμογή Model Based Reasoning σχετικά με τις ανάγκες του χρήστη και το περιεχόμενο του περιβάλλοντος



### 3.1.2 Υποδομή και drivers για την τεχνολογία CR

Οι ουσιαστικές τεχνολογίες στην εξέλιξη του SDR σε CR περιλαμβάνουν τους DSPs που, μεταξύ άλλων λειτουργιών, διαχειρίζονται τη διαμόρφωση, την κρυπτογραφία, τα πρωτόκολλα, και την κωδικοποίηση πηγής για τη φωνή, τα δεδομένα και εικόνα. Υψηλής πυκνότητας FPGAs επιτρέπουν την αναδιαμόρφωση και είναι υπεύθυνα για την αλλαγή της κυματομορφής και τη ρύθμιση των χαρακτηριστικών απόδοσης, συχνότητας και άλλων ιδιοτήτων. Οι επεξεργαστές γενικής χρήσης (General Purpose Processors-GPPs) διαχειρίζονται πιο σύνθετους έλεγχους modem και περιβάλλοντος που περιλαμβάνουν την αρχιτεκτονική λογισμικού επικοινωνιών (Software Communications Architecture-SCA), την Common Object Request Broker Architecture-CORBA, και το λειτουργικό σύστημα RTOS (Real-Time Operating System). Τα GPPs αυξάνουν σημαντικά την ταχύτητα επεξεργασίας περιορίζοντας παράλληλα την κατανάλωση ισχύος στο ελάχιστο. Το επόμενο βήμα στο CR είναι η εφαρμογή δύο βασικών επικοινωνιακών ετικετών : η συνειδητοποίηση της υποδομής και του φάσματος. Αυτές οι δύο ετικέτες θα καθορίζουν πότε είναι αρμόζον να αλληλεπιδράσει και πώς να αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον επικοινωνίας το "έξυπνο" μέρος του γνωστικού ραδιοφώνου.

Η υποδομή υποστηρίζει τη δυνατότητα του radio να διαχειρίζεται πολιτικές, όπως είναι οι ρυθμίσεις (όπως η FCC) που καθορίζουν τις απαιτήσεις χρηστών σχετικά με ποιες συχνότητες είναι διαθέσιμες, τα επίπεδα ισχύος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τις άδειες διαμόρφωσης και πρόσβασης. Ιστορικά, η υποδομή έχει αποδειχθεί ένα ισχυρό εργαλείο στη βελτίωση της απόδοσης συστημάτων επικοινωνιών, ιδιαίτερα για τα διακλαδωμένα radios, τον κυψελοειδή δανεισμό φάσματος, και την πολλαπλή πρόσβαση. Η πιο κοινή υποδομή είναι η Demand Assigned Multiple Access (DAMA).

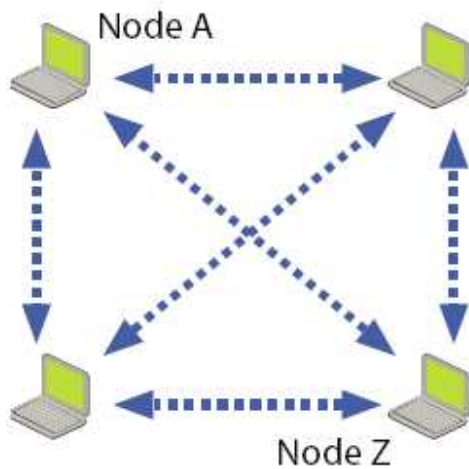
Η 'γνώση' του φάσματος είναι βασισμένη στην ορθογωνιότητα δηλαδή οι κυματομορφές έχουν ως σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την παρέμβαση μεταξύ των πολλαπλάσιων χρηστών. Η διαφοροποίηση των κυματομορφών (Waveform differentiation) μπορεί να βρεθεί στον χρόνο, τη συχνότητα, τον κώδικα, τη διαμόρφωση, και τη τεχνική διαμόρφωσης του σήματος κεραίας. Η ορθογωνιότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις στρατιωτικές εφαρμογές, όπως το DMR (Digital Modular Radio) του ναυτικού στις ΗΠΑ. Το DMR είναι ένα αναδιαμορφώσιμο επικοινωνιακό σύστημα που βελτιώνει τη ικανότητα του ναυτικού να επικοινωνήσει με διαφορετικά radios. Στην εικόνα 45, το DMR μπορεί να προσδιορίσει διάφορα υπάρχοντα σήματα με βάση τη συχνότητα, το φάσμα και τον χώρο. Προσδιορίζει τον τύπο συχνότητας και διαμόρφωσης του σήματος και παρακολουθεί το σήμα. Στην κορυφή της οθόνης στην εικόνα, υπάρχει μια πράσινη και κόκκινη μπάρα. Τα επίπεδα δραστηριότητας των σημάτων από τα τελευταία 10 δευτερόλεπτα μετριοούνται, παρέχοντας έναν τρόπο να προσδιοριστεί ένα κατειλημμένο ή μη κατειλημμένο κανάλι. Όταν ο χρήστης απελευθερώνει το κανάλι, είναι αμέσως ελεύθερο για έναν άλλο χρήστη στην ίδια συχνότητα. Η ορθογωνιότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική εξετάζοντας τον αριθμό των κυματομορφών που συνδέονται με τις στρατιωτικές επικοινωνίες.



Εικόνα 45 : Παράδειγμα DMR

### 3.1.3 Οι λειτουργίες του CR

Για να ανακεφαλαιώσουμε, η αποδοτικότητα φάσματος βελτιστοποιεί τη ραδιοαπόδοση από διάφορους παράγοντες βασισμένους στην ορθογωνιότητα στις διαστάσεις του χρόνου, της συχνότητας, του κώδικα, ή της διαμόρφωσης. Το cognitive radio θα είναι επίσης ικανό να αισθάνεται, να αποφασίζει και να δρα στις τρέχουσες καταστάσεις. Πάρτε, παραδείγματος χάριν, ένα ad hoc δίκτυο, το οποίο είναι μια δημοφιλής και κυρίαρχη δικτυακή αρχιτεκτονική (εικόνα 46). Για ένα ad hoc δίκτυο, όταν ο κόμβος "A" επιθυμεί να επικοινωνήσει με τον κόμβο "Z" δεν χρειάζεται να παράγει ένα σήμα μετάδοσης αρκετά ισχυρό για να καλύψει ολόκληρη απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων. Αντίθετα, ο κόμβος "A" στέλνει ένα σήμα αρκετά ισχυρό ώστε να επικοινωνήσει με έναν διαθέσιμο κόμβο που είναι κατά μήκος του μονοπατιού του "Z", γεγονός που μειώνει την ισχύ και εξοικονομά ενέργεια. Με κίνηση κατά μήκος του μονοπατιού από ανοικτό κόμβο προς ανοικτό κόμβο, οι πληροφορίες παρακάμπτουν τις πιθανές καθυστερήσεις που προκαλούνται από τη μετάδοση περιμένοντας τους απασχολημένους κόμβους να διατεθούν.



Εικόνα 46 : Επικοινωνία δύο κόμβων μέσω μονοπατιού

Επιπλέον, τα CRs γνωρίζουν λεπτομέρειες για τη δομή του δικτύου όπως το φυσικό περιβάλλον που περιλαμβάνει τις συνδέσεις δεδομένων και τα στρώματα μεταφοράς και διαχείρισης. Η εικόνα 47 παρέχει ένα παράδειγμα μιας λίστας πρωτοκόλλου και επεξηγεί τη λειτουργικότητα και το γεφύρωμα των υπάρχοντων δικτύων επικοινωνίας. Η γνώση της ακριβής θέσης του τερματικού είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα για τις διεθνείς επικοινωνίες. Αυτή η γνώση δίνει τη δυνατότητα στο radio να "διακριθεί" η τοπική υποδομή ή η πολιτική, οι πομποί και οι δέκτες, τα κανάλια διάδοσης και η θέση των μελών δικτύων.

FTP, TFTP		TELNET		SMTP		TNS	
BGP		SNMP		MIB Extensions		BOOTP	
TCP						UDP	
IPSO, ICMP, IGMP, SDB, Tailored SNDCEF							
Mii-STD-188-220		X.25/x.75 inc ADDSI			Mii STD 110A	Mii STD 141A	IP-SDR
Mii-STD-188-220		HDLC-LAPB/LAPD			Mii STD 110A	Mii STD 141A	HDLC LAPB/LAPD
RENAD Layer	HQ-II-NAD Layer	EPLRS NAD Layer	Non-DAMA Access Layer	Non-DAMA Access Layer	Mii STD 110A	Mii STD 141A	WNW MAC
Sincgars SIP	Havequick II	EPLRS VHSIC	WB TACSAT	SATCOM DAMA	HF Modem	HF ALE	WNW Like

Εικόνα 47 : Λίστα πρωτοκόλλου

Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί, ένα αεριωθούμενο αεροπλάνο της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ που πετά πάνω από τον ευρωπαϊκό εναέριο χώρο. Κάθε χώρα έχει διαφορετικά πρότυπα, συχνότητες και πρωτόκολλα επικοινωνίας. Με ένα cognitive radio, το σχέδιο πτήσης είναι προγραμματισμένο στο radio, και ακριβώς όπως το GPS λέει στον πιλότο πού είναι, το radio θα υιοθετούσε τις αρχιτεκτονικές επικοινωνίας του εναέριου χώρου σε όλη την πτήση - χωρίς pilot interface.

Επιπρόσθετα, πρέπει να αναφερθεί η δυνατότητά του να καταλάβει τις λειτουργικές απαιτήσεις ενός χρήστη. Μέσω του λογισμικού, το cognitive radio θα μπορούσε να παραπέμψει την τάξη του χρήστη, το ρόλο, και τις απαιτήσεις πρόσβασης μαζί με τις βάσεις δεδομένων και τα δίκτυα που απαιτήθηκαν για να ολοκληρώσουν τις κανονικές λειτουργούσες υποχρεώσεις, κρατώντας κατά συνέπεια πληροφορίες σύμφωνες με την θέληση του χρήστη. Οι πρόσθετες δυνατότητες του CR θα επικύρωναν και θα πιστοποιούσαν την πρόσβαση συστημάτων. Κάτι τέτοιο μπορεί να ολοκληρωθεί over-the-air είτε με τη θέληση του χρήστη ή του διαχειριστή. Στη συνέχεια, η αναγνώριση ομιλίας και γλώσσας μπορεί να προστεθεί. Αυτό είναι ένα συστατικό της λειτουργικής γνώσης όπου το radio καταλαβαίνει το συντακτικό και σημασιολογικό πλαίσιο του διαλόγου και μπορεί να κυμανθεί μεταξύ του κειμένου και της ομιλίας. Κλείνοντας, η υποστήριξη και η διατήρηση της ασφάλειας επικοινωνιών είναι επίσης κρίσιμες για την προστασία του προσωπικού και των δεδομένων. Οι εργασίες του SDRF, με τις σχετικές ομάδες εργασίας και τις επιτροπές της, θα φέρουν τις τεχνολογίες και τις σχετικές πολιτικές που είναι απαραίτητες για το CR στην τυποποίηση και την πραγματικότητα.

Στη συνέχεια, εμβαθύνουμε στην τεχνολογία του cognitive radio και σε ζητήματα που προκύπτουν.

## 3.2 Ορίζοντας το Cognitive Radio

Ενώ η κοινότητα του CR είχε σημαντική επιτυχία διαδίδοντας την έννοια των cognitive radio και αναπτύσσοντας πολλές εφαρμογές και πρωτότυπα, παράλληλα υπήρξε μια δύσκολη περίοδος σχετικά με ακριβώς τι είναι και δεν είναι ένα cognitive radio. Ταυτολογικά, ένα cognitive radio θα μπορούσε να οριστεί ως "ένα radio που γνωρίζει," ή παραφράζοντας τον Καρτέσιο, "Cogitat, ergo est cognitive radio", δηλαδή σκέφτεται, επομένως είναι cognitive radio. Στο έγγραφο του 1999 που έπλασε αρχικά τον όρο "cognitive radio", ο Joseph Mitola καθορίζει ένα cognitive radio ως: "Ένα radio που χρησιμοποιεί λογικές βασισμένες σε πρότυπα για να επιτύχει ένα διευκρινισμένο επίπεδο ικανότητας στις ραδιο-σχετικές περιοχές." Εντούτοις, ο Simon Haykin καθορίζει ένα cognitive radio ως: "Ένα ευφυές ασύρματο σύστημα επικοινωνιών που γνωρίζει το περιβάλλον του (δηλαδή τον εξωτερικό κόσμο) και χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία που μαθαίνει από το περιβάλλον (understanding-by-building) και προσαρμόζει τις παραμέτρους του στις στατιστικές αλλαγές στα εισερχόμενα ερεθίσματα RF (π.χ., ισχύς εκπομπής, συχνότητα του φέροντος, και στρατηγική διαμόρφωσης) στον πραγματικό χρόνο, με δύο αρχικούς στόχους: ιδιαίτερα αξιόπιστες επικοινωνίες όποτε και οπουδήποτε χρειάζονται και αποδοτική χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος. Συνεχίζοντας, σύμφωνα με την FCC το CR πρόκειται για ένα radio που μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους εκπομπής με βάση την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του. Η ITU παραθέτει τον παρακάτω ορισμό: " Ένα radio ή ένα σύστημα που αισθάνεται το περιβάλλον του και αντιδρά αυτόνομα και δυναμικά στις αλλαγές του". Η IEEE αναφέρεται στο CR ως ένα πομπό ή δέκτη που σχεδιάζεται έτσι ώστε να εντοπίζει έξυπνα εάν ένα συγκεκριμένο τμήμα του ραδιοφάσματος είναι αυτήν την περίοδο σε χρήση, και να χρησιμοποιήσει το προσωρινά αχρησιμοποίητο φάσμα πολύ γρήγορα, χωρίς παρεμπόδιση στις μεταδόσεις άλλων εξουσιοδοτημένων χρηστών. Το SDR Forum το καθορίζει ως ένα προσαρμοστικό, ενήμερο και αυτόνομο σύστημα που μαθαίνει από την εμπειρία του και σκέφτεται, σχεδιάζει και αποφασίζει τις μελλοντικές ενέργειες ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των χρηστών.

Τελικά, όλοι οι παραπάνω ορισμοί παραθέτουν τα εξής χαρακτηριστικά για το CR:

- Παρατήρηση : Το radio συλλέγει συνέχεια πληροφορίες για το περιβάλλον γύρω του
- Προσαρμοστικότητα : Μπορεί να αλλάζει την κυματομορφή του σήματος.
- Ευφυΐα : Είναι ικανό να εφαρμόζει αλλαγές μόνο του για την επίτευξη ενός στόχου.

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι λειτουργίες του cognitive radio με βάση τους παραπάνω ορισμούς :

Πίνακας 5 : Πίνακας ορισμών του Cognitive Radio

Definer	Adapts (Intelligently)	Autonomous	Can sense Environment	Transmitter	Receiver	“Aware” Environment	Goal Driven	Learn the Environment	“Aware” Capabilities	Negotiate Waveforms	No interference
FCC	•	•	•	•							
Haykin	•	•	•	•	•	•	•	•			
IEEE 1900.1	•	•	•	•	•						
IEEE USA	•	•	•	•	•	•					•
ITU-R	•	•	•	•	•	•					
Mitola	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
NTIA	•	•	•	•	•	•	•				
SDRF CRWG	•	•	•	•	•		•				
SDRF SIG	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
VT CRWG	•	•	•	•	•	•	•	•	•		

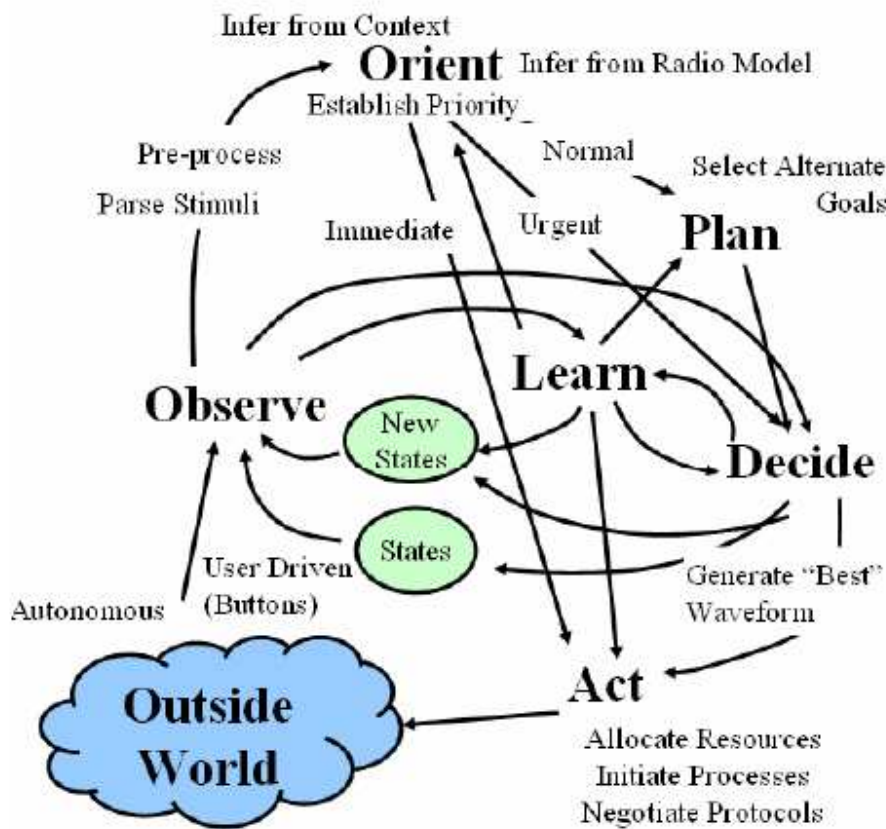
### 3.2.1 Υλοποίηση και προτυποποίηση του Cognitive Radio

Οι διαφορές στους ορισμούς για το CR μπορούν να αποδοθούν κατά ένα μεγάλο μέρος στις διαφορές στις προσδοκίες της λειτουργίας που ένα CR θα έχει. Στη διατριβή του, ο Joseph Mitola εξετάζει τα εννέα επίπεδα της αυξανόμενης ραδιολειτουργίας που παρουσιάζεται στον πίνακα 6, που κυμαίνεται από ένα software radio ως ένα σύνθετο self-aware radio.

Πίνακας 6 : Επίπεδα λειτουργιών του Cognitive Radio

Level	Capability	Comments
0	Pre-programmed	A software radio
1	Goal Driven	Chooses Waveform According to Goal. Requires Environment Awareness.
2	Context Awareness	Knowledge of What the User is Trying to Do
3	Radio Aware	Knowledge of Radio and Network Components, Environment Models
4	Capable of Planning	Analyze Situation (Level 2& 3) to Determine Goals (QoS, power), Follows Prescribed Plans
5	Conducts Negotiations	Settle on a Plan with Another Radio
6	Learns Environment	Autonomously Determines Structure of Environment
7	Adapts Plans	Generates New Goals
8	Adapts Protocols	Proposes and Negotiates New Protocols

Αναφορικά με το πώς ένα CR θα μπορούσε να επιτύχει αυτά τα επίπεδα λειτουργίας, ο Mitola εισάγει τον κύκλο γνώσης (cognition circle), που παρουσιάζεται στην εικόνα 48, ως "βρόχος ελέγχου υψηλού επιπέδου για το CR." Στον κύκλο της γνώσης, ένα radio λαμβάνει πληροφορίες για το λειτουργικό περιβάλλον του (Outside world) μέσω της άμεσης παρατήρησης ή μέσω της σηματοδότησης. Αυτές οι πληροφορίες αξιολογούνται έπειτα (Oriented) για να καθορίσουν τη σημασία της. Με βάση αυτήν την αξιολόγηση, το radio καθορίζει τις εναλλακτικές λύσεις του (Plan) και επιλέγει μια εναλλακτική λύση (Decide) με έναν τρόπο που πιθανώς θα βελτιώνει την αξιολόγηση. Υποθέτοντας ότι μια αλλαγή στην κυματομορφή κρίθηκε απαραίτητη, το radio κατόπιν εφαρμόζει την εναλλακτική λύση (Act) με τη ρύθμιση των πόρων του και την εκτέλεση της κατάλληλης σηματοδότησης. Αυτές οι αλλαγές απεικονίζονται έπειτα στο σχεδιάγραμμα παρέμβασης που παρουσιάζεται από το CR στον εξωτερικό κόσμο. Ως τμήμα αυτής της διαδικασίας, το radio χρησιμοποιεί αυτές τις παρατηρήσεις και αποφάσεις να βελτιωθεί η λειτουργία του ιδίου (Learn), ίσως με την παραγωγή νέων εναλλακτικών λύσεων ή τη δημιουργία των νέων αξιολογήσεων.



Εικόνα 48 : Ο κύκλος «γνώσης» του Joseph Mitola

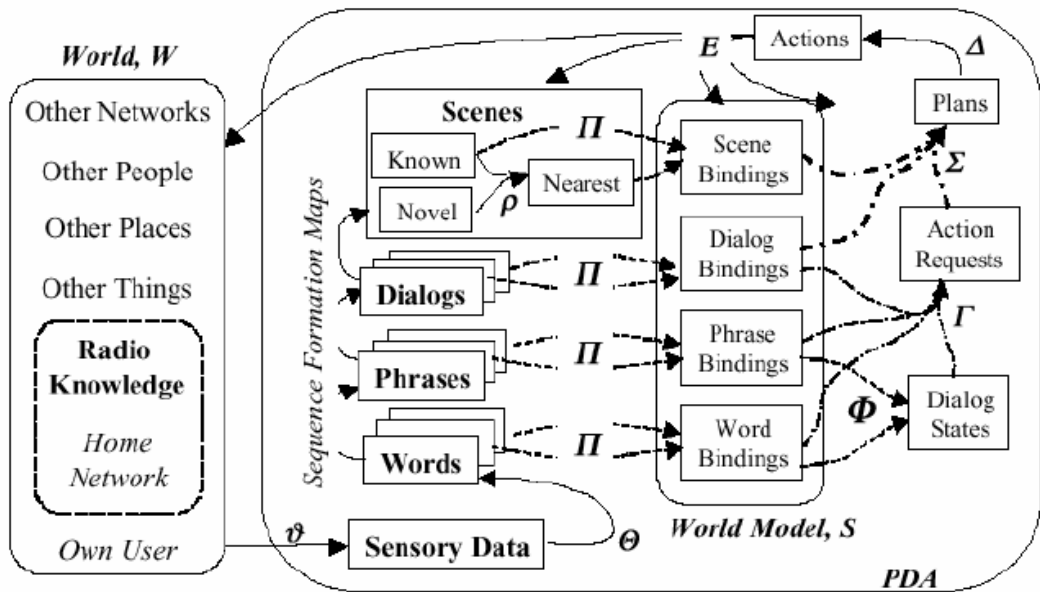
### 3.2.2 Παραδείγματα cognitive radios

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μερικά radios όπως το CR1, το xG της DARPA, και το biologically inspired cognitive radio.

#### I. CR1

Το CR1 ή cognitive radio 1 είναι η αρχιτεκτονική του CR που αναπτύχθηκε από τον Mitola ως τμήμα της διατριβής του. Το CR1 χρησιμοποιεί το case-based και natural language reasoning που καθοδηγείται από έναν βρόχο OODA και μια οντολογική περιγραφή των ικανοτήτων του radio (Radio Knowledge Representation Language) για να καθοριστούν οι προσαρμογές του radio.

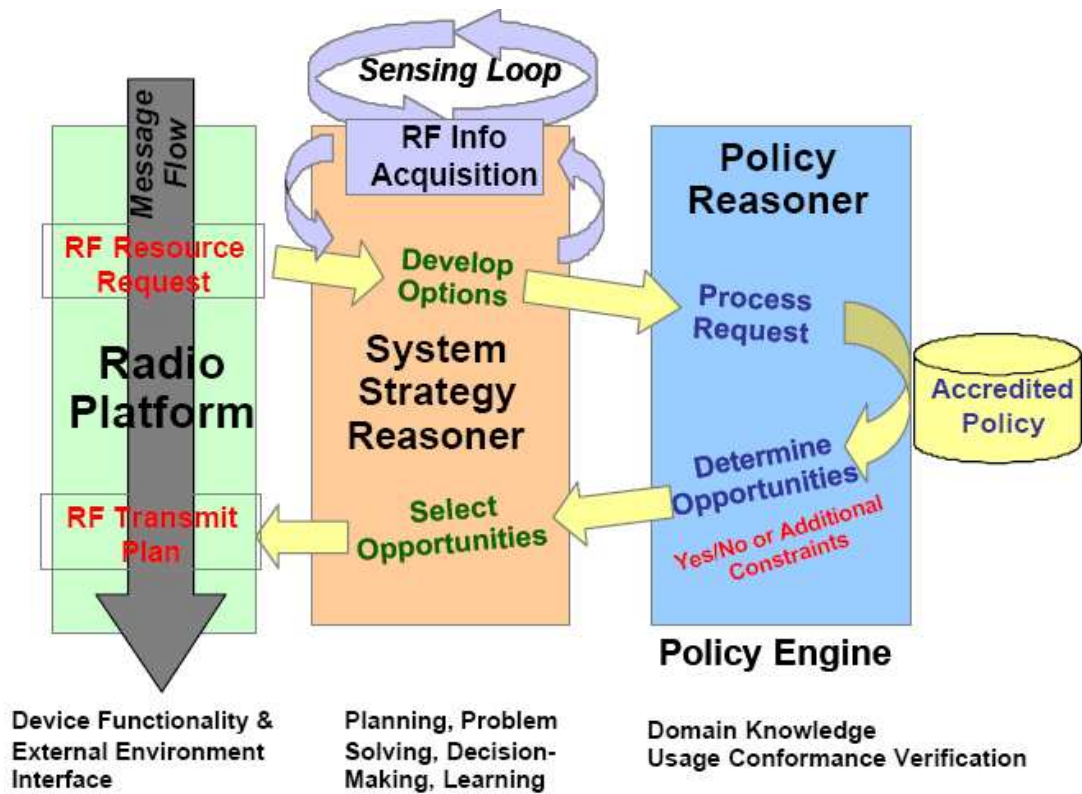




Εικόνα 49 : Αρχιτεκτονική της CR1 Natural Language

## II. xG

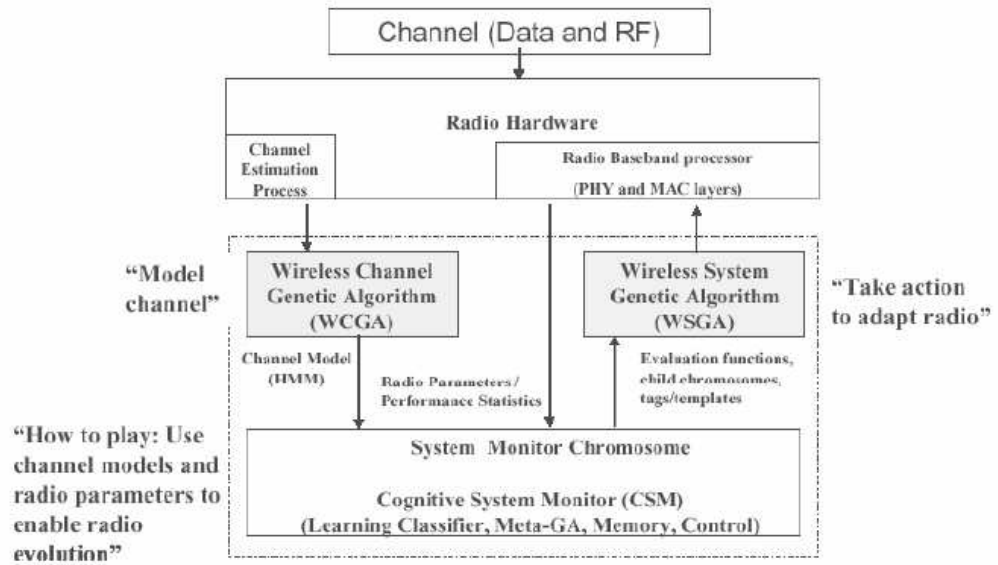
Το πρόγραμμα DARPA xG ακολουθεί μια εφαρμογή των cognitive radios που ενσωματώνουν ontological reasoning στη διαδικασία απόφασης. Μια γενική αρχιτεκτονική για το radio τους παρουσιάζεται στην εικόνα 50 όπου ο έλεγχος λογισμικού ασκείται μέσω της ραδιοπλατφόρμας (που κατασκευάζεται από ένα SDR). Σημειώστε ότι το radio τους περιλαμβάνει πραγματικά δύο διαφορετικές μηχανές συλλογισμού - μια που αφιερώνονται στην πολιτική και μια που αφιερώνεται στην κυματομορφή.



Εικόνα 50 : Αρχιτεκτονική του xG της DARPA

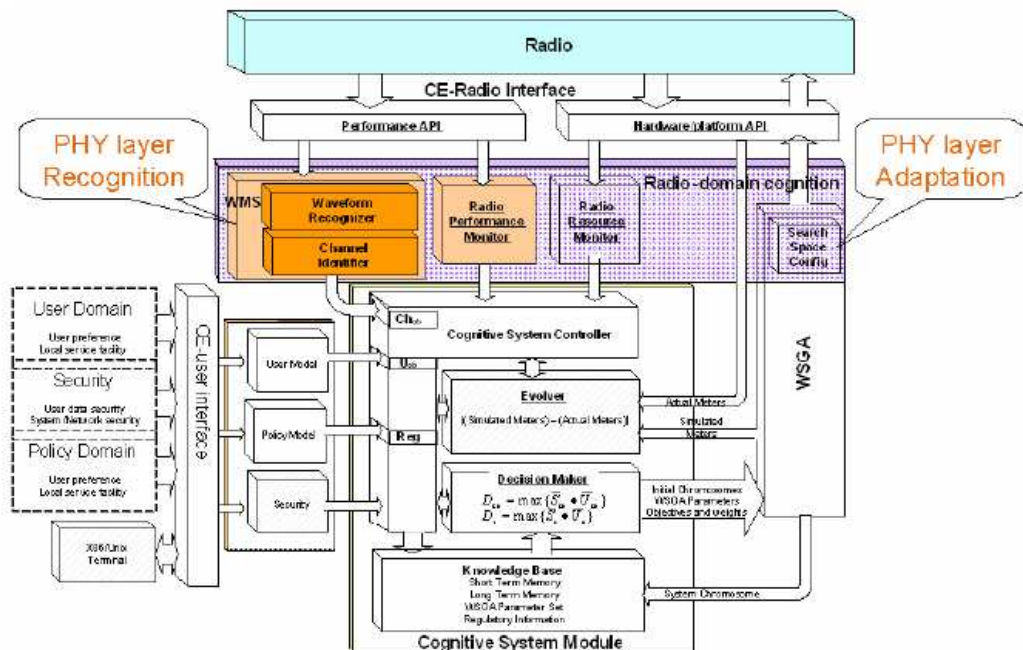
### III. Biologically Inspired Cognitive Radio

Αυτό το CR χρησιμοποιεί μετρήσεις του καναλιού για να φτιάξει ένα κρυφό Μαρκοβιανό μοντέλο του περιβάλλοντός του. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται έπειτα από έναν γενετικό αλγόριθμο για να προβλέψει εσωτερικά την απόδοση των διαφορετικών συνδυασμών τμημάτων κυματομορφής για τις συνθήκες του καναλιού.



Εικόνα 51 : Αρχιτεκτονική του Biologically Inspired Cognitive Radio

Η αρχιτεκτονική αυτή έχει ενημερωθεί έκτοτε (βλ. εικόνα 52) για τη χρήση σε ένα software radio. Αυτή η ενημερωμένη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τώρα υποστήριξη για την πολιτική, ταξινόμηση των σημάτων μέσω νευρωνικών δικτύων, και προσανατολισμένων προς τον χρήστη πληροφοριών.



*Εικόνα 52 : Ενημερωμένη αρχιτεκτονική του Biologically Inspired Cognitive Radio*

### 3.2.3 Πρότυπα και ανάπτυξη του Cognitive Radio

Η κοινότητα της IEEE 802 αναπτύσσει αυτήν την περίοδο δύο πρότυπα που αφορούν άμεσα το CR - 802.22 και 802.11h. Επιπλέον, το 802.11k αναπτύσσει τις τεχνικές για να ενσωματώσει τις πληροφορίες διαχείρισης των πόρων σε λειτουργία WLAN, ουσιαστικά ενσωματώνοντας τη γνώση για το περιβάλλον και τα radios.

#### 1) 802.22

Υπάρχουν τρεις εφαρμογές που συζητούνται χαρακτηριστικά για τη συνύπαρξη με τις αρχικές δοκιμαστικές επεκτάσεις των CRs: τηλεόραση, μικροκυματικές συνδέσεις από σημείο σε σημείο, και κινητό radio εδάφους. Κάθε μια από αυτές τις εφαρμογές έχει παρουσιαστεί να υποχρησιμοποιεί εντυπωσιακά το φάσμα κατά μέσον όρο. Εντούτοις, μόνο τα τηλεοπτικά σήματα έχουν το πλεονέκτημα των επιβεβλημένων σημάτων που είναι εύκολο να ανιχνευθούν (σε αντιδιαστολή με τις μικροκυματικές συνδέσεις από σημείο σε σημείο).

Σε όλη την ιστορία τους, οι UHF ζώνες συχνότητας διατέθηκαν ως ρυθμιστές υποεκτιμώντας την οικονομική αποτελεσματικότητα της καθιέρωσης των νέων πύργων TV σε αυτές τις ζώνες. Πριν από την εμφάνιση της καλωδιακής τηλεόρασης στις ΗΠΑ, οι μικρότεροι σταθμοί TV δεν ήταν ικανοί να έχουν οικονομικώς αποδοτική λειτουργία. Τώρα με την εισαγωγή της τεχνολογίας HDTV, οι ρυθμιστές σχεδιάζουν να αναγκάσουν μια αλλαγή σε εθνικό επίπεδο σε αυτήν την αποδοτικότερη διαμόρφωση μέχρι το 2009 .

Έτσι, η ομάδα εργασίας του 802.22 ακολουθεί την ανάπτυξη μιας κυματομορφής που προορίζεται για να παρέχει την υψηλή πρόσβαση ευρείας ζώνης στις αγροτικές περιοχές χρησιμοποιώντας τις έξυπνες ραδιοτεχνικές. Σε μια έκθεση που παρουσιάζεται στη DySPAN, δηλώνεται ότι τα 802.22 πρότυπα σκοπεύουν να επιτύχουν απόδοση φάσματος μέχρι 3 bits/sec/Hz που αντιστοιχούν σε ρυθμούς peak download στην άκρη κάλυψης σε 1,5 Mbps. Ταυτόχρονα, το 802.22 σύστημα ελπίζει να επιτύχει μέχρι και 100 χλμ στην κάλυψη.

Ενώ το PHY και το MAC είναι ακόμα υπό ανάπτυξη, το MAC θα παράσχει τις γνωστικές ικανότητες δεδομένου ότι διαχειρίζεται την πρόσβαση στο φυσικό μέσο, το οποίο είναι υπεύθυνο να εγκαταλείψει γρήγορα ένα κανάλι όπως απαιτείται. Τα πρότυπα υπό ανάπτυξη έχουν διευκρινίσει τα ακόλουθα κατώφλια για την εγκατάλειψη ενός καναλιού για τα ακόλουθα σήματα:

- ψηφιακή TV: -116 dBm σε κανάλι 6 MHz
- αναλογική TV : -94 dBm στην αιχμή του φέροντος NTSC εικόνων (National Television System Committee)
- ασύρματο μικρόφωνο : -107 dBm σε ένα εύρος ζώνης 200 kHz.

Κατά συνέπεια αυτά τα radios θα πρέπει να ανιχνεύουν και να ταξινομούν τα σήματα στο περιβάλλον τους. Για να ελαχιστοποιήσει την παρέμβαση που προκαλείται σε αυτά τα σήματα, το 802.22 πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τους πίνακες χρήσης φάσματος που θα ενημερώνονται και αυτόματα αλλά και από το χειριστή συστημάτων. Για να περιορίσουν τον αντίκτυπο όταν τα συστήματα αποτυγχάνουν να ανιχνεύσουν τα επιβεβλημένα συστήματα, τα πρότυπα θέτουν επίσης μέγιστα όρια ισχύος μετάδοσης και τα εκτός ζώνης όρια εκπομπής.

## 2) 802.11h

Σε αντίθεση με το 802.22, το 802.11h δεν διατυπώνεται ως cognitive radio πρότυπο. Εντούτοις, το φόρουμ World Wireless Research έχει σημειώσει ότι μια βασική μερίδα του 802.11h πρωτοκόλλου - η δυναμική επιλογή συχνότητας - έχει χαρακτηριστεί ως μια "cognitive λειτουργία". Για να δούμε γιατί ένα 802.11h WLAN μπορεί να θεωρηθεί ως cognitive radio, θα παραθέσουμε τις απαιτήσεις του πρωτοκόλλου 802.11h από ένα WLAN, οι οποίες είναι:

- **Observation:** Το 802.11h απαιτεί τα WLANs για να υπολογίσει τα χαρακτηριστικά καναλιών όπως η απώλεια πορειών και το περιθώριο συνδέσεων
- **Orientation:** Βασισμένο σε αυτές τις παρατηρήσεις, το WLAN πρέπει να καθορίσει εάν λειτουργεί στην παρουσία μιας εγκατάστασης ραντάρ, σε ένα κακό κανάλι, σε δορυφορική ζώνη συχνοτήτων, ή στην παρουσία άλλων WLANs.
- **Decision:** Βασισμένο στην κατάσταση που βρίσκεται το WLAN, το WLAN πρέπει να αποφασίσει να αλλάξει τη συχνότητα λειτουργίας του (Dynamic Frequency Selection), να ρυθμίσει την ισχύ μετάδοσης (Transmit Power Control), ή και τα δύο συγχρόνως
- **Action:** το WLAN πρέπει μετά από τα παραπάνω να εξάγει την σωστή απόφαση.

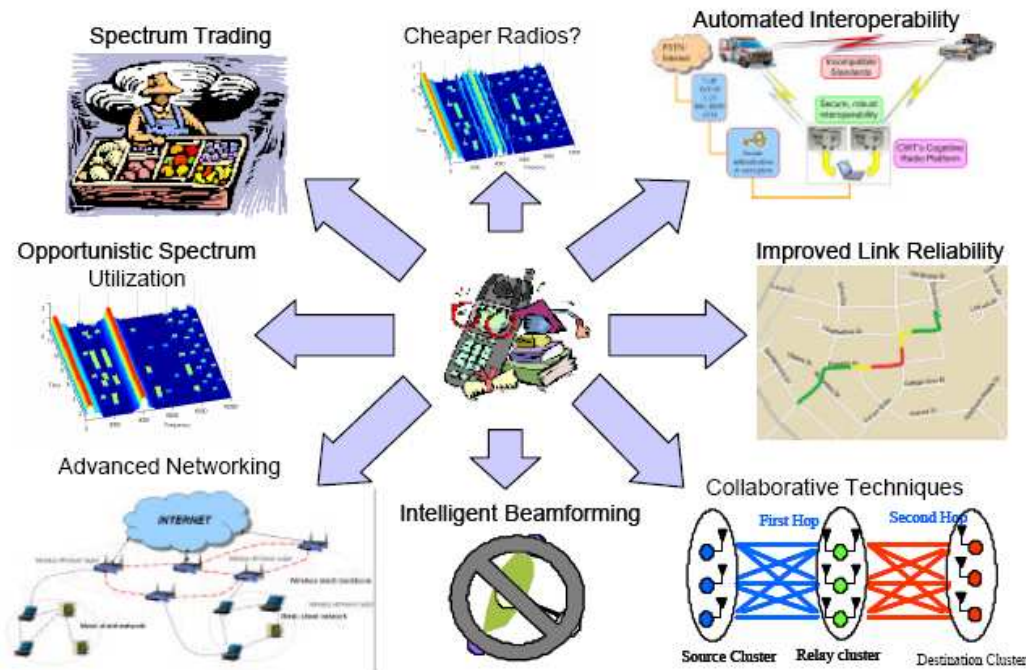
Ανακεφαλαιώνοντας τα περισσότερα από τα ανωτέρω, εάν κινηθούμε πέρα από τις απαιτήσεις των προτύπων προς τις αναμενόμενες εφαρμογές, φαίνεται λογικό ότι πολλοί προμηθευτές θα λάβουν υπόψιν τις προηγούμενες παρατηρήσεις και θα ικανοποιηθούν οι ορισμοί για το cognitive radio.

### 3.2.4 Εφαρμογές Cognitive Radio

Οι εφαρμογές συμπεριλαμβάνονται συχνά στον καθορισμό του cognitive radio λόγω των μοναδικών εφαρμογών που διατίθενται από το CR. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές τεχνικές SDR που το cognitive radio αναμένεται να ενισχύσει. Στη συνέχεια, εξετάζονται τεχνικές και εφαρμογές που σχετίζονται με τα εξής:

- Βελτίωση χρησιμοποίησης φάσματος και απόδοσης
- Βελτίωσης αξιοπιστίας σύνδεσης
- Λιγότερο ακριβά radios
- Προηγμένες δικτυακές τοπολογίες

- Ενίσχυση τεχνικών SDR
- Αυτοματοποιημένη διαχείριση των ραδιοπόρων

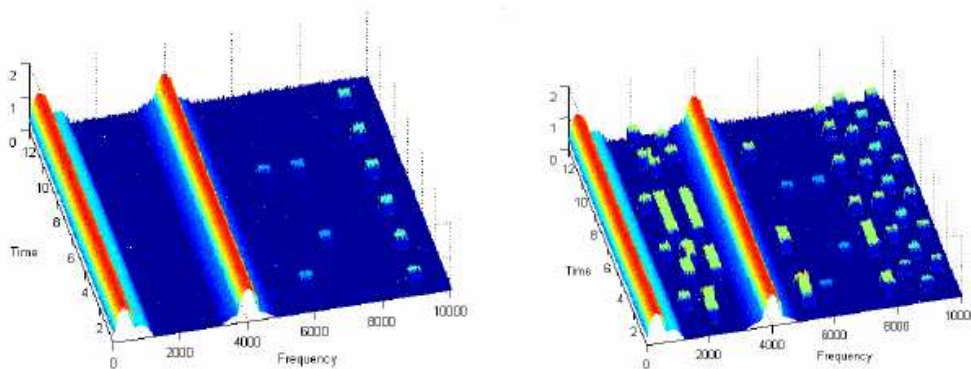


Εικόνα 53 : Εφαρμογές Cognitive Radio

## 1. Βελτίωση της χρησιμοποίησης φάσματος και της απόδοσης

Οι ασύρματες τεχνολογίες και οι ασύρματες συσκευές έχουν πολλαπλασιαστεί κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας αυξάνοντας έτσι εντυπωσιακά τη ζήτηση για ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Λόγω της τρέχουσας προσέγγισης στην πρόσβαση φάσματος, η παροχή φάσματος δεν έχει συμβαδίσει με την απαίτηση φάσματος που οδηγεί στην εμφάνιση της έλλειψης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Εντούτοις, η έρευνα που εκτελείται από τις διάφορες οντότητες όπως η FCC δείχνει ότι αυτή η υπόθεση είναι μακριά από την πραγματικότητα αφού υπάρχει διαθέσιμο φάσμα δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος διατιθέμενου είναι υποχρησιμοποιούμενο.

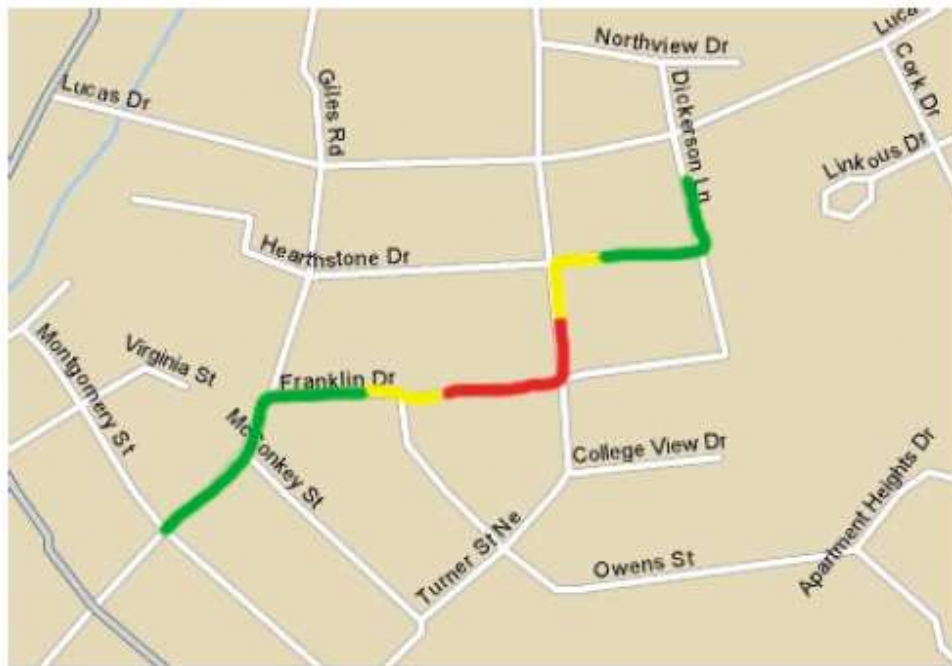
Για τη βελτίωση της χρησιμοποίησης φάσματος, η καιροσκοπική χρησιμοποίηση φάσματος (opportunistic spectrum utilization) έχει προταθεί όπου οι συσκευές καταλαμβάνουν το φάσμα που έχει αφεθεί κενό. Ένα επεξηγηματικό παράδειγμα της καιροσκοπικής χρησιμοποίησης φάσματος παρουσιάζεται στην εικόνα 54. Στο αριστερό μισό της εικόνας, ένα ζευγάρι διαβιβασθέντων σημάτων μεταφορέων είναι παρόν στις ζώνες χαμηλότερης συχνότητας ενώ ένα τυχαίο σύστημα πρόσβασης και ένα σύστημα TDMA λειτουργούν στις ανώτερες ζώνες. Μετά την παρατήρηση των 'φασματικών τρυπών', οι καιροσκοπικές συσκευές θα μπορούσαν να συμπληρώσουν αυτές τις τρύπες για να υποστηρίξουν τις ταυτόχρονες υπηρεσίες όπως διευκρινίζονται δεξιά στην εικόνα.



Εικόνα 54 : Παράδειγμα καιροσκοπικής χρησιμοποίησης φάσματος

## 2. Βελτίωση αξιοπιστίας της σύνδεσης

Μετά τη βελτίωση της χρησιμοποίησης φάσματος, η δεύτερη εφαρμογή του CR είναι η βελτίωση της αξιοπιστίας της σύνδεσης. Πολλά προσαρμοστικά radios βελτιώνουν την αξιοπιστία των συνδέσεων με την προσαρμογή των επιπέδων ισχύος μετάδοσης, των διαμορφώσεων ή της διόρθωσης λάθους. Εντούτοις, ένα CR που είναι σε θέση να θυμάται και να μαθαίνει από προηγούμενες εμπειρίες του, μπορεί να υπερβεί αυτές τις απλές προσαρμογές όπως μπορεί να παρουσιαστεί μέσω του ακόλουθου απλού παραδείγματος. Η εικόνα 55 επεξηγεί την πορεία που ένας κινητός συνδρομητής μπορεί να ακολουθήσει καθημερινά σε μια συγκεκριμένη περιοχή μιας πόλης όπου η ποιότητα των σημάτων μειώνεται συνήθως σε ένα μη αποδεκτό επίπεδο (που παρουσιάζεται με κόκκινο) και οφείλεται σε ένα χάσμα κάλυψης. Ίσως την πρώτη φορά ή μετά από διάφορα περιστατικά, το CR θα ενημερωνόταν για αυτό το πρόβλημα. Κατόπιν το CR θα μπορούσε να προσδοκήσει το χάσμα κάλυψης και να στείλει σήμα στο σταθμό βάσεων να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του σήματος καθώς ο χρήστης πλησιάζει το χάσμα κάλυψης. Φυσικά, η ίδια λειτουργία θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στους σταθμούς βάσης όπου ο κάθε σταθμός βάσης θα συσχέτιζε συγκεκριμένες περιοχές με τα κενά κάλυψης και θα έκανε τις απαραίτητες διεργασίες ώστε να υπάρχει παντού κάλυψη.



Signal Quality ■ Good ■ Transitional ■ Poor

Εικόνα 55 : Ποιότητα σήματος σε μια διαδρομή για ένα CR

### 3. Λιγότερο ακριβά radios

Προσθέτοντας πολυπλοκότητα στις διαδικασίες ελέγχου ενός radio θα φαινόταν αρχικά ότι αυξάνει το κόστος, όμως προσθέτοντας τις εφαρμογές του CR στις παραπάνω διαδικασίες μπορεί πράγματι να μειωθεί το κόστος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πολλές από τις προτεινόμενες εφαρμογές των CR είναι πιο εύκολο να εφαρμοστούν μέσω των χαμηλών διαδικασιών ελέγχου πολυπλοκότητας. Περαιτέρω, αυτές οι γνωστικές διαδικασίες εφαρμόζονται σε μια καθορισμένη διαδικασία ελέγχου για την οποία οι πρόσθετοι υπολογισμοί είναι σχετικά ασήμαντοι, ειδικά όταν συγκρίνεται με το κόστος της βελτίωσης της απόδοσης των αναλογικών μονάδων. Για παράδειγμα, προσθέτοντας 200 software cycles ανά δευτερόλεπτο είναι ουσιαστικά ανέξοδη διαδικασία σε αντίθεση με τη βελτίωση της απόδοσης κατά 3 dB με ένα front end RF, η οποία μπορεί να είναι πολύ ακριβή επιχείρηση.

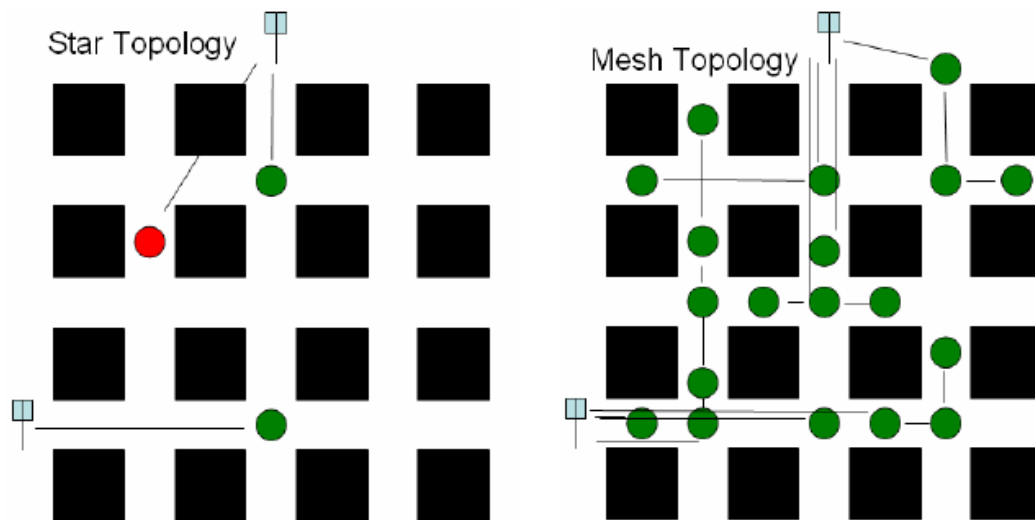
Εάν τα χαμηλής απόδοσης αναλογικά τμήματα είναι παρόντα μόνο στο δέκτη, δεν υπάρχει καμία άμεση επίδραση στο παρατηρήσιμο φάσμα. Εντούτοις, οι CR διαδικασίες που αναφέρθηκαν μπορούν να εφαρμοστούν για να υπερνικήσουν τους περιορισμούς της κακής εκτέλεσης των αναλογικών front ends. Παραδείγματος χάριν, μπορεί να εφαρμοστεί adaptive beam forming για να βρεθούν οι τρύπες στο φάσμα και να μη χρησιμοποιούνται φίλτρα low-Q anti-aliasing. Είτε συμπεριλαμβάνεται στον πομπό είτε



στο δέκτη, το cognitive radio διευκολύνει τη χρήση αναλογικών τμημάτων χαμηλότερου κόστους.

#### 4. Προηγμένες δικτυακές τοπολογίες

Αρχικά, πρέπει να αναφερθούμε στο MANET (Missings Are Now Equally Treated), το οποίο είναι πρόγραμμα που παρέχει πλατφόρμες για την υλοποίηση δικτυακών τοπολογιών. Σε ένα σενάριο λειτουργίας σε MANET, τα σημεία πρόσβασης ή οι σταθμοί βάσης δεν είναι απαραίητο να διατηρήσουν άμεσες συνδέσεις στις πιο απόμακρες περιοχές των κυψελών. Αντ' αυτού, κάθε σταθμός βάσης πρέπει μόνο να είναι σε θέση να φθάσει στους πιο κοντινούς συνδρομητές ενώ οι συσκευές μακρύτερα από το σταθμό βάσης αποκτούν πρόσβαση επικοινωνώντας μέσω μιας ακολουθίας ενδιάμεσων συσκευών για να φθάσουν στο σταθμό βάσης. Όπως διευκρινίζεται στην εικόνα 56, σε ένα MANET η μέση απόσταση διάδοσης για κάθε σύνδεση είναι πολύ πιο σύντομη απ' ότι θα συνέβαινε για μια τοπολογία star με τον ίδιο αριθμό σταθμών βάσης. Τα πιο σύντομα μήκη διάδοσης σημαίνουν ότι μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτεροι και αποτελεσματικοί παράγοντες επαναχρησιμοποίησης φάσματος που θα οδηγούσαν σε ένα κέρδος μέχρι και 30 dB στην ικανότητα συστήματος.



Εικόνα 56 : Τοπολογίες Star και ad-hoc

#### 5. Ενίσχυση τεχνικών SDR

Η ενίσχυση των τεχνικών SDR έχει αναφερθεί και παραπάνω. Μερικές από τις τεχνικές αυτές είναι γύρω από τις έξυπνες κεραιές, τη διαχείριση φάσματος και τη διαλειτουργικότητα. Έτσι, προσθέτοντας νοημοσύνη στους αλγόριθμους των έξυπνων κεραιών μέσω του CR, αυξάνεται η απόδοση του δικτύου. Στην ανταλλαγή φάσματος, οι διαφορετικοί ιδιοκτήτες φάσματος αγοράζουν και πωλούν το φάσμα στους ποικίλους

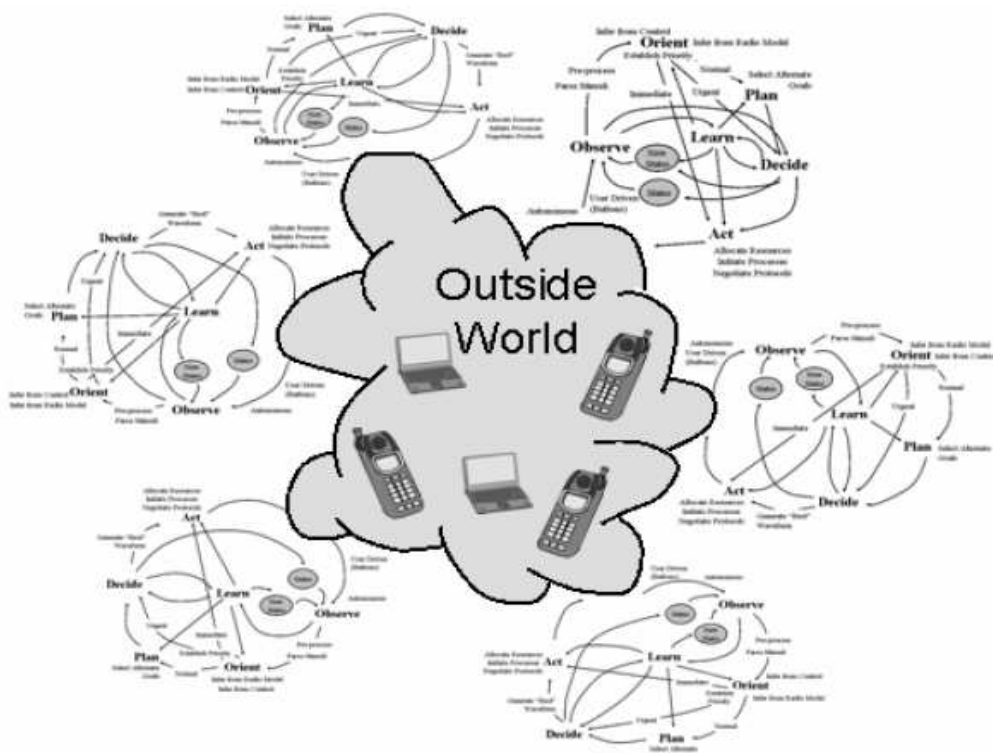
φορείς παροχής υπηρεσιών ανάλογα με τις αλλαγές στη ζήτηση στην αγορά. Η διαλειτουργικότητα είναι ένα επιπλέον όφελος της ικανότητας αναδιαμόρφωσης των software radios. Ένα SDR μπορεί να επαναπρογραμματιστεί εύκολα για να επικοινωνήσει με ένα άλλο radio, είτε το δεύτερο radio είναι ένα SDR ή ένα legacy radio.

## **6. Αυτοματοποιημένη διαχείριση των ραδιοπόρων**

Μετά την επέκταση ενός ασύρματου δικτύου, οι μηχανικοί περνούν μερικές εβδομάδες συντονίζοντας τις ραδιοπαραμέτρους για τη μέγιστη απόδοση του δικτύου. Οι κατανομές καναλιών μεταξύ των τομέων, τα κατώτατα όρια πτώσης κλήσης, τα επίπεδα ισχύος, τα σχέδια των κεραιών και πολλές ακόμα παράμετροι ρυθμίζονται για να βελτιώσουν την απόδοση δικτύων βασισμένη στις μετρήσεις μετά την επέκταση. Με τον αυξανόμενο αριθμό ασύρματων δικτύων και τη μετάβαση από τους συγκεντρωμένους φορείς παροχής υπηρεσιών σε ασύρματα LANs στο σπίτι και το γραφείο, η ανάγκη να βελτιστοποιηθούν τα ασύρματα δίκτυα θα γίνει όλο και περισσότερο σημαντική.

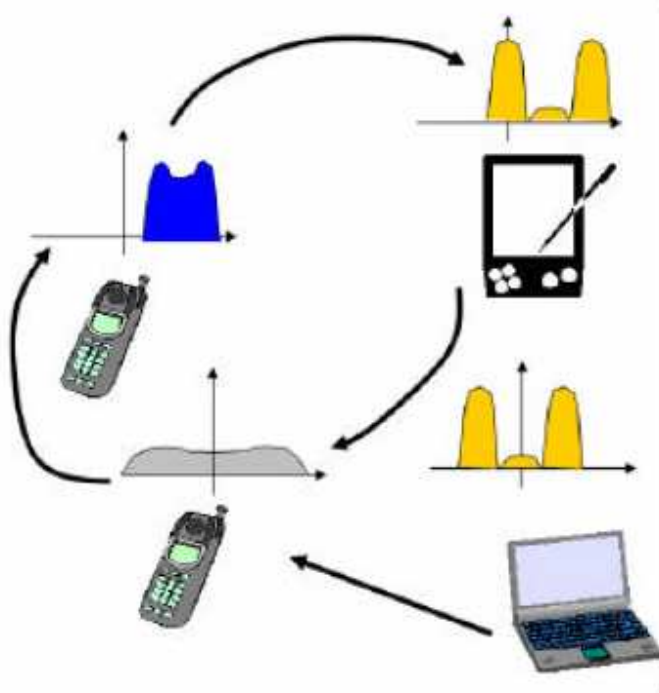
## **3.3 Αλληλεπιδρώντα Cognitive Radios**

Ενώ, τα CR υπόσχονται πολλά για το μέλλον, υπάρχει κάποια ανησυχία ότι τα CR μπορούν αρνητικά να προσκρούσουν στην απόδοση δικτύων. Ένα διάγραμμα των διαδικασιών ενός CR σε ένα δίκτυο παρουσιάζεται στην εικόνα 57 όπου τα CR αντιδρούν και σε "dumb" αλλά και σε cognitive radios. Συγκεκριμένα, πολλά CR θα αντιδρούν σε έναν εξωτερικό κόσμο ο οποίος καθορίζεται από κοινού από τις προσαρμογές διάφορων CR, και καθιστώντας οποιοδήποτε δίκτυο από δύο ή περισσότερα CRs μια διαλειτουργική διαδικασία απόφασης.



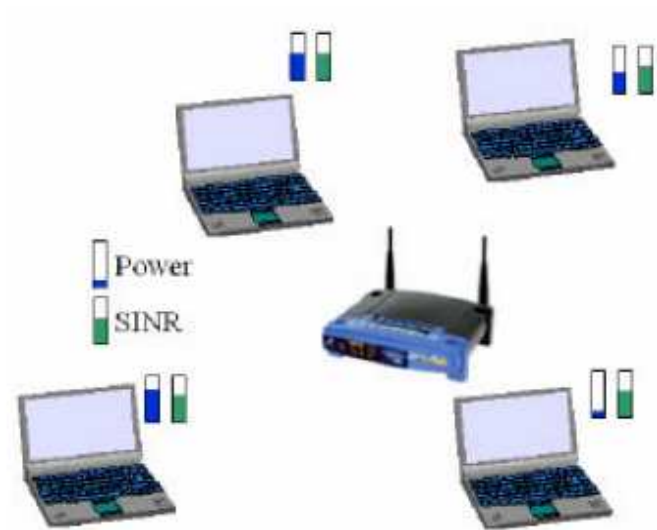
Εικόνα 57 : Μοντέλο interactive cognitive radio

Ενώ καταλαβαίνουμε διαισθητικά την αντίδραση ενός CR σε πολλά "dumb" radios, η αλληλεπίδραση πολλών CRs είναι λιγότερο σαφής δεδομένου ότι κάθε CR αλλάζει την κατάσταση του εξωτερικού κόσμου για όλα τα άλλα radios. Οι ενέργειες μιας ομάδας από CRs θα εμφανίζονταν ως επαναλαμβανόμενη διαλειτουργική διαδικασία απόφασης δεδομένου ότι η προσαρμογή φέρνει μια καινούρια προσαρμογή και ούτω καθ'εξής όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 58. Μια τέτοια άπειρη διαδικασία προσαρμογών καθιστά δύσκολο να εγγυηθούμε καλή λειτουργία για τα CR και τα δίκτυα.



Εικόνα 58 : Δίκτυο από προσαρμόσιμα radios που έχει πέσει σε loop προσαρμογών

Ακόμα και όταν δεν συνεχίζονται απείρως αυτές οι προσαρμογές, η τελική κατάσταση του δικτύου ενδέχεται να είναι ανεπιθύμητη. Παραδείγματος χάριν, έστω ένα ενιαίο δίκτυο cluster DS-SS με έναν κεντρικό δέκτη όπου όλοι οι κόμβοι, εκτός από τον κεντρικό, ρυθμίζουν τα εκπεμπόμενα επίπεδα ισχύος τους σε μία προσπάθεια να μεγιστοποιηθεί ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη. Η αρχική κατάσταση από την άποψη των επιπέδων ισχύος μετάδοσης (με μπλε χρώμα) και SNR (με πράσινο χρώμα) για αυτό το δίκτυο παρουσιάζονται στην εικόνα 59. Μετά από αυτό το παραπάνω σχέδιο προσαρμογής, η τελική κατάσταση για αυτό το δίκτυο παρουσιάζεται στην εικόνα 60 όπου όλα τα τερματικά διαβιβάζουν σε μέγιστα επίπεδα ισχύος. Σαφώς αυτό είναι μια ανεπιθύμητη έκβαση δεδομένου ότι η ικανότητα είναι πολύ μειωμένη λόγω προβλημάτων near- far (εκτός αν οι κόμβοι είναι όλοι στην ίδια ακτίνα από το δέκτη) και η τελική κατανομή των SNRs διανέμεται άδικα (ο πιο κοντινός κόμβος θα έχει πολύ μεγαλύτερο SNR σε σχέση με τον πιο απομακρυσμένο κόμβο). Αντίστοιχα, με αλληλεπίδραση CRs ενδεχομένως να είχαμε καλή λειτουργία αλλά και σε διαφορετική περίπτωση να εισέλθουμε σε infinite loop.



*Εικόνα 59 : Αρχική κατάσταση δικτύου*



*Εικόνα 60 : Τελική κατάσταση δικτύου*

Για τα παραπάνω, γίνεται έρευνα μέσω θεωρίας παιγνίων για την ανάλυση των αλληλεπιδράσεων αυτόνομων προσαρμόσιμων ασύρματων συσκευών έτσι ώστε να απαντηθούν ερωτήματα σχετικά με την αναμενόμενη συμπεριφορά ενός δικτύου, τις συνθήκες για να υπάρξει σωστή προσαρμογή και τη σταθερότητα του δικτύου.

### 3.4 Το μοντέλο αναφοράς OSI και το cognitive radio

Τα συμβατικά συστήματα επικοινωνιών καθορίζονται και τυποποιούνται χρησιμοποιώντας επτά επίπεδα του ISO/OSI. Το μοντέλο OSI έχει επτά επίπεδα τα οποία είναι : το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο μεταφοράς, το επίπεδο συνδιάλεξης, το επίπεδο παρουσίασης και το επίπεδο εφαρμογών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα προαναφερθέντα επίπεδα OSI.

1. Το φυσικό επίπεδο (physical layer) ασχολείται με την μετάδοση ανεπεξέργαστων δυαδικών ψηφίων μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας. Τα ζητήματα σχεδίασης ταυτίζονται με την εξασφάλιση ότι όταν μια φορά στέλνει το bit 1, αυτό θα λαμβάνεται από την άλλη πλευρά ως bit 1 και όχι ως bit 0.

2. Συνεχίζοντας, το κύριο καθήκον του επιπέδου συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων (data link layer) είναι να μετασχηματίζει μια υπηρεσία μετάδοσης ανεπεξέργαστων δεδομένων σε μια γραμμή η οποία φαίνεται στο επίπεδο δικτύου ότι δεν έχει τον κίνδυνο μη εντοπισμένων σφαλμάτων μετάδοσης. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται με την αποστολή πλαισίων δεδομένων και τη λήψη πλαισίων επιβεβαίωσης για τα πλαίσια που φτάνουν επιτυχώς στον παραλήπτη.

3. Το επίπεδο δικτύου (network layer) ελέγχει τη λειτουργία του υποδικτύου. Ένα βασικό ζήτημα σχεδίασης είναι ο καθορισμός του τρόπου δρομολόγησης των πακέτων από την προέλευση στον προορισμό.

4. Η βασική λειτουργία του επιπέδου μεταφοράς (transport layer) είναι να δέχεται δεδομένα από το ανώτερο επίπεδο, να τα διασπά αν τα χρειάζεται σε μικρότερες μονάδες, να τα μεταβιβάζει στο επίπεδο δικτύου και να εξασφαλίζει ότι όλα τα τμήματα φτάνουν σωστά στο άλλο άκρο.

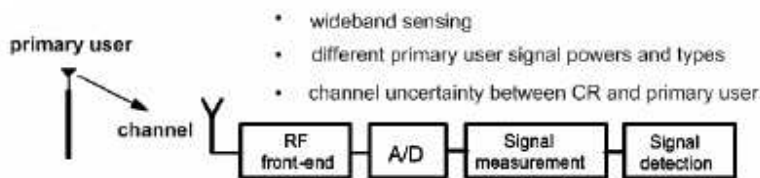
5. Επιπρόσθετα, το επίπεδο συνδιάλεξης (session layer) επιτρέπει σε χρήστες διαφορετικών μηχανών να εγκαθιδρύουν συνδιαλέξεις μεταξύ τους. Οι συνδιαλέξεις αυτές περιλαμβάνουν διάφορες υπηρεσίες όπως ο έλεγχος διαλόγου (dialog control, η παρακολούθηση αυτού που έχει σειρά για μετάδοση), η διαχείριση σκυτάλης (token management, η αποτροπή των δύο πλευρών στο να επιχειρήσουν ταυτόχρονα την εκτέλεση της ίδιας λειτουργίας) και ο συγχρονισμός (synchronization, η τήρηση σημείων ελέγχου σε μακρόχρονες μεταδόσεις, έτσι ώστε αυτές να μπορούν να συνεχιστούν από το σημείο που διακόπηκαν, μετά από κατάρρευση του συστήματος).

6. Το επίπεδο παρουσίασης (presentation layer) ασχολείται με την σύνταξη και τη σημασιολογία των μεταδιδόμενων πληροφοριών.

7. Τέλος, το επίπεδο εφαρμογών (application layer) περιέχει μια ποικιλία πρωτοκόλλων που απαιτούνται συχνά από τους χρήστες. Ένα γνωστό πρωτόκολλο εφαρμογής είναι το Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερκειμένου ή HTTP (HyperText Transfer Protocol), το οποίο είναι η βάση του Παγκόσμιου Ιστού.

Εστιάζοντας στο cognitive radio, ακόμα κι αν τα CRs είναι αρκετά διαφορετικά από τα παραδοσιακά ασύρματα radios, είναι λογικό να υποθεθεί ότι ένα cognitive radio framework θα βασιζόταν στον μεθοδολογία διαστρωμάτωσης ISO/OSI. Ένα περαιτέρω πλεονέκτημα της διαστρωμάτωσης θα μπορούσε να είναι η ενίσχυση των υπαρχόντων στρωμάτων των συμβατικών radio με μοναδικές γνωστικές λειτουργίες. Πρώτα απ' όλα, κάποιος πρέπει να αρχίσει τις γνωστικές λειτουργίες στο φυσικό επίπεδο προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι ικανότητες και οι περιορισμοί της εφαρμογής τους, έτσι ώστε τα ανώτερα στρώματα να μπορούν να σχεδιαστούν χρησιμοποιώντας ρεαλιστικά πρότυπα.

Η cognitive ραδιοεπικοινωνία βασίζεται στην αξιόπιστη ανίχνευση του μη κατειλημμένου φάσματος. Το γεγονός αυτό καθιερώνει έναν νέο τύπο λειτουργίας στο φυσικό επίπεδο για spectrum sensing σε όλες τις παραμέτρους (χρόνος, συχνότητα, και διάστημα) προκειμένου να προσδιοριστούν οι ζώνες συχνότητας διαθέσιμες για τη μετάδοση. Η αντίληψη φάσματος απαιτεί το radio να λαμβάνει ένα ευρείας ζώνης σήμα μέσω front-end RF, να κάνει δειγματοληψία μέσω αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα (A/D converter), και να παίρνει μετρήσεις για την ανίχνευση των σημάτων αρχικών χρηστών, όπως διευκρινίζεται στην εικόνα 61α.



Εικόνα 61α : Δέκτης cognitive radio



Εικόνα 61β : Πομπός cognitive radio

Μετά τον προσδιορισμό ενός διαθέσιμου τμήματος φάσματος, ένα CR πρέπει να χρησιμοποιήσει σχέδια διαμόρφωσης που παρέχουν καλύτερη χρησιμοποίηση φάσματος αποφεύγοντας την παρέμβαση σε οποιοδήποτε αρχικό χρήστη. Επιπλέον, το επιθυμητό σχέδιο μετάδοσης πρέπει να είναι ευέλικτο ώστε να επιτρέπει αναθέσεις οποιασδήποτε ζώνης σε οποιοδήποτε χρήστη, και κλιμακωτό σε σχέση με τον αριθμό χρηστών και ζωνών. Στην ιδανική περίπτωση, αυτή η ευέλικτη ευρείας ζώνης μετάδοση θα πραγματοποιούνταν μέσω ψηφιακής σύνθεσης κυματοειδούς περιοχών, όπου ένα σύνολο παραμέτρων διευκρινίζει τις ζώνες μετάδοσης και τον έλεγχο ισχύος. Η εικόνα 61β επεξηγεί την αρχιτεκτονική ενός ευρυζωνικού πομπού σημάτων. Η κύρια πρόκληση είναι να δημιουργηθεί ένα σήμα όπου, χωρίς εξωτερικά αναλογικά φίλτρα, αλλάζει

προσαρμοστικά το κατειλημμένο εύρος ζώνης και δεν παρεμβάλλει σε άλλους ενεργούς αρχικούς χρήστες.

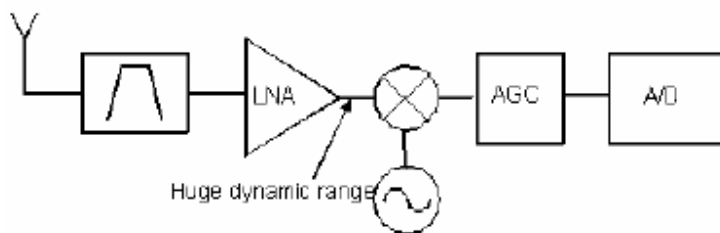
Η σημασία της αξιόπιστης ανίχνευσης των αρχικών χρηστών έχει δύο πτυχές:

- 1) εξασφαλίζει ότι τα CRs δεν θα παρεμποδίζουν τους αρχικούς χρήστες, το οποίο επιτρέπει τη δευτεροβάθμια χρήση του φάσματός τους
- 2) δημιουργεί ευκαιρίες φάσματος για την αύξηση της χωρητικότητας των CR δικτύων.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτή η λειτουργία, τα CRs πρέπει να έχουν σημαντικά καλύτερη ευαισθησία και ευφυΐα στις ευρυζωνικές συχνότητες απ' ότι τα συμβατικά radios. Επομένως, μια εφαρμογή της αντίληψης φάσματος απαιτεί καινούριο σχεδιασμό όχι μόνο των κυκλωμάτων ευρείας ζώνης RF/analog, αλλά και τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και συνεργασία δικτύων προκειμένου να καλυφθούν τέτοιες προκλητικές απαιτήσεις.

### 3.5 Wideband Sensing Front-end

Η εικόνα 62 παρουσιάζει μια αρχιτεκτονική ευρείας ζώνης front-end RF ικανής να για ταυτόχρονη αντίληψη σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα GHz. Η αρχιτεκτονική έχει παρουσιαστεί προηγουμένα στο Software Defined Radio, κι εδώ κάνουμε μια μικρή ανακεφαλαίωση. Το ευρυζωνικό σήμα RF που παρουσιάζεται στην κεραία περιλαμβάνει σήματα από διαφορετικούς πομπούς που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος και εύρη ζώνη καναλιών. Ένας από τους κύριους περιορισμούς στην ικανότητα ενός front-end είναι η ανίχνευση των μικρών σημάτων στο δυναμικό εύρος τους, η οποία υπαγορεύει επίσης την απαίτηση για πολλά bits στον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα (A/D). Η αντίληψη του φάσματος σε ευρυζωνικά σήματα απαιτεί ταχύτητα πολλών GHz στους μετατροπείς A/D, οι οποίοι μαζί με την υψηλή ανάλυση (12 ή περισσότερων bit) ενδέχεται να είναι πραγματοποιήσιμοι. Επομένως, η μείωση των strong in-band σημάτων πρωταρχικών χρηστών, που δεν μας ενδιαφέρουν στην ανίχνευση, είναι απαραίτητη για να ληφθούν και να επεξεργαστούν τα αδύναμα σήματα. Συνήθως, αυτή η μείωση επιτυγχάνεται με το φιλτράρισμα ενός ισχυρού σήματος μέσω ενός ζωνοφρακτικού φίλτρου (notch filter).

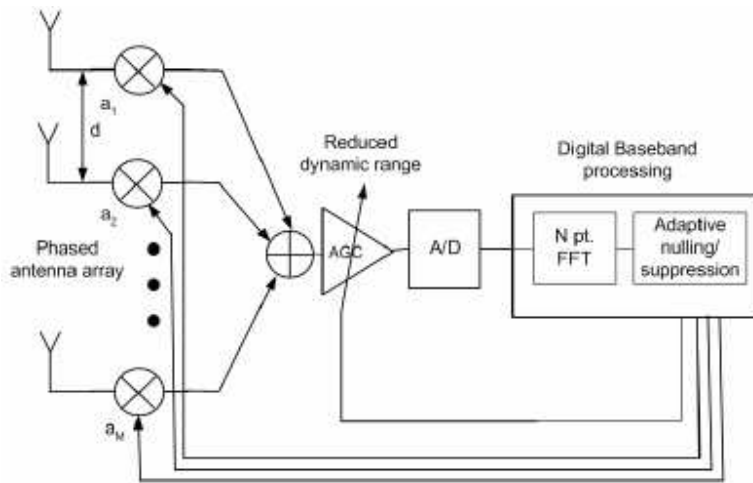


Εικόνα 62 : RF front-end ευρυζωνικού cognitive radio

Μια εναλλακτική προσέγγιση για τη μείωση δυναμικού εύρους θα ήταν να φιλτραρισθεί ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου παρά στην περιοχή της συχνότητας χρησιμοποιώντας πολλές κεραίες. Αυτή η ιδέα βασίζεται στην πρόσφατη θεωρητική εργασία για τα κανάλια πολλαπλών κεραιών που προσδιορίζει ότι τα χωρικά



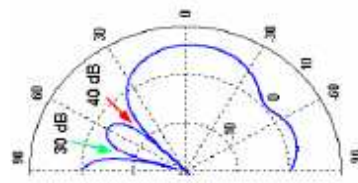
λαμβανόμενα σήματα καταλαμβάνουν έναν περιορισμένο αριθμό κατευθύνσεων. Επομένως, τα σήματα μπορούν να παραληφθούν επιλεκτικά ή να κατασταλούν χρησιμοποιώντας τους πίνακες κεραιών μέσω τεχνικών beamforming. Σε αυτή την εφαρμογή, τα σήματα που παραλαμβάνονται από πολλαπλές κεραιές πρέπει να συνδυαστούν πριν από το μετατροπέα A/D. Κατά συνέπεια, η επεξεργασία πρέπει να γίνει στην αναλογική περιοχή πριν από τα κυκλώματα αυτόματου ελέγχου κέρδους που θα ενίσχυαν κατάλληλα το μειωμένο σήμα δυναμικής περιοχής για την καλύτερη χρησιμοποίηση του αριθμού των bits στον μετατροπέα A/D. Η αρχιτεκτονική ευρείας ζώνης front-end RF, που ενισχύεται με μια συστοιχία κεραιών για χωρικό φιλτράρισμα, παρουσιάζεται στην εικόνα 63. Αυτή η αρχιτεκτονική θα μπορούσε να εφαρμοστεί ως μια συγχρονισμένη συστοιχία κεραιών όπου οι συντελεστές συστοιχίας κεραιών υπολογίζονται στην ψηφιακή περιοχή και ανατροφοδοτούνται για να ρυθμίσουν τα κέρδη και τις φάσεις των στοιχείων των κεραιών.



Εικόνα 63 : Wideband RF front-end με κεραία για spatial filtering

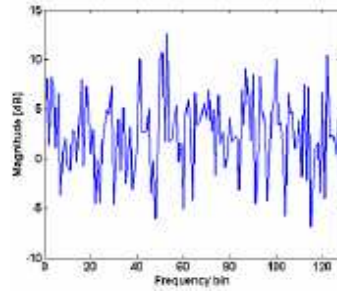
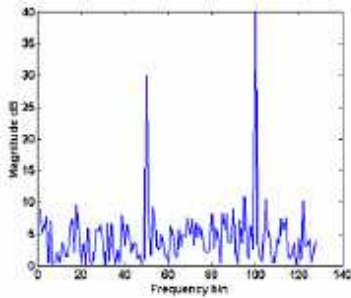
Τα αποτελέσματα που πήραμε από ένα αλγόριθμο για τον υπολογισμό των συντελεστών φαίνονται παρακάτω. Η εικόνα 64 παρουσιάζει την περίπτωση δύο ισχυρών πρωταρχικών χρηστών των οποίων ισχύς κυμαίνεται σε 30-40 dB μεγαλύτερα από τη μέση ισχύ σε άλλες ζώνες συχνότητας. Αφότου εφαρμοστούν οι βέλτιστοι συντελεστές, το δυναμικό εύρος μειώνεται σε περίπου 22 dB (αφήνοντας ελεύθερα 3-4 bits στην ανάλυση του μετατροπέα A/D) χρησιμοποιώντας μια συστοιχία κεραιών τεσσάρων στοιχείων. Αυτή η ανάλυση δείχνει ότι οι χωρικές τεχνικές φιλτράρισματος θα μπορούσαν να χαλαρώσουν τις απαιτήσεις για την εφαρμογή ευρείας ζώνης RF αντίληψης front-end.

FFT N=128 points  
 4 antennas, 8 sweeps  
 Avg. SNR= 10 dB per sub-carrier  
 2 strong PUs  
 $\alpha_1=45^\circ$   $P_1=40\text{dB}$   $k=100$  bin  
 $\alpha_2=70^\circ$   $P_2=30\text{dB}$   $k=50$  bin



α) Παράμετροι προσομοίωσης

β) Βέλτιστη απόκριση κεραιών



γ) Σήμα μεγάλου δυναμικού εύρους

δ) Σήμα χωρικά φιλτραρισμένο

Εικόνα 64 : Παράδειγμα μείωσης δυναμικού εύρους χρησιμοποιώντας συστοιχία κεραιών

### 3.5.1 Ανιχνευτές σημάτων πρωταρχικών χρηστών

Μετά από την αξιόπιστη λήψη και δειγματοληψία ενός ευρυζωνικού σήματος, οι τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος πρέπει να χρησιμοποιηθούν στη περαιτέρω αύξηση της ευαισθησίας με την επεξεργασία του κέρδους, και στην αναγνώριση των πρωταρχικών χρηστών βασισμένες στη γνώση των χαρακτηριστικών σημάτων. Τρεις τεχνικές ανίχνευσης εξετάζονται σε αυτό το έγγραφο: ένα προσαρμοσμένο φίλτρο, ένας ενεργειακός ανιχνευτής, και ένας cyclostationary feature ανιχνευτής. Προκειμένου να προσδιοριστεί η καταλληλότερη τεχνική, τις συγκρίνουμε χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες μετρικές: επεξεργασία κέρδους που απαιτείται για μια δεδομένη πιθανότητα της ανίχνευσης, ευαισθησία σε άγνωστο θόρυβο και παρέμβαση, και την πολυπλοκότητα των εφαρμογών.

Ένα προσαρμοσμένο φίλτρο είναι ο βέλτιστος ανιχνευτής από την άποψη ότι μπορεί επίσης να αποδιαμορφώσει τα σήματα με συμφασική επεξεργασία σήματος. Το κέρδος επεξεργασίας είναι γραμμικά ανάλογο προς τον αριθμό δειγμάτων  $N$ :  $SNR_{out} = N \cdot SNR_{in}$ . Εντούτοις, η πολυπλοκότητα της εφαρμογής είναι απαγορευτικά μεγάλη δεδομένου ότι το CR θα έπρεπε να έχει έναν ξεχωριστό δέκτη προσαρμοσμένο φίλτρο για κάθε πρωταρχικό σύστημα χρηστών.

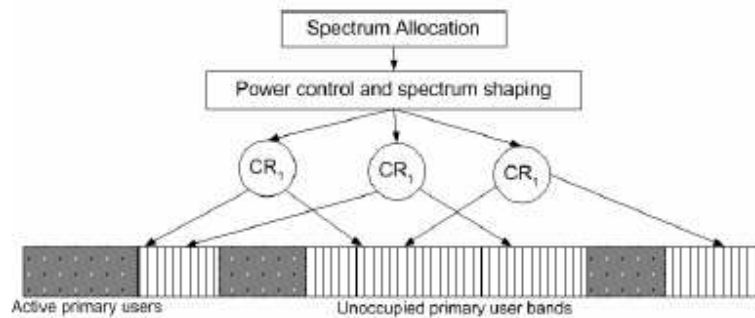
Ένας ενεργειακός ανιχνευτής (energy detector) είναι ο επόμενος βέλτιστος ανιχνευτής λόγω της μη συμφασικής επεξεργασίας σήματος, η οποία ενσωματώνει μόνο

τα τακτοποιημένα δείγματα. Το κέρδος επεξεργασίας είναι  $SNR_{out} = N \cdot SNR_{in}^2$  που σε περίπτωση πολύ μικρού  $SNR_{in}$  γίνεται σημαντικά κατώτερο από το προσαρμοσμένο φίλτρο λόγω του quadratic scaling. Το σήμα ανιχνεύεται με τη σύγκριση της εξόδου του ενεργειακού ανιχνευτή με ένα κατώτατο όριο εξαρτώμενο από την κατ' εκτίμηση ενέργεια θορύβου. Κατά συνέπεια, ένα μικρό λάθος εκτίμησης στην ενέργεια του θορύβου προκαλεί σημαντική απώλεια απόδοσης του ενεργειακού ανιχνευτή. Όσον αφορά τους χαμηλούς SNRs, ο ενεργειακός ανιχνευτής αποτυγχάνει εντελώς στην ανίχνευση των αδύναμων σημάτων. Ακόμα κι αν η απλότητα εφαρμογής του ενεργειακού ανιχνευτή το κάνει έναν ευνοϊκό υποψήφιο, η απαίτηση να υπολογιστεί η ενέργεια θορύβου του πραγματικού πομποδέκτη RF μέσα σε ένα κλάσμα ενός dB θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί. Στην πράξη, θα απαιτούσε μια βαθμονόμηση του θορύβου και του κέρδους ευρυζωνικών RF front-end σε ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων.

Οι ανιχνευτές cyclostationary feature έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν ευδιάκριτα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των διαμορφωμένων σημάτων όπως το ημιτονοειδές φέρον, το ποσοστό των συμβόλων, και ο τύπος διαμόρφωσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ανιχνεύονται με την ανάλυση μιας φασματικής λειτουργίας συσχετισμού που είναι μια διδιάστατη μετατροπή. Το κύριο πλεονέκτημα της φασματικής λειτουργίας συσχετισμού είναι ότι διακρίνει την ενέργεια θορύβου από τη διαμορφωμένη ενέργεια σημάτων. Αυτή η ιδιοκτησία είναι ένα αποτέλεσμα του γεγονότος ότι ο θόρυβος είναι ένα στάσιμο σήμα χωρίς συσχέτιση, ενώ τα διαμορφωμένα σήματα είναι cyclostationary με φασματικό συσχετισμό. Επομένως, ένας ανιχνευτής cyclostationary feature αποκτά πλεονέκτημα σε σχέση με τον ενεργειακό ανιχνευτή. Η πολυπλοκότητα της εφαρμογής αυτής είναι  $N^2$  ενώ του ενεργειακού ανιχνευτή είναι  $N$ .

### 3.5.2 Μετάδοση ευρείας ζώνης

Μετά από την αξιόπιστη ανίχνευση, ένα CR πρέπει να χρησιμοποιήσει τα σχέδια μετάδοσης που παρέχουν την καλύτερη χρησιμοποίηση του φάσματος. Υπάρχουν διάφορες απαιτήσεις που ένα σχέδιο διαμόρφωσης πρέπει να παρέχει. Κατ' αρχάς, οι ζώνες φάσματος που είναι διαθέσιμες για μετάδοση θα μπορούσαν να είναι εξαπλωμένες σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, με μεταβλητό εύρος ζώνης, όπως διευκρινίζονται στην εικόνα 65. Για τη βέλτιστη απόδοση φάσματος και ενέργειας κάθε CR υπολογίζει τη ποιότητα των μη κατειλημμένων συχνοτήτων προκειμένου να παρασχεθούν στα υψηλότερα επίπεδα μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για την ενέργεια και την κατανομή των bits. Τελικά, οι διαφορετικές εφαρμογές ενδέχεται να απαιτήσουν την επιλογή των ζωνών συχνότητας βασισμένων στα χαρακτηριστικά διάδοσης ή τις μετρήσεις παρέμβασης. Επομένως, το σχέδιο μετάδοσης πρέπει να επιτρέπει τις αναθέσεις οποιασδήποτε ζώνης συχνότητας σε οποιοδήποτε CR χρήστη, και πρέπει να είναι κλιμακωτό με τον αριθμό χρηστών και ζωνών. Προκειμένου να παραμείνει απλός ο CR δέκτης αποδιαμόρφωσης, είναι επιθυμητό να περιοριστεί μια ενιαία μετάδοση χρηστών σε μια ενιαία ζώνη συχνότητας για να μην προκληθεί ενδεχομένως παρέμβαση στον ενεργό πρωταρχικό χρήστη στην περιοχή.



Εικόνα 65 : Ευρυζωνική φασματική πρόσβαση cognitive radio

Το σχέδιο διαμόρφωσης βασισμένο στην πολυπλεξία Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) είναι μια προσέγγιση που ίσως ικανοποιήσει τις επιθυμητές ιδιότητες. Η OFDM έχει γίνει η επιλεγμένη διαμόρφωση σε πολλά ευρυζωνικά συστήματα λόγω των πολλαπλών μηχανισμών πρόσβασης και της απλότητάς του στο equalization των καναλιών, συν τα οφέλη της κωδικοποίησης. Η εκπεμπόμενη κυματομορφή OFDM παράγεται με την εφαρμογή ενός αντίστροφου γρήγορου μετασχηματισμού κατά Φουριέ (IFFT) σε ένα διάλυμα δεδομένων, όπου ο αριθμός σημείων  $N$  καθορίζει τον αριθμό υπο-φέροντων για την ανεξάρτητη χρήση καναλιών, και το ελάχιστο εύρος ζώνης ανάλυσης καναλιού καθορίζεται από το λόγο  $W/N$ , όπου το  $W$  είναι η ολόκληρη ζώνη συχνότητας προσιτή από οποιοδήποτε CR χρήστη. Τα χαρακτηριστικά περιοχών συχνότητας του διαβιβασθέντος σήματος καθορίζονται από την ανάθεση των διαφορετικών του μηδενός στοιχείων στις εισαγωγές IFFT που αντιστοιχούν στα υπο-φέροντα που χρησιμοποιούνται από έναν συγκεκριμένο CR χρήστη. Ομοίως, η ανάθεση των μηδενικών αντιστοιχεί στα κανάλια που δεν επιτρέπονται να χρησιμοποιηθούν λόγω της αρχικής παρουσίας χρηστών ή της χρήσης των καναλιών από άλλους CR χρήστες. Η έξοδος του επεξεργαστή IFFT περιέχει  $N$  δείγματα που περνούν μέσω ενός digital-to-analog μετατροπέα παράγοντας κυματομορφή εύρους ζώνης  $W$ . Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ολόκληρη η παραγωγή ευρυζωνικών σημάτων εκτελείται στην ψηφιακή περιοχή, αντί των πολλαπλάσιων φίλτρων που απαιτούνται για την επεξεργασία σήματος στην αναλογική περιοχή.

Από την cognitive δικτυακή προοπτική, η πρόσβαση φάσματος OFDM είναι κλιμακωτή χωρίς παρεμβολή μεταξύ των χρηστών, παρέχοντας συγχρονισμένη πρόσβαση καναλιών. Η αργή φθίνουσα πορεία της ημιτονοειδούς κυματομορφής, με τον πρώτο πλευρικό λοβό να μειώνεται μόνο 13.6dB, παράγει παρέμβαση στους παρακείμενους πρωταρχικούς χρήστες ζωνών που είναι ανάλογη προς την ισχύ που διατίθεται στο CR χρήστη. Επομένως, ένα συμβατικό σχέδιο πρόσβασης OFDM δεν είναι αποδεκτός υποψήφιος για την ευρείας ζώνης CR μετάδοση.

Προκειμένου να παρασχεθεί προστασία στις παρακείμενες ζώνες πρωταρχικών χρηστών, είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητή η απόδοση των δεκτών πρωταρχικών χρηστών. Λόγω της ανάγκης για την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας, κάθε αρχικός δέκτης σχεδιάζεται για να ανεχτεί ένα περιορισμένο ποσό co-channel παρέμβασης καθώς επίσης και παρακείμενης παρέμβασης καναλιών που καθορίζεται από όρια ευαισθησίας. Επομένως, η φασματική διαρροή της κυματομορφής OFDM μπορεί να βελτιστοποιηθεί

για να ικανοποιήσει αυτούς τους περιορισμούς παρέμβασης. Η βελτιστοποίηση παρέμβασης θα απαιτούσε δύο στάδια. Κατ' αρχάς, είναι απαραίτητο να μετρηθεί η λαμβανόμενη ισχύς σημάτων ενός πρωταρχικού δέκτη στην παρακείμενη ζώνη δεδομένου ότι οι περιορισμοί παρέμβασης παραπέμπονται σε αυτή. Αυτή η μέτρηση ισχύος θα μπορούσε να ληφθεί από την αντίληψη φάσματος, και να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει μάσκα ισχύος μετάδοσης για τον πομπό CR. Κατόπιν, το φάσμα της γεννήτριας σημάτων OFDM πρέπει να διαμορφωθεί για να εγκαταστήσει τη μάσκα φάσματος. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης φάσματος που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη φασματική διαρροή OFDM:

- Εισαγωγή guard ζωνών φρουράς,
- Windowing
- Έλεγχος ισχύος ανά sub-carrier

Έτσι, αυτές οι τεχνικές εισάγονται για να βελτιώσουν τον πομπό σημάτων OFDM και να δημιουργηθεί μια ευρυζωνική διαμορφωμένη κυματομορφή χωρίς παρέμβαση σε αντίθεση με το συμβατικό OFDM.

### 3.6 Ad-hoc Cognitive Radio

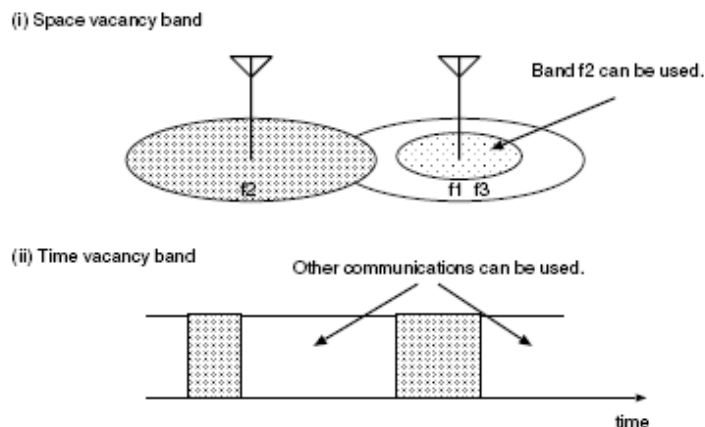
Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το SDR είναι ευρέως γνωστό ως πομποδέκτης που μπορεί να αναδιαμορφώσει τη συσκευή υλικού με την μεταφόρτωση και την εγκατάσταση του λογισμικού. Ο κύριος ερευνητικός στόχος του SDR είναι ένα πολλαπλής χρήσης τερματικό που μπορεί να υποστηρίξει πολλά συστήματα επικοινωνιών με έναν πομποδέκτη. Προκειμένου να υλοποιηθεί ένα τέτοιο τερματικό, θέματα βασικής έρευνας έχουν μελετηθεί όπως το κύκλωμα διαμόρφωσης, ο μετατροπέας AD/DA, η επεξεργασία σήματος για προσαρμοστική κεραία, reconfigurable συσκευή (FPGA, DSP), η αρχιτεκτονική του πομποδέκτη, και τα λοιπά. Εκτός από τα ανωτέρω θέματα, η έννοια του cognitive radio έχει προταθεί και έχει προσελκύσει την ερευνητική προσοχή. Οι cognitive πομποδέκτες επιλέγουν προσαρμοστικά τις μεθόδους επικοινωνίας, τις μεθόδους διαμόρφωσης, τη συχνότητα κτλ, σύμφωνα με το ραδιοπεριβάλλον. Το cognitive radio έχει τη δυνατότητα να αλλάξει δραστικά τη συμβατική πολιτική ανάθεσης συχνότητας. Στη συμβατική πολιτική ανάθεσης συχνότητας, η ζώνη συχνότητας ορίζεται από τον χειριστή. Αντίθετα στο cognitive radio, η ζώνη συχνότητας που δεν χρησιμοποιείται από τα άλλα συστήματα επικοινωνιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιουδήποτε χρήστες, έτσι η σταθερή ανάθεση συχνότητας δεν μπορεί να απαιτηθεί. Επομένως το cognitive radio είναι μια από τις λύσεις για την έλλειψη πόρου συχνοτήτων στις VHF και τις UHF ζώνες. Έτσι, η έννοια του SDR επεκτείνεται για την υποστήριξη της ικανότητας αναδιαμόρφωσης συμπεριλαμβανομένου του δικτύου επικοινωνίας σύμφωνα με το ραδιοπεριβάλλον. Ιδιαίτερα, η ικανότητα αναδιαμόρφωσης σε συνεργασία με το hardware και το πρωτόκολλο medium access control (MAC) είναι σημαντικό να υποστηρίξει ένα αποκεντρωμένο σύστημα διανομής συχνότητας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ιδέα γύρω από το ad-hoc cognitive radio, στην οποία ο πομποδέκτης με μικρή ισχύ μετάδοσης και η multi-hop επικοινωνία χρησιμοποιούνται για την επέκταση της περιοχής υπηρεσιών με τη χρησιμοποίηση

τερματικού SDR, το σύστημα του συστήματος multi-hop frequency sharing και ένα παράδειγμα βασισμένο σε space time block code (STBC) distributed ARQ. Σε αυτό το σύστημα, κάθε κόμβος αναδιαμορφώνει το ραδιοπεριβάλλον μόνος του έτσι ώστε η περιοχή παρέμβασης να μπορεί να αποφευχθεί με τον έλεγχο της λειτουργίας αναμετάδοσης σε κάθε κόμβο.

### 3.6.1 Ραδιοπεριβάλλον για σύστημα διανομής συχνότητας

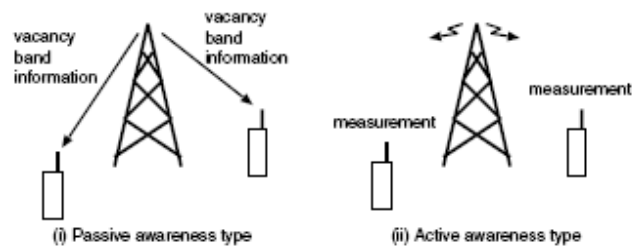
Δύο τύποι των πολιτικών χρήσης συχνότητας μπορούν να εξεταστούν για το cognitive radio. Η πρώτη είναι η αποκλειστική χρήση της συχνότητας και η δεύτερη είναι η διανομή συχνότητας με τα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνιών γνωστή ως "δευτεροβάθμια χρήση" της ζώνης συχνότητας. Στην πρώτη, η ζώνη συχνότητας για το cognitive radio ορίζεται σταθερά όπως η ISM band σε ασύρματα συστήματα LAN (WLAN). Τέτοιο σύστημα μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα στη συμβατική πολιτική ανάθεσης συχνότητας. Αφ' ετέρου, στη δεύτερη περίπτωση, η συχνότητα που ορίζεται για τα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνιών επαναχρησιμοποιείται για το CR. Στη συνέχεια του εγγράφου, τα συστήματα ανάθεσης συχνότητας βασίζονται στην ιδέα του cognitive radio.



Εικόνα 66 : Διανομή συχνότητας βασισμένες στο χώρο και τον χρόνο

Οι πόροι συχνότητας που δε χρησιμοποιούνται, που όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το CR, είναι ταξινομημένοι σε δύο τύπους όπως φαίνεται στην εικόνα 66. Ο πρώτος είναι βασισμένος στο χώρο και ο δεύτερος στον χρόνο. Το χαρακτηριστικό παράδειγμα του συστήματος με space domain frequency resource είναι η τηλεοπτική ζώνη. Στα τηλεοπτικά συστήματα, προκειμένου να αφαιρεθεί η παρέμβαση, η ζώνη συχνότητας που ορίζεται στην παρακείμενη περιοχή είναι διαφορετική. Σε τέτοια περίπτωση, γύρω από την άκρη της περιοχής, η ζώνη συχνότητας χρησιμοποιείται πλήρως. Αφ' ετέρου, γύρω από το κέντρο της περιοχής κοντά στον πομπό, η ζώνη συχνότητας που είναι ορισμένη στην παρακείμενη περιοχή δεν χρησιμοποιείται. Αυτό

σημαίνει ότι η συχνότητα που ορίζεται στην παρακείμενη περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το cognitive radio γύρω από το κέντρο της περιοχής όπως φαίνεται στην εικόνα 66-i. Συνεχίζοντας, το χαρακτηριστικό παράδειγμα του συστήματος με time domain frequency resource είναι η ζώνη relay μικροκυμάτων. Στο σύστημα relay μικροκυμάτων, η συχνότητα ορίζεται σταθερά στο συγκεκριμένο χειριστή. Εντούτοις, το κανάλι συχνότητας δεν είναι κατειλημμένο όλο το χρόνο επειδή η μετάδοση δε γίνεται συνεχώς όπως φαίνεται στην εικόνα 66-ii. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία του CR. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί το σύστημα διανομής συχνότητας βασισμένο στη CR πολιτική, η αναγνώριση του πόρου συχνότητας είναι σημαντική. Οι μέθοδοι αναγνώρισης του πόρου συχνότητας που ορίζεται για το συμβατικό σύστημα επικοινωνιών μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους, τον παθητικό και τον ενεργητικό.



Εικόνα 67 : Μέθοδος αναγνώρισης των πόρων συχνότητας για το cognitive radio

Στο "παθητικό τύπο συνειδητοποίησης," ο κεντρικός σταθμός του συστήματος επικοινωνιών μεταδίδει τις πληροφορίες των πόρων συχνότητας για το CR, έτσι ώστε τα διανεμημένα τερματικά του CR "παθητικά" να αναγνωρίσουν το περιβάλλον συχνότητας από τον κεντρικό σταθμό. Στο "ενεργό τύπο συνειδητοποίησης," τα διανεμημένα τερματικά του CR "ενεργά" αναγνωρίζουν τους ραδιοπόρους μόνο τους. Η εικόνα της αναγνώρισης του πόρου συχνότητας συνοψίζεται στην εικόνα 67. Τα υπάρχοντα συστήματα που μεταδίδουν σήματα όπως αυτά της τηλεοπτικής ζώνης εξετάζονται για τα κατάλληλα συστήματα για τον παθητικό τύπο συνειδητοποίησης. Σε τέτοιο σύστημα, ο τηλεοπτικός πύργος ή ο σταθμός βάσεων των υπάρχοντων συστημάτων επικοινωνιών μεταδίδει τις πληροφορίες των πόρων συχνότητας προς τα CR τερματικά. Σε ένα τέτοιο σύστημα, η μέθοδος του ελέγχου περιοχής είναι σημαντική. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο περιορισμός της περιοχής, η μέθοδος του ελέγχου της ισχύος των σημάτων πληροφορίας και η μέθοδος ενημέρωσης της επιτρεπτής θέσης των cognitive τερματικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Με τη χρησιμοποίηση τέτοιας τεχνικής, τα τερματικά γύρω από τον κεντρικό σταθμό μπορούν μόνο να χρησιμοποιήσουν τον πόρο συχνότητας που ορίζει το CR. Η τελευταία μέθοδος ελέγχει την περιοχή με την αναμετάδοση των πληροφοριών θέσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το CR. Στα CR τερματικά, κάθε τερματικό ελέγχει τη θέση του εαυτού του με τη χρησιμοποίηση του GPS και το κάθε τερματικό αποφασίζει τον πόρο συχνότητας που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία.

Αντίθετα, ο "ενεργός τύπος συνειδητοποίησης," είναι η μέθοδος στην οποία κάθε τερματικό αναγνωρίζει την περιβάλλουσα κατάσταση συχνότητας μόνο του και αποφασίζει εάν η ζώνη συχνότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για CR ή όχι. Σε ένα

τέτοιο σύστημα, είναι σημαντικό να αποφευχθεί η παρέμβαση προς το υπάρχον σύστημα επικοινωνιών. Ειδικότερα, ο ενεργός δέκτης είναι δύσκολο να αναγνωρίσει την κατάσταση παρέμβασης επειδή ο δέκτης δεν διαβιβάζει τα σήματα κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας. Στη συνέχεια, εστιάζουμε στο "ενεργό τύπο συνειδητοποίησης" και εξετάζουμε το σύστημα διανομής συχνότητας με την ελαχιστοποίηση της επιρροής προς τα συστήματα επικοινωνιών.

Μερικές λύσεις για την αποφυγή της παρέμβασης είναι οι εξής:

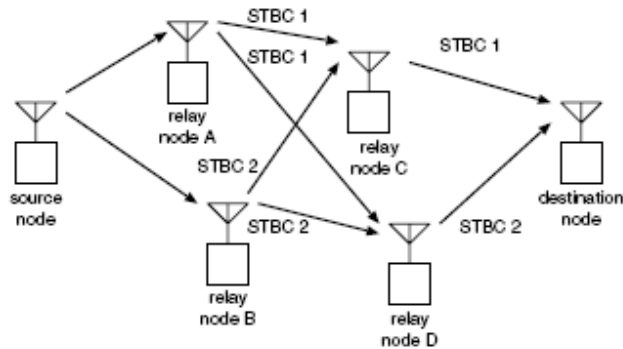
1. Αποφυγή παρέμβασης χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο MAC
2. Χρήση συστημάτων άδειας παρέμβασης όπως το UWB
3. Μείωση παρέμβασης με τον περιορισμό της ισχύος μετάδοσης του πομπού CR
4. Ακύρωση παρέμβασης με τη χρησιμοποίηση της επεξεργασίας σήματος

Στα συμβατικά διανεμημένα συστήματα όπως τα WLAN χρησιμοποιείται η αποφυγή παρέμβασης βασισμένη στο πρωτόκολλο της MAC. Εντούτοις, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί δυναμικά ο πόρος συχνότητας στο CR, η τεχνική βασισμένη στο πρωτόκολλο MAC δεν είναι επαρκής. Εδώ, εστιάζουμε στη συνδυασμένη μέθοδο αποφυγής παρέμβασης. Σε αυτήν την μέθοδο, η επικοινωνία πολλαπλών βημάτων με μικρή ισχύ μετάδοση σε κάθε κόμβου εφαρμόζεται με την αποφυγή παρέμβασης χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο της MAC. Εδώ, καλούμε αυτό το σύστημα ως ένα ad-hoc cognitive radio.

### **3.6.2 Ad-hoc σύστημα διανομής συχνότητων χρησιμοποιώντας STBC distributed ARQ**

Γενικά, τα multihop ad-hoc δίκτυα επικοινωνίας απαιτούν την εύρεση της διαδρομής της επικοινωνίας πριν διαβιβαστεί το πακέτο. Εντούτοις, εάν εφαρμόσουμε την επικοινωνία πολλαπλών βημάτων στο σύστημα διανομής συχνότητων, η παρέμβαση από τα περιβάλλοντα συστήματα κυμαίνεται επειδή ο συγχρονισμός μετάδοσης σημάτων από τα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνιών δεν μπορεί να γίνει αντιληπτός στα CR τερματικά. Επομένως, η τεχνική δρομολόγησης που προτείνεται για τα ad-hoc δίκτυα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Κατόπιν σε αυτό το έγγραφο, προτείνεται το STBC distributed ARQ που έχει προταθεί για τα χωρίς δρομολόγηση ad-hoc δίκτυα. Στο STBC distributed ARQ, η αναμετάδοση πακέτων από τους περιβάλλοντες κόμβους χρησιμοποιείται αντί της δρομολόγησης. Επιπλέον, το κέρδος ποικιλομορφίας μπορεί να επιτευχθεί με την κωδικοποίηση με έναν από τους κλάδους STBC σε κάθε κόμβο. Με τη χρησιμοποίηση αυτής της μεθόδου, εάν η περιοχή παρέμβασης λόγω των υπάρχοντων συστημάτων επικοινωνιών εμφανίζεται με τη διαδρομή από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού, η περιοχή παρέμβασης μπορεί να παρακαμφθεί με την αναγνώριση του ραδιοπεριβάλλοντος χρησιμοποιώντας την ανίχνευση φέροντος σε κάθε κόμβο. Κατά συνέπεια, η επικοινωνία μέσω άλλων διαδρομών μπορεί να καθιερωθεί. Με άλλα λόγια, το κανάλι διαμορφώνεται με την επιλογή των συνδέσεων από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού σύμφωνα με το ραδιοπεριβάλλον με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου STBC distributed ARQ.

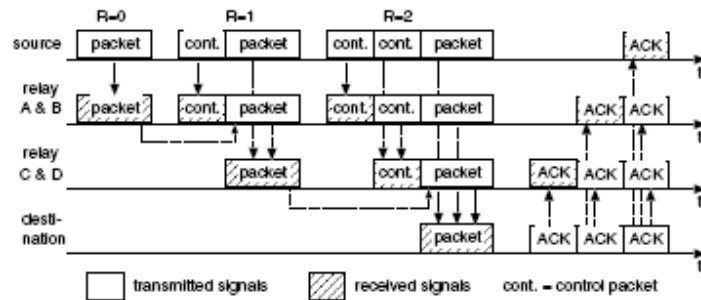




Εικόνα 68 : Συνεργαζόμενα δίκτυα πολλαπλών βημάτων

Στην παραπάνω εικόνα, το πακέτο δεδομένων διαβιβάζεται από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού με την αναμετάδοση μέσω των ενδιάμεσων κόμβων. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος επικοινωνιών πολλαπλών βημάτων, η συνεταιριστική μέθοδος ποικιλομορφίας (cooperative diversity method) εφαρμόζεται με την εκτίμηση μιας κεραίας κάθε κόμβου ως ένα κλάδο. Η ποικιλομορφία STBC χρησιμοποιείται συχνά για το συνεταιριστικό σύστημα ποικιλομορφίας επειδή οι πληροφορίες θέσης καναλιών στον πομπό δεν απαιτούνται. Στο αρχικό συνεταιριστικό σύστημα ποικιλομορφίας, η διαδρομή από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού αποφασίζεται πριν από τη μετάδοση. Εντούτοις, εάν μερικοί κόμβοι παρεμβάλλονται από άλλα συστήματα επικοινωνιών ή αλλάξει η θέση των κόμβων, μερικές συνδέσεις επικοινωνίας παρεμποδίζονται και η μετάδοση πακέτων δεν ολοκληρώνεται. Επομένως, σε αυτήν την μελέτη, θεωρούμε το πακέτο χωρίς να αποφασίσουμε τη διαδρομή εκ των προτέρων. Σε αυτήν την μέθοδο, όταν διαβιβάζει ο κόμβος πηγής το πακέτο στον κόμβο προορισμού, οι περιβάλλοντες κόμβοι ανιχνεύουν επίσης το πακέτο. Εάν το λάθος εμφανίζεται στον κόμβο προορισμού, το πακέτο αναμεταδίδεται ταυτόχρονα από τον κόμβο πηγής και τους ενδιάμεσους κόμβους σύμφωνα με το συγχρονισμό του πακέτου ελέγχου που διαβιβάζεται από τον κόμβο πηγής ως έναυσμα. Με τη χρησιμοποίηση τέτοιας αναμετάδοσης, τα πακέτα καταφθάνουν αξιόπιστα στον κόμβο προορισμού.

Η εικόνα 69 παρουσιάζει την εικόνα της μετάδοσης του STBC distributed ARQ. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι επιλέγουν έναν από τους κλάδους STBC όταν εκτελείται η αναμετάδοση πακέτων. Συγχρόνως, πριν από την αναμετάδοση, ο ενδιάμεσος κόμβος αναγνωρίζει τη ζώνη συχνότητας από την ανίχνευση φέροντος προκειμένου να αποφύγει την παρέμβαση προς τα περιβάλλοντα συστήματα. Η διαδικασία μετάδοσης παρουσιάζεται κατωτέρω.



Εικόνα 69 : Διαδικασία μετάδοσης πακέτων για STBC distributed ARQ

(1) Πρώτα, ο κόμβος πηγής διαβιβάζει το πακέτο δεδομένων προς τον κόμβο προορισμού. Ο κόμβος προορισμού και οι περιβάλλοντες κόμβοι λαμβάνουν και ανιχνεύουν το πακέτο. Εάν ο προορισμός του πακέτου δεν είναι οι κόμβοι τους, το λάθος του αποκωδικοποιημένου πακέτου ελέγχεται και το πακέτο χωρίς λάθος αποθηκεύεται στη μνήμη με την ταυτότητα πακέτων.

(2) Εάν ο κόμβος προορισμού μπορεί να λάβει το πακέτο χωρίς λάθος, ο κόμβος προορισμού επιστρέφει το πακέτο αναγνώρισης (ack) προς τον κόμβο πηγής.

(3) Εάν ο κόμβος πηγής λάβει το ack, η μετάδοση πακέτων ολοκληρώνεται. Εντούτοις, εάν το πακέτο ack δεν παραλαμβάνεται μέσα σε ορισμένο χρόνο, το πακέτο ελέγχου για την αναμετάδοση στέλνεται R φορές. Το R είναι ο αριθμός αναμεταδόσεων του ίδιου πακέτου δεδομένων από τον κόμβο πηγής. Το πακέτο ελέγχου περιέχει την ταυτότητα κόμβων πηγής, την ταυτότητα κόμβων προορισμού, την ταυτότητα πακέτων, και τα bits για το συγχρονισμό. Μετά από τη μετάδοση των πακέτων ελέγχου, το πακέτο δεδομένων αναμεταδίδεται.

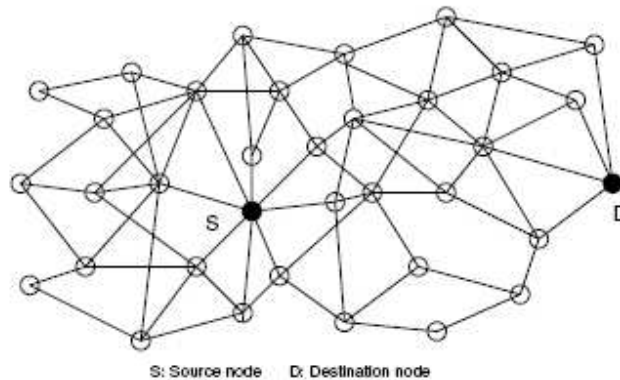
(4) Στον ενδιαμέσο κόμβο που έχει ήδη το πακέτο δεδομένων για την αναμετάδοση χωρίς λάθος με τη χρησιμοποίηση του προηγούμενου πλαισίου, τα πακέτα ελέγχου μεταδίδονται R-n φορές ρυθμίζοντας το λαμβανόμενο συγχρονισμό πακέτων ελέγχου και μετά από αυτό το πακέτο δεδομένων διαβιβάζεται ταυτόχρονα από τον κόμβο πηγής και τους περιβάλλοντες ενδιαμέσους κόμβους που κωδικοποιούνται από έναν από τους κλάδους STBC, όπου το n είναι ο αριθμός μετάδοσης των πακέτων ελέγχου που υποδεικνύονται στο παρόν λαμβανόμενο πακέτο ελέγχου.

(5) Στο δέκτη του κόμβου προορισμού, η αποκωδικοποίηση STBC λαμβάνει χώρα και τα σήματα δεδομένων ανακτώνται. Εάν ο κόμβος προορισμού λάβει σωστά το πακέτο, τα πακέτα ack αναμεταδίδονται ταυτόχρονα στον κόμβο πηγής όπως φαίνεται στην εικόνα 4. Ο αριθμός μετάδοσης των σημάτων ack από τον κόμβο προορισμού είναι ο ίδιος με τον αριθμό μετάδοσης του πακέτου δεδομένων από τον πομπό μέχρι R+1 φορές. Επίσης, γίνεται επανάληψη των βημάτων (3) έως (5) μέχρι το πακέτο ack να φτάσει στον κόμβο πηγής ή ο αριθμός των αναμεταδόσεων φτάσει το κατώφλι που έχουμε ορίσει.

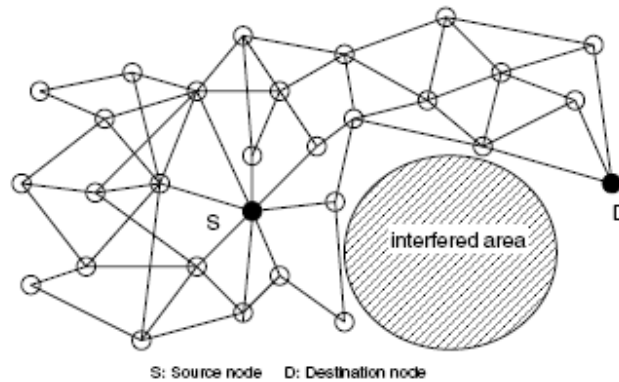
Σαν αποτέλεσμα, το σύστημα STBC distributed ARQ μπορεί να επιτύχει την αξιόπιστη επικοινωνία από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού χωρίς πρωτόκολλο δρομολόγησης. Εάν κάθε κόμβος λαμβάνει την ενεργό επικοινωνία από την ανίχνευση του φέροντος όταν εκτελείται η αναμετάδοση, ο κόμβος περιμένει τη μετάδοση έως ότου

τελειώσει η επικοινωνία και μετά ξαναξεκινά η αναμετάδοση. Με τη χρήση τέτοιας λειτουργίας, η επικοινωνία πολλαπλών βημάτων καθιερώνεται με την αποφυγή της περιοχής παρέμβασης.

Η εικόνα 70 παρουσιάζει τις συνδέσεις επικοινωνίας χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο χωρίς την περιοχή παρέμβασης. Η εικόνα 71 παρουσιάζει τις συνδέσεις επικοινωνίας χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο με την περιοχή παρέμβασης που προκαλείται από άλλα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Οι συνδέσεις επικοινωνίας επεκτείνονται προς όλη την κατεύθυνση εάν ο αριθμός αναμετάδοσης αυξάνεται. Και στις δύο εικόνες, μόνο οι κοντινότερες συνδέσεις είναι υποδειγμένες. Σε πρακτικά συστήματα, οι συνδέσεις επικοινωνίας καθιερώνονται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά διάδοσης μεταξύ των κόμβων. Φαίνεται ότι η επικοινωνία υψηλής απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί εάν δεν υπάρχει η περιοχή παρέμβασης επειδή το μέγιστο κέρδος ποικιλομορφίας με τη χρησιμοποίηση STBC μπορεί να επιτευχθεί και ο αριθμός αναμετάδοσης είναι μικρός. Αφ' ετέρου, εάν εξετάζεται η περιοχή παρέμβασης λόγω άλλων συστήμα επικοινωνιών, οι ενδιάμεσοι κόμβοι περιμένουν τη μετάδοση πακέτων από την ανίχνευση φέροντος και η επικοινωνία γύρω από την περιοχή διακόπτεται. Εντούτοις, τα πακέτα δεδομένων αναμεταδίδονται μέσω άλλων συνδέσεων έτσι ώστε να έχουμε αξιόπιστη επικοινωνία. Από τους ανωτέρω λόγους, το προτεινόμενο διανεμημένο σύστημα STBC ARQ είναι κατάλληλο για τη χρήση στο σύστημα διανομής συχνότητας βασισμένο στην ιδέα του cognitive radio.



Εικόνα 70 : Σύνδεση επικοινωνίας STBC distributed ARQ χωρίς παρέμβαση

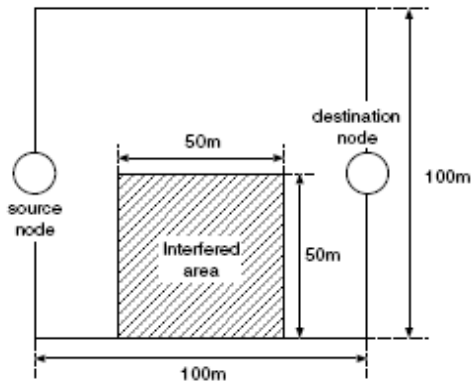


Εικόνα 71 : Σύνδεση επικοινωνίας STBC distributed ARQ με παρέμβαση

Προκειμένου να εξετάσουμε την απόδοση του προτεινόμενου CR, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε υπολογιστή. Οι παράμετροι προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 7. Σε αυτήν την προσομοίωση, προκειμένου να αποφευχθεί offset στον συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων όταν εκτελείται η ταυτόχρονη αναμετάδοση, χρησιμοποιείται η διαμόρφωση OFDM. Ο κλάδος του STBC επιλέγεται τυχαία σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο. Η περιοχή προσομοίωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 72. Εδώ, η απόσταση του κόμβου πηγής και του κόμβου προορισμού είναι 100 m. Η θέση των ενδιάμεσων κόμβων ηλεκτρονόμων βρίσκεται τυχαία στην τετραγωνική περιοχή προσομοίωσης 100x100 μεταξύ του κόμβου πηγής και του κόμβου προορισμού. Υποθέτουμε επίσης ότι υπάρχει περιοχή παρεμβολής 50x50 όπως φαίνεται στην εικόνα 72.

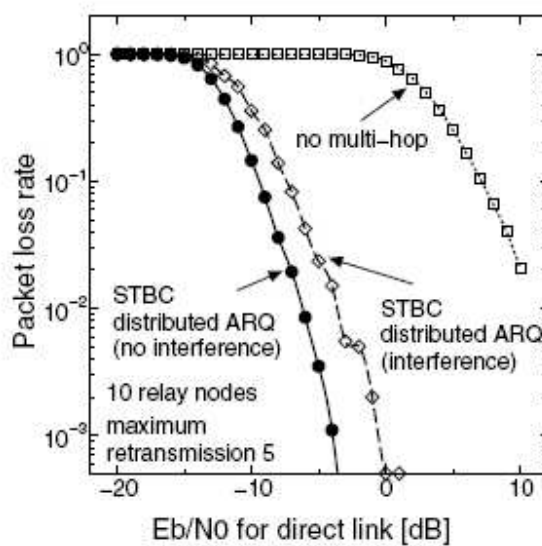
Πίνακας 7 : Παράμετροι προσομοίωσης

Modulation method	QPSK
Number of subcarriers	128
FFT size	128
Length of guard interval	25 samples
FEC	Convolutional code (R=1/2, K=7)
Number of data symbols	60 symbols
Packet length	7674 bits
The number of relay nodes	10
The maximum number of re-transmission	5
Path loss exponent	3
Reference distance	1 [m]

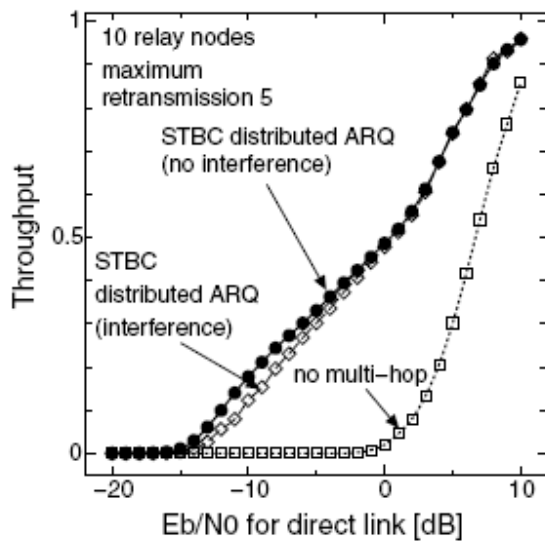


Εικόνα 72 : Περιοχή προσομοίωσης

Η εικόνα 73 παρουσιάζει το ποσοστό απώλειας πακέτων του προτεινόμενου συστήματος. Το ποσοστό απώλειας πακέτων είναι το κλάσμα των πακέτων που δεν έφτασαν στον κόμβο προορισμού προς το μέγιστο αριθμό αναμεταδόσεων. Η εικόνα 74 παρουσιάζει τη ρυθμοαπόδοση (throughput) της προτεινόμενης μεθόδου. Συγκρίνουμε την απόδοση της συμβατικής επικοινωνίας πολλαπλών βημάτων με ή χωρίς παρέμβαση. Ο οριζόντιος άξονας παρουσιάζει το σηματοθορυβικό λόγο της άμεσης σύνδεσης από τον κόμβο πηγής στον κόμβο προορισμού. Μπορεί να φανεί ότι η απόδοση του STBC distributed ARQ βελτιώνεται με τη χρησιμοποίηση της αναμετάδοσης και του STBC. Ακόμα κι όταν υπάρχει η περιοχή παρεμβολής, η μείωση της απόδοσης είναι μικρή. Στο προτεινόμενο σύστημα, οι συνδέσεις επικοινωνίας επεκτείνονται σε όλες τις κατευθύνσεις, έτσι η πρόσθετη κατανάλωση ισχύος απαιτείται. Εντούτοις, δεδομένου ότι η σύνδεση πραγματικού χρόνου καθιερώνεται μεταξύ του κόμβου πηγής και κόμβου προορισμού με την αναμετάδοση, η αξιόπιστη επικοινωνία μπορεί να γίνει πραγματικότητα.



Εικόνα 73 : Ρυθμός απώλειας πακέτων για το προτεινόμενο σύστημα



Εικόνα 74 : Throughput για το προτεινόμενο σύστημα

### 3.7 Ultra Wide Band και Cognitive Radio

Τα συστήματα επικοινωνιών ευρείας ζώνης (UWB) είναι ένα παράδειγμα της τεχνολογίας κατάλληλο για την εφαρμογή του cognitive radio. Τα συστήματα UWB είναι ελκυστικά για το μεγάλο εύρος ζώνης τους, τον θόρυβο χαμηλής ισχύος και τη σηματοδότησή τους, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μετάδοση πέρα από εξουσιοδοτημένες ζώνες παράγοντας ένα ελεγχόμενο επίπεδο παρέμβασης στα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνιών. Κατά συνέπεια οι πρόσφατες έρευνες έχουν στραφεί στην έρευνα για τα ζητήματα συνύπαρξης σχετικά με την τεχνολογία UWB, υποθέτοντας ότι τέτοια συστήματα θα λειτουργήσουν σε ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από την παρουσία ετερογενών χρηστών.

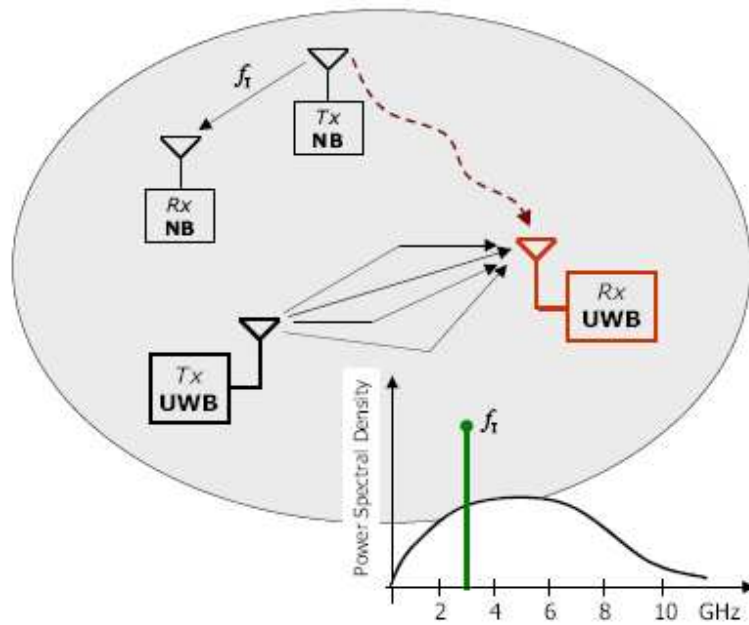
Έχει υπάρξει ένα αναδυόμενο ενδιαφέρον για τα συστήματα μετάδοσης με μεγάλο εύρος ζώνης και για εμπορικές αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές. Η UWB είναι μια νέα τεχνολογία που χαρακτηρίζεται από τα σήματα με ένα τεράστιο κατειλημμένο εύρος ζώνης (μεγαλύτερο από 500 MHz) που λαμβάνεται με τη χρησιμοποίηση των πολύ σύντομων παλμών στο πεδίο του χρόνου (Impulse Radio) ή με τη χρησιμοποίηση του OFDM. Παραδείγματος χάριν, τα συστήματα UWB Impulse Radio επικοινωνούν με time-hopping (TH) ή με direct sequence (DS) spread-spectrum σήματα χρησιμοποιώντας ένα σύνολο εξαιρετικά σύντομων παλμών, με αποτέλεσμα να διαδίδεται η ενέργεια του σήματος πολύ αραιά άνω των διάφορων GHz.

Ένα πρώτο παράδειγμα της αλλαγής στην παραδοσιακή υποδιαίρεση του φάσματος αντιπροσωπεύθηκε με το άνοιγμα από την FCC στα 7,5 GHz του εύρους ζώνης για UWB σηματοδότηση στην περιοχή 3,1 και 10,6 GHz. Σε αυτήν την ζώνη όπου άλλες εξουσιοδοτημένες εφαρμογές λειτουργούν, η μετάδοση UWB επιτρέπεται, με

μερικά όρια στη διαβιβασθείσα ισχύ ώστε να εξασφαλιστεί ένας αμελητέος αντίκτυπος από την άποψη της παρέμβασης.

Αν και τα επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος για τα UWB είναι εξαιρετικά χαμηλά (-41 dBm/MHz), η FCC είχε επιτρέψει για πρώτη φορά τη χωρίς άδεια χρήση στις εξουσιοδοτημένες ζώνες. Σε αυτήν την γραμμή, το CR θα μπορούσε να αντιπροσωπεύσει μια πληρέστερη λύση δεδομένου ότι ψάχνει ενεργά το αχρησιμοποίητο φάσμα και αρχίζει να μεταδίδει μέσα σε εκείνες τις ζώνες, και τελικά σταματά να μεταδίδει όταν οι πρωταρχικοί χρήστες παρουσιαστούν. Για να αποτρέψουν την παρεμβολή στους πρωταρχικούς χρήστες, τα σήματα UWB πρέπει να έχουν μια πολύ χαμηλή φασματική πυκνότητα ισχύος και κατά συνέπεια, η ισχύς μετάδοσης πρέπει να κρατηθεί χαμηλή. Σε ένα περιβάλλον πολλών χρηστών, το ζήτημα για το πώς να ελεγχθεί η αθροισμένη παρέμβαση UWB είναι ακόμα υπό συζήτηση. Η UWB έχει μερικά πλεονεκτήματα σε θέματα των παραδοσιακών συστημάτων στη δυνατότητα να υπάρξουν πολύ υψηλοί ρυθμοί δεδομένων, στη δυνατότητα να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα πολλαπλών διαδρομών, στην ικανότητα εντοπισμού και στη χαμηλή πολυπλοκότητα εφαρμογής. Η UWB θα είναι πιθανότατα η τεχνολογία που θα υποστηρίξει και τους χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα, και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για εφαρμογές πολυμέσων.

Η χρήση μετάδοσης σε μεγάλο εύρος ζώνης όπως στις επικοινωνίες UWB εισάγει νέες προκλήσεις. Ειδικότερα, η επιτυχής επέκταση των συστημάτων UWB απαιτεί ότι πρέπει να συνυπάρξουν και να υποστηρίξουν σήματα που παρεμβάλλει το ένα στο άλλο. Στην εικόνα 75, παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό CR σενάριο με πρόβλημα συνύπαρξης. Ειδικότερα, η εικόνα παρουσιάζει ένα ρεαλιστικό σενάριο όπου ένα σύστημα UWB υποστηρίζει το ραδιοφάσμα που ενοικιήθηκε ήδη από περιορισμένης ζώνης επικοινωνίες (narrowband-NB). Σε αυτό το σενάριο, πρέπει να καθορίσουμε πρώτα τον αντίκτυπο των παρεμβολών NB στο σύστημα UWB και να προσαρμόσουμε έπειτα τη μετάδοση UWB (π.χ., φάσμα) για να εγγυηθούμε μια πιθανή συνύπαρξη. Επομένως, είναι απαραίτητο να μελετηθεί η αμοιβαία παρέμβαση μεταξύ των ευρυζωνικών σημάτων και των υπάρχοντων ασύρματων συστημάτων προκειμένου να αξιολογηθεί μια πιθανή συνύπαρξη.



Εικόνα 75 : Πιθανό σενάριο συνύπαρξης με συστήματα UWB και NB

Έτσι, μετά από μελέτες, φαίνεται μεγάλη δυνατότητα των συστημάτων UWB στην προσαρμογή του διαβιβασθέντος φάσματος για να αντιδράσουν στην περιορισμένη ζώνης παρέμβαση και συγχρόνως να εγγραστούν μια χαμηλή φασματική εκπομπή πέρα από την περιορισμένης ζώνης επικοινωνία. Με την κράτηση σε χαμηλά επίπεδα της αμοιβαίας παρέμβασης, οι τεχνικές μετάδοσης UWB είναι μια πιθανή τεχνολογία για μια αποδοτική χρήση φάσματος που αντιπροσωπεύει τον κύριο στόχο για το cognitive radio.



### 3.8 Εφαρμογές Cognitive Radio σε καταναλωτές

Μέχρι σήμερα, ένα μεγάλο μέρος της συζήτησης γύρω από το cognitive radio έχει εστιάσει στη δυνατότητά του για στρατιωτική χρήση και χρήση υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Ένα ραδιοδίκτυο που έχει τη δυνατότητα να σχεδιάσει τη βέλτιστη και προσαρμόσιμη διαμόρφωσή του μετά από την απαίτηση του χρήστη κατέχει σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα. Επιπλέον, τα cognitive radios είναι σε θέση να λειτουργήσουν και να προσαρμοστούν στο μπλοκάρισμα και την παρέμβαση, που εξασφαλίζουν ότι η ποιότητα της υπηρεσίας διατηρείται. Οι καταναλωτικές αγορές προσφέρουν μια άλλη πιθανή χρήση αυτής της τεχνολογίας. Ο συνυπολογισμός της CR τεχνολογίας σε ένα καταναλωτικό δίκτυο θα επέτρεπε τη δυναμική κατανομή του φυσικού στρώματος και των πόρων δικτύωσης που μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας στους καταναλωτές και θα μπορούσε να κάνει εφικτές τις επιχειρησιακές στρατηγικές που θα βελτίωναν την οικονομική ευρωστία του φορέα παροχής υπηρεσιών.

Δύο από τις σημαντικότερες ανάγκες των CRs στις αγορές στρατιωτικών και υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης είναι η διαλειτουργικότητα και οι εγγυήσεις QoS. Οι ανάγκες των καταναλωτών δεν είναι πολύ διαφορετικές αν και υπάρχουν προστιθέμενες διαστάσεις της πολυπλοκότητας που λαμβάνονται υπόψη. Η διαλειτουργικότητα είναι απαραίτητη για να παρέχουμε τις πανταχού παρούσες επικοινωνίες στους καταναλωτές με την δυνατότητα τα διαφορετικά radios να επικοινωνήσουν. Η σημασία της ποιότητας των υπηρεσιών στις καταναλωτικές αγορές είναι αναμφισβήτητη, αλλά ο σκοπός είναι διαφορετικός. Αντί της παροχής αξιόπιστων και γερών επικοινωνιών όπως απαιτείται από τους στρατιωτικούς και δημόσιας ασφάλειας χρήστες, τα CRs επιτρέπουν στους καταναλωτές να ανταλλάξουν τους πόρους για τις επιθυμητές ανάγκες των εφαρμογών τους. Η ποιότητα της υπηρεσίας QoS στρέφει το ενδιαφέρον της σε προσαρμογές στο φυσικό στρώμα για να εξασφαλίσει ένα κανάλι επικοινωνιών με ορισμένες εγγυήσεις για τη χρήση εύρους ζώνης και τη ρυθμοαπόδοση των δεδομένων. Μερικές από αυτές τις λειτουργίες είναι η χρήση εύρους ζώνης, η απόδοση φάσματος, η συχνότητα εμφάνισης λανθασμένων bits, η πιθανότητα χαμένης κλήσης, η ρυθμοαπόδοση, η κατανάλωση ισχύος, και η υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Η παροχή μιας εγγυημένης QoS στα radios δεν είναι τόσο απλή όπως η χρήση εγγυημένου εύρους ζώνης. Η πρόσβαση στο φάσμα είναι μια μεγάλη ανησυχία σε αυτά τα συστήματα καθώς επίσης και οι ανταλλαγές στην πολυπλοκότητα και την απόδοση που μπορούν να επιτευχθούν. Παραδείγματος χάριν, εάν ένας χρήστης προσπαθεί να μιλήσει χρησιμοποιώντας μια απλή στρατηγική κωδικοποίησης φωνής 64 kbps, αυτό είναι ισοδύναμο (χωρίς τις έξυπνες τεχνικές κωδικοποίησης πηγής πάνω από το κωδικοποιημένο σύστημα) με το εύρος ζώνης που απαιτείται. Στα ασύρματα δίκτυα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτό είναι ισοδύναμο με την απαίτηση 64 kHz του φάσματος (πάλι, αγνοώντας άλλους παράγοντες των συστημάτων και υποθέτοντας ότι ένα σύμβολο ανά δευτερόλεπτο παίρνει ένα Hz). Εντούτοις, ως τμήμα του φυσικού στρώματος των radios και της νοημοσύνης και της ευελιξίας των CRs, ένα σχέδιο διαμόρφωσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί που παρέχει 4 bits ανά σύμβολο όπως QAM16. Τώρα, το σήμα χωρά μέσα σε 16 kHz με ένα ισοδύναμο ρυθμό δυαδικών ψηφίων 64 kbps.

### 3.8.1 Παράδειγμα υπηρεσίας καταναλωτή

Ένα παράδειγμα ενός δικτύου που παρέχει τις καταναλωτικές υπηρεσίες και όπου το cognitive radio μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει τις καλύτερες υπηρεσίες είναι ένα ξενοδοχείο διασκέψεων. Ας υποθέσουμε ότι το ξενοδοχείο διασκέψεων εγκαθιστά ένα 802.11 δίκτυο όπου το κόστος της χρήσης ασύρματου δικτύου συσσωρεύεται στην τιμή των υπηρεσιών συνδιάσκεψης και των δωματίων των φιλοξενουμένων. Κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης διάσκεψης, το δίκτυο θα χρησιμοποιηθεί από τους παρουσιαστές στη διάσκεψη, τους συμμετέχοντες που μένουν στο ξενοδοχείο διασκέψεων, τους συμμετέχοντες που μένουν σε φτηνότερο ξενοδοχείο δίπλα από το συγκεκριμένο, και τους φιλοξενούμενους του ξενοδοχείου που δεν έχουν σχέση με τα παραπάνω. Χωρίς περιορισμούς στη χρήση, η κάθε συμβατή συσκευή στο κτήριο με το 802.11 έχει την ίση δυνατότητα να έχει πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Σε περιόδους βαριάς απαίτησης, όλοι οι χρήστες έχουν αργές υπηρεσίες και διακοπές που οδηγούν στη δυσαρέσκεια για την υπηρεσία που το ξενοδοχείο παρέχει.

Μια λύση είναι να περιοριστεί η πρόσβαση στο δίκτυο και να καθιερωθεί χρέωση για τη χρήση του με βάση τον τύπο χρηστών. Έτσι, ενώ τα αρκετά υψηλά ποσοστά θα μειώσουν την απαίτηση για την πρόσβαση Διαδικτύου, υπάρχει ακόμα μια δυνατότητα για την ποιότητα των διασπάσεων υπηρεσιών. Χωρίς ένα σύστημα που θέτει προτεραιότητα στους χρήστες, η ποιότητα των προβλημάτων υπηρεσιών θα συνεχιστεί. Οι συμμετέχοντες διασκέψεων θα απογοητευθούν εάν ένας παρουσιαστής που προσπαθεί να διευθύνει μια επίδειξη πραγματικού χρόνου μέσω του Διαδικτύου έχει προβλήματα στην πρόσβαση στο δίκτυο. Για να διευκολύνει την ικανοποίηση με την ποιότητα των υπηρεσιών διασκέψεων τους, το ξενοδοχείο πρέπει να έχει έναν τρόπο με τον οποίο ο παρουσιαστής έχει πρόσβαση στους πόρους που απαιτούνται για να διευθύνουν μια ομαλή παρουσίαση. Μια γρήγορη λύση θα ήταν να καθιερωθούν δύο δίκτυα, ένα από τα οποία είναι περιορισμένο σε ένα μικρό αριθμό παρουσιαστών και χρηστών προτεραιότητας.

Ένα CR δίκτυο αντιπροσωπεύει μια πιο ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα ακόμη και σε μια περίπτωση όπου η υπηρεσία Διαδικτύου παρέχεται χρησιμοποιώντας μια ενιαία ραδιοσυχνότητα. Σε κάθε χρήστη θα μπορούσε να οριστεί μια προτεραιότητα για τη χρήση υπηρεσιών βασισμένη στους στόχους υπηρεσιών του ξενοδοχείου και στη συνέχεια, το CR θα βελτιστοποιούσε την πρόσβαση στο δίκτυο έτσι ώστε στους χρήστες υψηλής προτεραιότητας να δοθεί προτεραιότητα πέρα από τους χρήστες χαμηλότερης προτεραιότητας, ακόμα κι αν σήμανε ότι μερικοί χρήστες θα αποσυνδέονταν από το δίκτυο έως ότου να μειωθεί η απαίτηση για την υπηρεσία. Σε έναν περιορισμένο αριθμό παρουσιαστών διασκέψεων θα μπορούσε να δοθεί πιο υψηλή προτεραιότητα ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι παρουσιάσεις τους πηγαίνουν ομαλά. Στο άλλο άκρο, οι φιλοξενούμενοι μη-διασκέψεων που πληρώνουν μειωμένες χρεώσεις στο ξενοδοχείο μπορούν να έχουν πρόσβαση στα δωμάτιά τους, αλλά μόνο "space available" πρόσβαση στην πολυάσχολη περιοχή διασκέψεων.

Για τον σχεδιασμό ενός interface για τον χρήστη πρέπει να γίνει εκτεταμένη έρευνα. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την κατασκευή της διεπαφής που πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως να είναι φιλικό προς τον χρήστη και να έχει τη δυνατότητα αποστολής δεδομένων στην cognitive μηχανή. Στους καταναλωτές μπορεί να δοθεί η δυνατότητα να επιλέγουν ποιο επίπεδο ποιότητας θέλουν για την εκάστοτε υπηρεσία,

παραδείγματος χάριν, όταν επιλέγουν για το εύρος ζώνης, ένα μήνυμα θα μπορούσε να εμφανιστεί και να δείξει εάν εκείνο το επίπεδο ήταν ικανοποιητικό για "το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο" ή για "Internet browsing" ή κάποια άλλη υπηρεσία που ένας καταναλωτής απαιτήσει. Μία άλλη επιλογή θα μπορούσε να ειδοποιεί τους καταναλωτές για τα επίπεδα στην ενέργεια των μπαταριών σύμφωνα με την κατανάλωση ισχύος που υπάρχει τη δεδομένη στιγμή.

### 3.9 Χρήση CR για μείωση Η/Μ ακτινοβολίας

Σε αυτή την παράγραφο μελετάμε την επίδραση του cognitive radio στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι κύριες συνέπειες της αύξησης αυτής της ακτινοβολίας είναι πιθανά προβλήματα υγείας και αύξηση στο απόλυτο επίπεδο ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Για πολλούς διαφορετικούς λόγους, μια δημόσια συζήτηση είναι αυτήν την περίοδο εν εξελίξει στα πιθανά αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία. Ένας από τους κύριους λόγους που γίνονται συζητήσεις για τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία είναι η εκθετική ανάπτυξη των σταθμών βάσεων. Αυτή η συζήτηση είναι πολύ περίπλοκη επειδή υπάρχουν δύο αντίθετες θέσεις. Η πρώτη, που εκφράζεται από το μέρος κυρίως των χειριστών και των κατασκευαστών, υποστηρίζει ότι "δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος", και η δεύτερη θέση, που υπερασπίζεται από μερικές ομάδες (ενώσεις χρηστών, οικολογικές οργανώσεις, κτλ.) δηλώνει ακριβώς το αντίθετο.

Σε αυτό το κείμενο ο στόχος μας, δεν είναι να υποστηρίξουμε μια θέση υπό μια έννοια, αλλά να προσδιορίσουμε και να προτείνουμε μερικές αρχικές τεχνικές λύσεις για τη μείωση των πιθανών κινδύνων. Σήμερα, όταν υπάρχει πιθανός κίνδυνος (για τη δημόσια υγεία), οποιοδήποτε θέμα κι αν αφορά, γίνεται αποδεκτό γενικά ότι η "αρχή προφύλαξης" (precaution principle) πρέπει να τεθεί σε εφαρμογή. Οι ηθικές σκέψεις τείνουν να οδηγήσουν σε μια ξαφνική συνειδητοποίηση όλου του φαινομένου, οι οποίες διακινδυνεύουν ενδεχομένως την περιβαλλοντική ισορροπία. Επομένως στη συνέχεια δίνονται διευκρινίσεις στις δημόσιες και ιατρικές απαιτήσεις που προτείνουν να εφαρμόσουν τη "αρχή προφύλαξης" γύρω από αυτό το θέμα.

Ο γενικός στόχος της πρότασής είναι να μειωθεί η έκθεση του κοινού στην ακτινοβολία σε ένα ελάχιστο που είναι συμβατό με μια καλή ποιότητα της υπηρεσίας. Μπορούμε να συνοψίσουμε την προσέγγισή μας με το ρητό ότι "θα επιθυμούσαμε να μειώσουμε το ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο με να στείλουμε το σωστό σήμα στη σωστή κατεύθυνση όταν χρειάζεται." Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιώντας όλες τις πληροφορίες για το περιβάλλον του χρήστη, το cognitive radio θα μπορούσε να λάβει τις αποδοτικές και γρήγορες λύσεις λόγω της αντίληψης του περιβάλλοντος. Αυτές οι λύσεις είναι βασισμένες στις τεχνικές επεξεργασίας σήματος, όπως η εκτίμηση καναλιού, έξυπνες κεραίες κτλ..

Από θεωρητική άποψη, το κέρδος στην αποδοτικότητα φάσματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει το επίπεδο ακτινοβολίας. Εντούτοις, από πρακτική άποψη, όλοι οι δράστες στην περιοχή τηλεπικοινωνιών προτιμούν να χρησιμοποιήσουν αυτό το κέρδος για να αυξήσουν το ποσοστό δυαδικών ψηφίων με ένα σταθερό επίπεδο ισχύος από το να διατηρήσουν ένα σταθερό ποσοστό δυαδικών ψηφίων με ένα

χαμηλότερο επίπεδο ισχύος. Επομένως, η προσέγγισή μας φαίνεται να αντιτάσσεται σε αυτές τις οικονομικές μέριμνες.

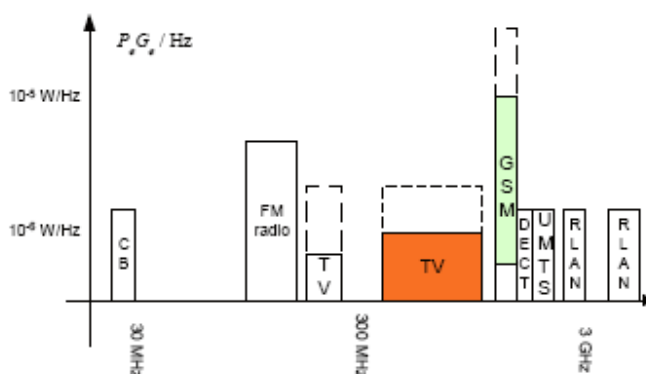
### 3.9.1 Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχει υπάρξει μια ιδιαίτερη αναβίωση στο ενδιαφέρον για την ασύρματη επικοινωνία, και σήμερα είναι ένας από τους γρηγορότερους αυξανόμενους τομείς στη βιομηχανία τηλεπικοινωνιών. Αυτό το βήμα προς τα εμπρός όχι μόνο έχει επεκτείνει την ασύρματη αγορά επικοινωνιών, αλλά έχει δημιουργήσει επίσης τις ευκαιρίες για νέα προϊόντα. Ο αριθμός ετερογενών ασύρματων υπηρεσιών δικτύων αυξάνεται εντυπωσιακά. Στις ευρωπαϊκές χώρες έχει υπάρξει μια έκρηξη στον αριθμό καταναλωτών κινητής επικοινωνίας. Επιπλέον, τα RLAN και HiperLAN συμβάλλουν επίσης σε μια αύξηση του αριθμού ασύρματων υπηρεσιών. Οι DAB και DVB-T είναι πρόσθετες υπηρεσίες στην περιοχή ραδιοφωνικής αναμετάδοσης. Η "κινητικότητα" είναι μια από τις σημαντικότερες λέξεις κλειδιά πίσω από αυτές τις υπηρεσίες. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της έκρηξης στις υπηρεσίες είναι ότι υπάρχει μια αύξηση στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Παραδείγματος χάριν, η εικόνα 76 παρουσιάζει την αποδοτικότητα φάσματος για τις αστικές επικοινωνίες στη Γαλλία. Μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει κανένα διαθέσιμο εύρος ζώνης κάτω από 2GHz. Αυτό μπορεί να εξηγήσει τα πολυάριθμα προγράμματα που προσφέρουν τις ψηφιακές επικοινωνίες στις 20, 40 και 60 ζώνες GHz. Εάν εξετάσουμε τα μελλοντικά Ultra Wide Band συστήματα, τα ad-hoc και PAN δίκτυα, το επίπεδο ακτινοβολίας θα αυξηθεί σε ένα τοπικό επίπεδο, ακόμα κι αν αυτά τα συστήματα είναι περιορισμένου φάσματος και χαμηλής ισχύος.

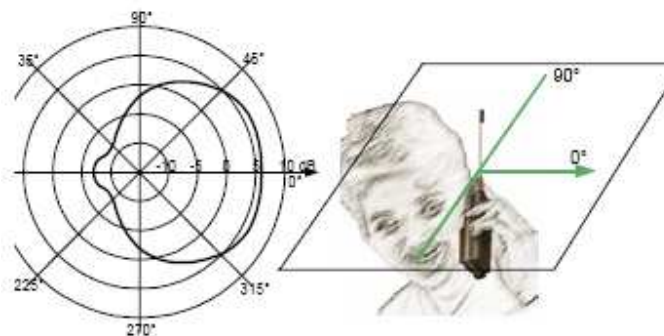
Η ισχύς εκπομπής ενός σήματος εκπομπής δίνεται από την εξίσωση :

$$\langle P \rangle = \frac{P_e G_e}{4\pi d^2} \text{ W/m}^2 \quad (1) ,$$

όπου  $\langle P \rangle$  είναι το δάνυσμα Poynting,  $P_e$  η ισχύς εκπομπής,  $G_e$  το κέρδος της κεραίας και  $d$  η απόσταση μεταξύ της κεραίας και του σημείου μέτρησης.



Εικόνα 76 : Το φάσμα των προτύπων στη ζώνη των 30 MHz-3 GHz



Εικόνα 77 : H/M ακτινοβολία κοντά σε άνθρωπο

Εάν η ισχύς εκπομπής είναι 1 Watt (για GSM κινητό έχουμε  $P_{\max} = 2 \text{ W}$ ), τα 41  $V/m$  ή  $4,5 \text{ W}/m^2$  που είναι τα μέγιστα κατώτατα όρια επιτυγχάνονται σε μια απόσταση 0,13 μέτρων από τον πομπό. Αυτό το κατώτατο όριο αντιστοιχεί στο αποδεκτό επίπεδο που καθορίζεται από διεθνείς οργανισμούς όπως η IEEE, η ICNIRP και η CENELEC. Επιπρόσθετα, όσο 'δυσκολότερο' είναι το κανάλι, τόσο μεγαλύτερη και η ισχύς που απαιτείται. Παραδείγματος χάριν, εάν το σήμα πρέπει να διαπεράσει ένα κτίριο, η ισχύς πολλαπλασιάζεται 3 έως και 5 φορές. Εάν εξετάζουμε την ακτινοβολία που παράγεται από μια πανκατευθυντική κεραία κοντά σε ένα ανθρώπινο σώμα, αυτή η ακτινοβολία διαιρείται σε τομείς σύμφωνα με την απόσταση από το εμπόδιο (παραδείγματος χάριν το ανθρώπινο κεφάλι στην εικόνα 77). Υπάρχει μια μεγάλη μείωση (30 dB) της κατευθυντικότητας απέναντι από τον κύριο λοβό. Επομένως, ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας (μέγιστο 50%) απορροφάται από το ανθρώπινο σώμα.

Χωρίς να το αντιλαμβανόμαστε, όλοι εκτιθόμαστε στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φυσική και τεχνητή). Η τεχνητή ακτινοβολία παράγεται όχι μόνο από τις κυψελοειδείς τηλεφωνικές υπηρεσίες αλλά και από τις γενικότερα αποδεκτές υπηρεσίες όπως το ραδιόφωνο και η τηλεόραση, οι υπολογιστές, τα ηλεκτροφόρα καλώδια, τα αστικά και στρατιωτικά ραντάρ, κτλ.. Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας (World Health Organization-WHO), το επίπεδο ακτινοβολίας κοντά σε ένα πομπό τηλεόρασης είναι περίπου 100 φορές πιο υψηλό από εκείνο που μετριέται στη φύση, και το μέσο επίπεδο έχει αυξηθεί τριπλάσια σε 30 έτη.

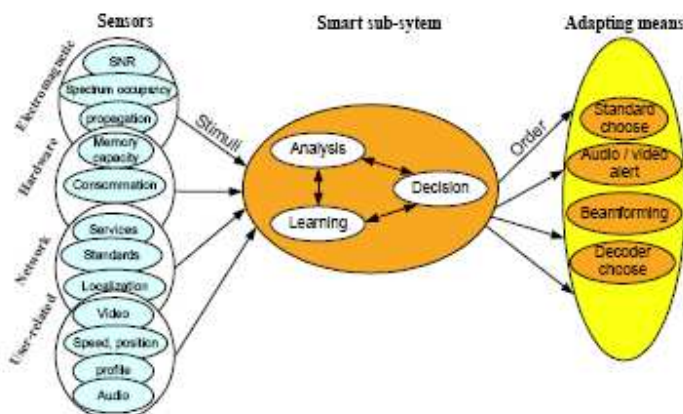
Η συζήτηση δεν είναι απλή επειδή αυτό που διακυβεύεται αφορά την οικονομία, τη βιομηχανία και τη δημόσια υγεία. Στην Ευρώπη, οι εκθέσεις εμπειρογνομόνων έχουν δημοσιευθεί σε κρατικό επίπεδο και επαληθεύονται και από δηλώσεις του WHO, αποκαλύπτουν ότι δεν υπάρχει κανένας αποδεδειγμένος κίνδυνος για την υγεία. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη την έλλειψη βεβαιότητας πέρα από αυτό το ζήτημα, η αρχή προφύλαξης πρέπει να εφαρμοστεί (παραδείγματος χάριν: καμιά κεραία σταθμών βάσης δεν πρέπει να εγκατασταθεί σε ακτίνα 200 μέτρων ενός σχολείου). Η αρχή προφύλαξης ορίζεται ως εξής: "η αρχή προφύλαξης είναι μια πολιτική αρχή σχετική με την προσεκτική διαχείριση των αβέβαιων κινδύνων, οι οποίοι μπορούν να ισχύσουν μόλις υπάρχουν μηχανισμοί ή πειραματικές ή επιδημιολογικές παρατηρήσεις που παρέχουν σε αυτήν την αρχή μια ελάχιστη επιστημονική βάση. Ο γενικός στόχος πρέπει να είναι μια μείωση της μέσης δημόσιας έκθεσης στο χαμηλότερο πιθανό επίπεδο, το

οποίο είναι συμβατό με τα πρότυπα υπηρεσιών. Οι κίνδυνοι υγείας εξαρτώνται από τη ζώνη συχνότητας. Μερικές εργασίες υποστηρίζουν ότι, σε χαμηλά επίπεδα, η πίεση EEG και αίματος αλλάζει και φυσικά υπάρχουν και οι θερμικές βιο-επιδράσεις.

Η ιδέα του cognitive radio αναφέρεται σε ένα σύστημα επικοινωνιών που είναι σε θέση να παρατηρήσει το περιβάλλον του, να το αναλύσει, και να αντιδράσει σε αυτό με συγκεκριμένο τρόπο. Αυτό το είδος ελέγχου φαίνεται στην εικόνα 78. Τα δεδομένα που επεξεργάζεται ένα σύστημα CR είναι :

1. Ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον: κατοχή φάσματος, σηματοθορυβικός λόγος (SNR), διάδοση πολλαπλών διαδρομών,
2. Περιβάλλον Hardware: επίπεδο μπαταριών, κατανάλωση ισχύος, υπολογιστικό φορτίο των πόρων,
3. Περιβάλλον δικτύων: πρότυπα τηλεπικοινωνιών (GSM, UMTS, WiFi, κτλ.), χειριστές και υπηρεσίες διαθέσιμοι στην περιοχή, φορτίο κυκλοφορίας σε μια σύνδεση,
4. Περιβάλλον σχετικό με τον χρήστη: θέση, ταχύτητα, προτιμήσεις χρηστών, προφίλ του χρήστη, αισθητήρες εικόνας και ήχου (ανίχνευση παρουσίας, αναγνώριση φωνής).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 78, όλα τα ερεθίσματα που παραλαμβάνονται από τους αισθητήρες από τα διαφορετικά στρώματα (από το φυσικό στρώμα στο στρώμα εφαρμογής) πρέπει να συγχωνευθούν και να αναλυθούν από κοινού προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόφαση.



Εικόνα 78 : Σχήμα ενός συστήματος cognitive radio

### 3.9.2 Προτεινόμενες λύσεις

Στη συνέχεια δίνονται 4 παραδείγματα χρήσης cognitive radio που συμβάλλουν στη μείωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

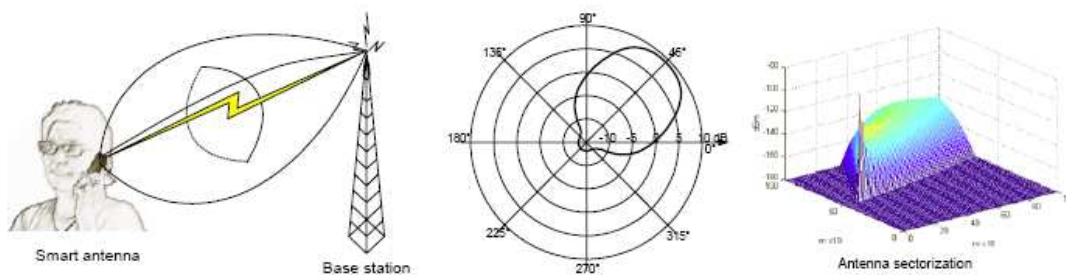
#### 1) Διαχείριση δικτύων

Η εκπομπή ενός σήματος παρουσίας (presence signal) (GSM) όταν αλλάζει η κινητή θέση με μια δεδομένη ταχύτητα, μπορεί να αρκεί. Οι αισθητήρες εντοπισμού και ταχύτητας παρέχουν τις πληροφορίες για την πιθανή αλλαγή κυψέλης. Αυτό είναι μια πλήρης επαναξιολόγηση των τρεχόντων πρωτοκόλλων, τα οποία λειτουργούν με ένα μόνιμο σήμα παρουσίας. Αυτή η πρόταση εξετάζει την εκπομπή ενός σήματος μετακίνησης και ασκεί ιδιαίτερη επίδραση σε ολόκληρο το δίκτυο, στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και στην κατανάλωση ισχύος. Επίσης, η επιλογή των προτύπων και του χειριστή είναι σημαντική. Το τερματικό ή ο σταθμός βάσης θα μπορούσε να αναγνωρίσει την κατοχή φάσματος και επομένως να αποφασίσει ποια ζώνη (με την ανάλογη ισχύ) είναι η καλύτερη από την άποψη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτό θα μπορούσε να εκτελεσθεί χάριν στον τυποποιημένο αισθητήρα αναγνώρισης.

## 2) Μορφοποίηση σήματος με χρήση έξυπνων κεραιών

Αυτό το παράδειγμα αποτελείται από τη διαμόρφωση του διαγράμματος εκπομπής κεραιών κατά τέτοιο τρόπο ώστε στέλνει το χαμηλότερο ποσό ακτινοβολίας προς το χρήστη. Με τη βοήθεια κατάλληλων αισθητήρων, το τερματικό θα ενημερωθεί για την ακριβή θέση του σε σχέση με το κεφάλι του χρήστη. Έτσι, με τη χρήση των έξυπνων τεχνικών κεραιών, θα είναι σε θέση έπειτα να διαμορφώσει το διάγραμμα ακτινοβολίας προκειμένου να μειωθεί (ή ακόμα και να ακυρώσει) την εκπεμπόμενη ακτινοβολία προς το χρήστη. Μια επίδραση που μας αφορά άμεσα, είναι μια μεγάλη μείωση (της τάξης των 30 dB) της κατευθυντικότητας του κύριου λοβού. Το γεγονός αυτό είναι καλό για τα κινητά τηλέφωνα, δεδομένου ότι μειώνονται τα H/M κύματα στο κεφάλι ενός προσώπου και το σώμα (συγκρίνετε τις εικόνες 77 και 79). Φυσικά οι παραπάνω ενέργειες μπορούν να γίνουν και στον σταθμό βάσης για τον εντοπισμό του κινητού τερματικού.

Η εικόνα 79 παρουσιάζει τη διανομή ισχύος που παράγεται από την κεραία του σταθμού βάσης προς ένα κινητό τηλέφωνο. Αυτός ο τύπος επεξεργασίας είναι ήδη σε χρήση προκειμένου να αυξηθεί ο αριθμός χρήστη σε μια κυψέλη. Η ερώτηση είναι εδώ: μπορεί ένας χειριστής να δεχτεί να χρησιμοποιήσει αυτό το κέρδος για τον ίδιο αριθμό χρηστών αντί της αύξησης του αριθμού χρηστών;



Εικόνα 79 : Αλλαγή κατευθυντικότητας μέσω έξυπνης κεραιάς

### **3) Βελτιστοποίηση αποδοτικότητας φάσματος σε αντίθεση με τη μετάδοση ισχύος**

Το τερματικό (ή ο σταθμός βάσης) θα είναι σε θέση να καθορίσει την ποιότητα καναλιών μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο και, σύμφωνα με αυτήν την ποιότητα, η εκπεμπόμενη ισχύς θα προσαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο κατά τρόπο αποτελεσματικότερο από αυτόν που χρησιμοποιείται αυτήν την περίοδο. Σήμερα, διάφοροι κανόνες στη διαδικασία τυποποίησης, περιλαμβάνουν ήδη αυτόν τον τύπο επεξεργασίας. Αυτό σημαίνει ότι το cognitive radio λαμβάνεται υπόψη αν και δεν δηλώνεται σαφώς. Αφού ο δέκτης έχει ελέγξει την ποιότητα της μετάδοσης - δηλαδή να δει εάν υπάρχει καλός σηματοθορυβικός λόγος SNR και μικρή αναλογία σφάλματος bit (Bit error ratio-BER), μπορεί έπειτα να αποφασίσει και να χρησιμοποιήσει έναν κώδικα καναλιών προκειμένου να μειωθεί το SNR ταυτόχρονα κρατώντας το BER σε ικανοποιητικά επίπεδα για το QoS. Ομοίως, θα μπορούσε επίσης να αποφασίσει να αλλάξει άλλες παραμέτρους του φυσικού στρώματος. Παραδείγματος χάριν, θα μπορούσε να μειώσει τη συχνότητα συμβόλων εάν η διάρκεια υποδοχής είναι συμβατή με το QoS. Η ερώτηση που προκύπτει είναι εάν ένας χειριστής μπορεί να δεχτεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις παραμέτρους για να μειώσει το SNR για το ίδιο ποσοστό δυαδικών ψηφίων αντί της αύξησης του ποσοστού δυαδικών ψηφίων για το ίδιο SNR.

### **4) Αλληλεπίδραση CR και χρηστών**

Ένα σήμα παράγεται για να προειδοποιήσει το χρήστη ότι είναι σε ένα όχημα και ότι είναι προς το συμφέρον του να τοποθετήσει το κινητό τηλέφωνο ξανά στον holder ή να το κλείσει. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να προειδοποιηθεί ότι είναι σε κακή θέση σε σχέση με τον πιο κοντινό σταθμό βάσης και ότι πρέπει έτσι να μειωθεί η εκπεμπόμενη ισχύς. Είναι επομένως δυνατό να υπάρξουν πολυάριθμες διαμορφώσεις, οι οποίες παρέχουν στο χρήστη τις πληροφορίες για το ποσοστό της έκθεσής του σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το θέμα που τίθεται είναι αν ένας χειριστής μπορεί να έχει κέρδος επισημαίνοντας το γεγονός ότι τα κινητά τηλέφωνα του εκπέμπουν λιγότερη ακτινοβολία από εκείνη των ανταγωνιστών του κι αν οι χρήστες προτίθενται να διαθέσουν περισσότερα χρήματα για ένα λιγότερο ρυπογόνο κινητό τηλέφωνο;

Ανακεφαλαιώνοντας, πρέπει να τονίσουμε ότι το cognitive radio είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μειωθεί η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτή η τεχνική δυνατότητα δεν κρύβει τις πολιτικές και οικονομικές πτυχές αυτού του προβλήματος. Στην πραγματικότητα, υποβάλλουμε διάφορες ερωτήσεις όπως: υπάρχει μια αγορά για τα CR τερματικά που λαμβάνουν υπόψη αυτήν την "οικολογική" πτυχή της ηλεκτρομαγνητικής μετάδοσης; Υπάρχει ένα οικονομικό επιχείρημα για τους χειριστές που επιθυμούν να βρουν τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ της υγείας, της αποδοτικότητας φάσματος, της κατανάλωσης ισχύος και του κόστους; Οι ερωτήσεις που εγείρονται είναι πολλές και οι αποφάσεις πρέπει να παρθούν υπεύθυνα από τους χειριστές και τους παρόχους δικτύων αλλά και από τους ίδιους τους τελικούς χρήστες.

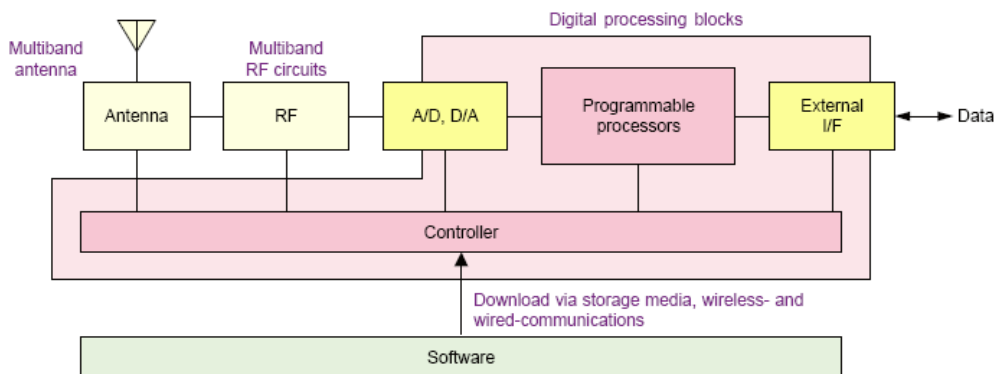


# Κεφάλαιο 4

## 4 Μελλοντικό πλάνο για SDR και CR

### 4.1 Το μέλλον του Software Defined Radio

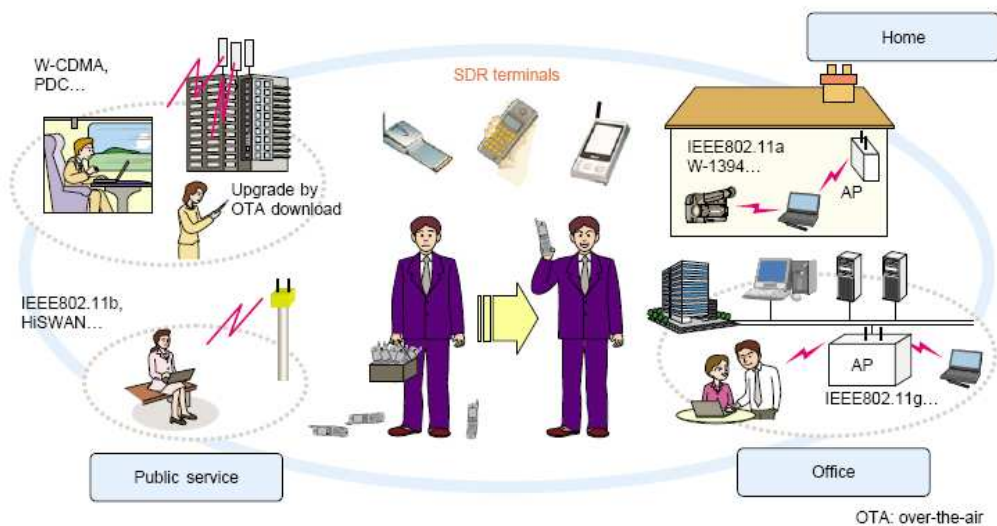
Η πρόσφατη τεχνική πρόοδος, οι μειώσεις του κόστους των συσκευών επεξεργασίας ψηφιακού σήματος και οι επείγουσες απαιτήσεις για κινητή επικοινωνία οδηγούν την έρευνα και την ανάπτυξη καθορισμένου SDR, το οποίο επιτρέπει σε ένα τερματικό να χειριστεί τα διάφορα είδη ασύρματων συστημάτων μέσω μιας απλής αλλαγής στο λογισμικό η οποία διαμορφώνει τις λειτουργίες του τερματικού. Οι τομείς εφαρμογής του SDR περιλαμβάνουν τη στρατιωτική χρήση, τα εγχώρια δίκτυα, τα ευφυή συστήματα μεταφορών καθώς επίσης και τις κυψελοειδείς επικοινωνίες. Το τερματικό SDR κατασκευάζεται με προγραμματίσιμες συσκευές, όπως οι επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων (DSPs) και οι προγραμματίσιμες σειρές πυλών πινάκων (FPGAs), και χρησιμοποιεί τα πολλαπλής ζώνης κυκλώματα ραδιοσυχνότητας (RF) (όπως φαίνεται στην εικόνα 80). Η Ιαπωνία χρησιμοποιεί αυτήν την περίοδο τα δεύτερης γενιάς (2G) κινητά συστήματα όπως PDC (Personal Digital Cellular) και PHS (Personal Handyphone System), και ένα κινητό σύστημα τρίτης γενιάς (3G), W-CDMA. Επιπλέον, τα κινητά συστήματα επόμενης γενιάς που αναπτύσσονται θα μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερες ταχύτητες υπερβαίνοντας τα 100 Mbits/s. Αυτή η σύνθετη κατάσταση φαίνεται στο εξωτερικό όπου πολλά είδη κινητών συστημάτων (GSM, AMPS, κτλ..) είναι σε χρήση. Εκτός από τις δημόσιες κινητές υπηρεσίες, πολλά ιδιωτικά συστήματα όπως τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής IEEE802.11x (WLANs) και Bluetooth έχουν γίνει δημοφιλή. Οι χρήστες πρέπει να αγοράσουν ένα τερματικό για κάθε σύστημα επειδή αυτά τα συστήματα έχουν τις προδιαγραφές τους σε επίπεδο συχνότητας, διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης και πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Επιπλέον, η κάλυψη αυτών των συστημάτων είναι περιορισμένη σε συγκεκριμένες περιοχές. Το SDR διαφαίνεται ως καλύτερος τρόπος να επιτευχθεί η ευρεία κινητή επικοινωνία.



Εικόνα 80 : Τυπική αρχιτεκτονική SDR

### 4.1.1 Τα χαρακτηριστικά του SDR

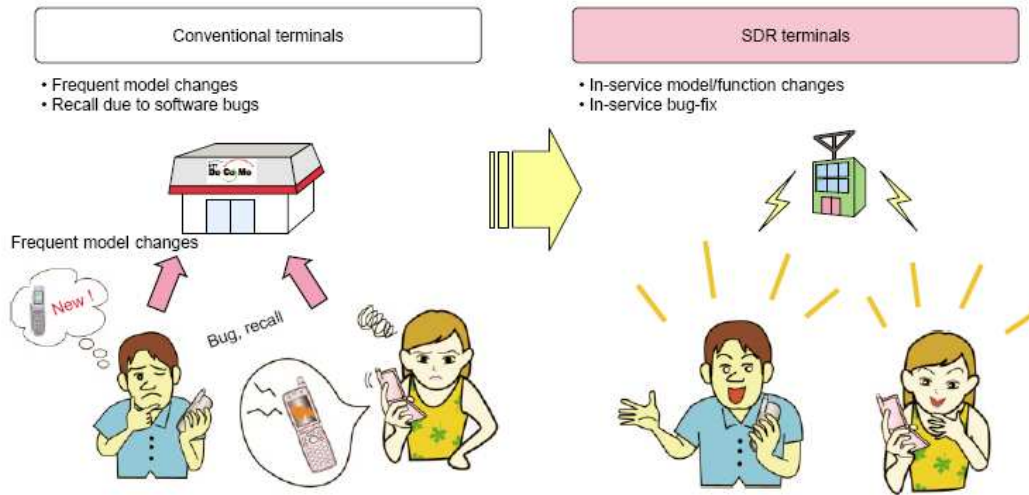
Η εικόνα 81 σχηματικά επεξηγεί μερικές από τις μελλοντικές δυνατότητες που θα μπορούσαν να επιτραπούν από την τεχνολογία SDR. Η πανταχού παρούσα επικοινωνία θα μπορούσε να είναι δυνατή με την επιλογή του ασύρματου συστήματος που αντιστοιχεί στη θέση και τις απαιτήσεις του χρήστη. Οι υπερπόντιοι ταξιδιώτες μεταφορώνουν απλά το λογισμικό του συστήματος που χρησιμοποιείται στη χώρα που επισκέπτονται. Επιπλέον, η επιθυμητή ποιότητα της υπηρεσίας μπορεί να διατηρηθεί βελτιώνοντας την παροχή υπηρεσιών σύμφωνα με το ρυθμό μεταφόρτωσης δεδομένων και την αμοιβή.



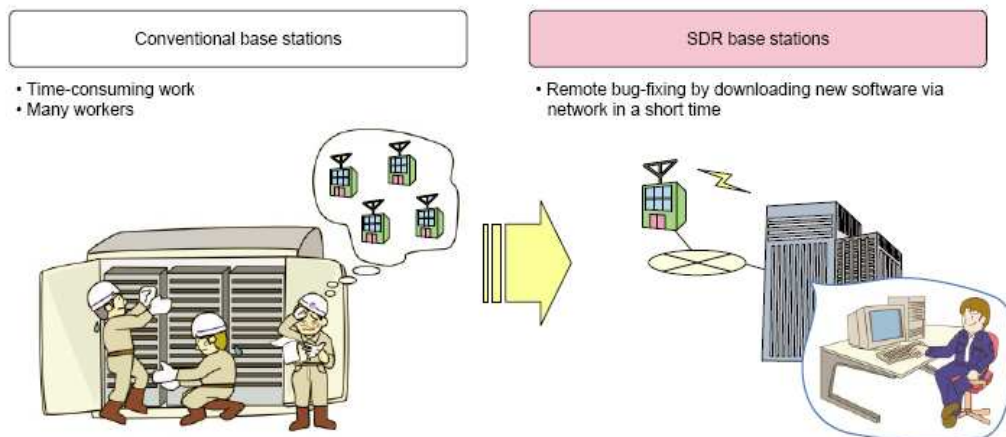
Εικόνα 81 : Δυνατότητες της τεχνολογίας SDR

Η μεταφόρτωση over-the-air αφήνει τον χρήστη να αναβαθμίσει το τερματικό του καθώς οι νέες λειτουργίες διατίθενται ή οι επιδιορθώσεις λόγω ιών απελευθερώνονται ακόμα και όταν είστε στο σπίτι (βλ. εικόνα 82). Η τεχνολογία SDR είναι επίσης πολύ εύχρηστη για τους χειριστές. Πολλοί εργαζόμενοι απαιτούνται για τη χρονοβόρα εργασία της αναβάθμισης λογισμικού σε τεράστιο αριθμό κυψελοειδών σταθμών βάσης. Οι σταθμοί βάσης SDR μπορούν να αναβαθμιστούν από μακριά γρήγορα με τη μεταφόρτωση νέου λογισμικού μέσω του δικτύου (βλ. εικόνα 83). Επίσης, οι κατασκευαστές έχουν πολλά οφέλη από την τεχνολογία SDR. Οι τελευταίοι δεν χρειάζονται πλέον να αναπτύξουν τα συγκεκριμένα τσιπ για κάθε σύστημα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Το μόνο που πρέπει να κάνουν είναι αναπτύξουν λογισμικό που θα μπορεί να μειώσει το χρόνο και το κόστος ανάπτυξης. Αυτό το σχέδιο επιτρέπει στις νέες τεχνολογίες να εισαχθούν στο εμπόριο γρηγορότερα από τις συμβατικές, έτσι

ώστε να είναι δυνατό να ανακουφιστεί η πρόσφατη έλλειψη των πόρων συχνότητας με τη χρήση τεχνολογιών και συστημάτων που έχουν μεγαλύτερη απόδοση φάσματος.



Εικόνα 82 : Εύκολη αναβάθμιση λογισμικού με over-the-air downloading



Εικόνα 83 : Απομακρυσμένη επισκευή σταθμών βάσης με μεταφόρτωση λογισμικού

#### 4.1.2 Τάσεις γύρω από το SDR

Η έρευνα και η ανάπτυξη του SDR άρχισε στη δεκαετία του '80 για να αναπτυχθεί ένα σύστημα επικοινωνιών για το στρατό των ΗΠΑ. Έχει συνεχιστεί ως πρόγραμμα JTRS (Joint Tactical Radio System). Στη δεκαετία του '90, οδηγήθηκε από τη γρήγορη πρόοδο στις τεχνολογίες και τις μειώσεις των συσκευών επεξεργασίας ψηφιακού σήματος, όπως DSPs και FPGAs. Το 1996, το φόρουμ SDR καθιερώθηκε και έχει αυτήν την περίοδο περισσότερα από 100 μέλη παγκοσμίως. Τον Ιούνιο του 2000, η

Motorola ανήγγειλε ότι είχαν αρχίσει να αναπτύσσουν ένα κυψελοειδές τερματικό SDR. Τον Σεπτέμβριο του 2001, η επιτροπή US Federal Communications Commission (FCC) υιοθέτησε τις αλλαγές για να προσαρμόσει την επέκταση των SDRs. Οι νέοι κανόνες επιτρέπουν στους κατασκευαστές και τους χειριστές να διαμορφώσουν συσκευές αφότου έχουν επεκταθεί στον τομέα.

Στην Ευρώπη, υπάρχουν πολλά προγράμματα σχετικά με το SDR, όπως το MMR (multi-mode multi-protocol radio), το SORT (software radio technology), το PROMURA (programmable multimode radio for multimedia wireless terminals), το SLATS (software libraries for advanced terminal solutions), και το TRUST (transparently reconfigurable ubiquitous terminal), κάτω από τα ACTS (Advanced Communications Technologies and Services), ESPRIT (European Strategic Program for R&D in Information Technology), και IST (Information Society Technologies). Τα προγράμματα αυτά έχουν δημιουργήσει νέες ιδέες γύρω από το SDR (μερικά προγράμματα έχουν τελειώσει ήδη). Στην Ιαπωνία, μια ομάδα μελέτης για δέκτες SDR οργανώθηκε στην ένωση των ραδιοβιομηχανιών και των επιχειρήσεων Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) με την υποστήριξη του Υπουργείου τηλεπικοινωνιών Ministry of Post and Telecommunications (MPT) της Ιαπωνίας το 1996 και η τελική έκθεση ολοκληρώθηκε το 1999 μετά από τρία έτη μελέτης. Τον Δεκέμβριο του 1998, μια ομάδα μελέτης software radio οργανώθηκε στην IEICE (Communication Society of the Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers). Η ομάδα ήταν ενεργή στη συζήτηση των ζητημάτων SDR συμπεριλαμβανομένων των συσκευών, αλγόριθμων, διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών, λειτουργικών συστημάτων, λογισμικού που μεταφορτώνεται, κανονισμών και πολλών άλλων τομέων γύρω από το SDR. Τον Απρίλιο του 2000, το κέντρο εφαρμοσμένης μηχανικής τηλεπικοινωνιών (Telecom Engineering Center-TELEC) με την υποστήριξη από το Υπουργείο δημόσιας διαχείρισης, εσωτερικών υποθέσεων, ταχυδρομείου και τηλεπικοινωνιών (Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications-MPHPT, γνωστό στο παρελθόν ως MPT) της Ιαπωνίας άρχισε σοβαρές συζητήσεις τριών ετών ως προς την αποδοχή της έννοιας SDR στο ιαπωνικό νομικό και ρυθμιστικό περιβάλλον, και η τελική έκθεση έγινε τον Μάρτιο του 2003. Σημαντικότερα τεχνικά ζητήματα για τα κινητά τερματικά SDR περιλαμβάνουν την ανάπτυξη των προγραμματίσιμων συσκευών μεγάλης ταχύτητας και χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και μικρά κυκλώματα RF πολλαπλής ζώνης.

Ανακεφαλαιώνοντας, η τεχνολογία SDR θα επιτρέψει σε ένα κινητό τερματικό να καλύψει τα κινητά συστήματα 2G και 3G, καθώς επίσης και τα ασύρματα συστήματα ευρείας ζώνης όπως ασύρματα LANs. Εντούτοις, σε θέματα κατασκευής, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν τα γενικά έξοδα υλικού και λογισμικού και να μειωθεί η κατανάλωση ισχύος του τερματικού και των προγραμματίσιμων επεξεργαστών. Τα κυκλώματα RF πολλαπλής ζώνης πρέπει να έχουν μια ευρύτερη κάλυψη, δηλαδή τις ζώνες ραδιοφωνικής αναμετάδοσης και ζώνες 5-GHz. Έτσι, στο μέλλον πρέπει να κατασκευασθεί ένα κινητό τερματικό SDR τα χαρακτηριστικά του οποίου, όπως το μέγεθος, το κόστος, και η κατανάλωση ισχύος να είναι ανταγωνιστικά σε σύγκριση με εκείνα των τρεχόντων κινητών τερματικών.

## 4.2 Το μέλλον γύρω από το Cognitive Radio

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα των μελλοντικών δικτυακών αρχιτεκτονικών θα είναι ο κινητός χρήστης. Οι χρήστες όλο και περισσότερο θα έχουν πρόσβαση στις πηγές πληροφοριών είτε είναι σε κίνηση, είτε όταν είναι σε ένα όχημα, είτε συμμετέχουν σε μια επιχειρησιακή συνεδρίαση, είτε βρίσκονται σε μακρινές τοποθεσίες. Η ασύρματη τεχνολογία είναι απαραίτητη για να υποστηρίξει τον κινητό χρήστη και η προσαρμοστική και αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος είναι μια σημαντική πτυχή της ανάπτυξης των μελλοντικών δικτυακών αρχιτεκτονικών. Τα cognitive radios (CRs) ενσωματώνουν τη ραδιοτεχνολογία και την τεχνολογία δικτύωσης για να παρέχουν την αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος, των φυσικών πόρων και των προηγμένων υπηρεσιών χρηστών.

Το ασύρματο δίκτυο του cognitive radio προορίζεται ως περιβάλλον προηγμένης τεχνολογίας με στόχο την υλοποίηση των προσαρμοστικών, φάσμα-αποδοτικών συστημάτων με προγραμματίσιμα radios. Η έρευνα γύρω από πρωτόκολλα περιλαμβάνει την ανακάλυψη και την αυτο-οργάνωση, τα crosslayer πρωτόκολλα για τους μηχανισμούς προσαρμογής PHY, και τη βελτιστοποίηση απόδοσης υλικού/λογισμικού.

### 4.2.1 Τα χαρακτηριστικά του Cognitive Radio

Η ιδέα ενός cognitive radio επεκτείνει τις έννοιες ενός hardware radio και ενός software defined radio (SDR) από μια απλή, ενιαία συσκευή σε ένα radio που αισθάνεται και αντιδρά στο λειτουργικό περιβάλλον του. Ένα Cognitive Radio ενσωματώνει τις πολλαπλές πηγές πληροφοριών, καθορίζει τις τρέχουσες λειτουργούσες τοποθετήσεις του, και συνεργάζεται με άλλα cognitive radios σε ένα ασύρματο δίκτυο. Η υπόσχεση των cognitive radios είναι η βελτιωμένη χρήση των πόρων φάσματος, ο μειωμένος χρόνος σχεδίασης και η προσαρμογή στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Μερικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των cognitive radios περιλαμβάνουν:

- Αντίληψη του τρέχοντος περιβάλλοντος φάσματος ραδιοσυχνότητας: Αυτή περιλαμβάνει τη μέτρηση ποιων συχνοτήτων χρησιμοποιούνται, πότε χρησιμοποιήθηκαν, υπολογισμό της θέσης των πομπών και των δεκτών σημάτων και επιλογή τρόπου διαμόρφωσης σήματος.
- Βάσεις δεδομένων πολιτικής και διαμόρφωσης: Οι πολιτικές διευκρινίζουν πώς το radio μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ποιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ποιες τοποθεσίες. Οι βάσεις δεδομένων διαμόρφωσης περιγράφουν τα λειτουργούντα χαρακτηριστικά του φυσικού radio και χρησιμοποιούνται κανονικά για να περιορίσουν τη λειτουργία του radio για να το περιορίσουν στα ρυθμιστικά ή φυσικά όρια.
- Αυτο-διαμόρφωση: Παραδείγματος χάριν, ένας επεξεργαστής ψηφιακών σημάτων και ένας επεξεργαστής ελέγχου πρέπει αυτόματα να διαμορφωθούν για να λειτουργήσουν κάτω από τα διαθέσιμα modules. Η συγκεκριμένη λειτουργία καλείται και " plug-and-play."

- **Mission-oriented διαμόρφωση:** Τα Software defined radios μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ σύνολο λειτουργικών απαιτήσεων. Η διαμόρφωση ενός SDR για να καλύψει ένα δεδομένο σύνολο απαιτήσεων αποστολής καλείται mission-oriented διαμόρφωση. Οι απαιτήσεις αποστολής περιλαμβάνουν τη λειτουργία μέσα σε κτίρια, τη λειτουργία πέρα από μεγάλες αποστάσεις και τη λειτουργία καθώς ο χρήστης κινείται σε υψηλή ταχύτητα. Η mission-oriented διαμόρφωση περιλαμβάνει την επιλογή ενός συνόλου interface λογισμικού από βιβλιοθήκη modules και τη σύνδεση τους με ένα λειτουργικό radio.
- **Προσαρμοστικοί αλγόριθμοι:** Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, το cognitive radio αισθάνεται το περιβάλλον του και διαπραγματεύεται για να χρησιμοποιήσει καλύτερα το ραδιοφάσμα και να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις χρηστών.
- **Διανεμημένη συνεργασία:** Τα cognitive radios ανταλλάζουν τις τρέχουσες πληροφορίες για το τοπικό περιβάλλον και τις απαιτήσεις των χρηστών.

## 4.2.2 Ερωτήσεις για την έρευνα γύρω από το Cognitive Radio

Σε ένα αληθινά integrated δίκτυο, μόλις ένας κόμβος γίνει κινητός, ολόκληρο το δίκτυο πρέπει να εξετάσει την κινητικότητα. Η δρομολόγηση είναι μια από τις πρώτες λειτουργίες που πρέπει να εξετάσουν την κινητικότητα. Η διαχείριση των πόρων κάτω από τους περιορισμούς των κινητών χρηστών είναι επίσης ένα άλλο ανοικτό ζήτημα. Μερικές ερωτήσεις γύρω των ερευνητικών ερωτήσεων περιλαμβάνει:

1. Τι επιπτώσεις έχει ένα κινητό ασύρματο δίκτυο στην αρχιτεκτονική, το σχέδιο, και την εφαρμογή ενός παγκόσμιου Διαδικτύου (global internet); Πώς οι τοπικοί αλγόριθμοι κατανομής των πόρων, π.χ. η κατανομή των πόρων φάσματος RF, θα αλληλεπιδράσουν με τη σταθερή κατανομή των πόρων υποδομής;
2. Πώς ένα δίκτυο αισθάνεται αξιόπιστα το ραδιοπεριβάλλον φάσματος; Πώς ανιχνεύει τα αδύνατα σήματα με περιορισμένη ικανότητα επεξεργασίας; Πώς χρησιμοποιεί τις μετρήσεις για να θέσει τις παραμέτρους λειτουργίας του radio;
3. Πώς εκφράζονται οι ρυθμιστικές και λειτουργικές πολιτικές; Πώς οι πολιτικές ενημερώνονται ασφαλώς; Ποια μέθοδος χρησιμοποιείται για να ερμηνεύσει τις πολιτικές; Πώς οι πολιτικές επηρεάζονται από τα διαφορετικά πρότυπα αγοράς;
4. Ποια γλώσσα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τις ικανότητες των modules; Ποια ραδιοδιεπαφή πρέπει να παρουσιαστεί στην εφαρμογή;
5. Πώς ποσολογεί τις απαιτήσεις αποστολής; Πώς περιγράφονται οι ικανότητες των ραδιοενοτήτων λογισμικού;
6. Πώς συνεργάζονται τα radios; Ποιες πληροφορίες ανταλλάσσονται και ποια πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται;

7. Πώς κάθε μια από αυτές τις προσαρμοστικές τεχνικές καθίσταται ασφαλής ενάντια στους εισβολείς;

Οι ερευνητές πρέπει να αναπτύξουν και να αναλύσουν τις απαραίτητες μετρήσεις και τους προσαρμοστικούς αλγορίθμους. Οι πιο ελπιδοφόροι αλγόριθμοι πρέπει να εξεταστούν και να αξιολογηθούν στις πολυάριθμες δοκιμές και πειράματα και να ενσωματωθούν στη μεγαλύτερη σταθερή υποδομή. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των CR δικτύων μέσω της σταθερής υποδομής αλλά και με τη σταθερή υποδομή πρέπει να ερευνηθούν.

Τα cognitive radios θα λειτουργήσουν σε ένα δυναμικό ραδιοπεριβάλλον. Θα αισθάνονται το περιβάλλον, την απαίτηση χρηστών, και τη ραδιοαπόδοση και θα αντιδρούν σωστά σε όλες τις μετρήσεις, χρησιμοποιώντας αποδοτικότερα το φάσμα και πετυχαίνοντας έτσι την καλύτερη δυνατή λειτουργία.

### **4.2.3 Αντίκτυπο της έρευνας γύρω από το Cognitive Radio στο GENI (Global Environment for Network Innovations)**

Πολλές από τις ουσιαστικές ερωτήσεις για την οικοδόμηση γνωστικών δικτύων είναι, υπό κάποια έννοια, τα προβλήματα των συνδεδεμένων με καλώδιο δικτύων. Παραδείγματος χάριν, και τα συνδεδεμένα με καλώδιο και ασύρματα δίκτυα πρέπει να αντιμετωπίσουν συνδέσεις που ανεβαίνουν και στη συνέχεια πέφτουν. Εντούτοις, στο ασύρματο δίκτυο, η συχνότητα των αλλαγών της κατάστασης των συνδέσεων είναι πολύ υψηλότερη απ' ό,τι στα σημερινά όχι ασύρματα δίκτυα. Έτσι, οι ασύρματες δικτυακές αρχιτεκτονικές πρέπει να δώσουν πιο μεγάλη προσοχή στις αλλαγές κατάστασης συνδέσεων και να αντιδράσουν γρηγορότερα σε αυτές.

Μερικά χαρακτηριστικά των CR δικτύων είναι:

- Αντίληψη περιβάλλοντος - τα cognitive radios μετρούν και αντιδρούν στο περιβάλλον που λειτουργούν. Αυτό το περιβάλλον είναι πολυδιάστατο και τα CRs προσαρμόζονται στις τοπικές αλλαγές τους και στα φορτία κυκλοφορίας. Τα CRs πρέπει γρήγορα να προσαρμοστούν σε αυτό το μεταβαλλόμενο περιβάλλον και να διαβιβάσουν τις μεταβαλλόμενες τοποθετήσεις λειτουργίας τους σε άλλες ασύρματες συσκευές στο δίκτυο. Οι μηχανισμοί και οι τεχνικές για την αντίληψη, την προσαρμογή και την επικοινωνία είναι απαραίτητοι στα CR δίκτυα και στα δίκτυα γενικά.
- Γερές υπηρεσίες επικοινωνιών με αναξιόπιστες συνδέσεις - οι ραδιοσυνδέσεις, από την ίδια την φύση τους, έχουν διαλείπουσες διακοπές λειτουργίας. Μια διακοπή λειτουργίας συνδέσεων μπορεί να προκύψει από την προσωρινή θέση του δέκτη, του πομπού και άλλων αντικειμένων στο περιβάλλον. Τα CRs, από την σχεδίαση τους, πρέπει να εξετάσουν αυτές τις πολύ βραχυπρόθεσμες διακοπές λειτουργίας συνδέσεων, μέσω ποικίλων τεχνικών. Τα ασύρματα δίκτυα εφαρμόζουν μια γερή και αξιόπιστη υπηρεσία επικοινωνιών με αυτές τις αναξιόπιστες συνδέσεις μέσω αυτού του μεγάλου συνόλου τεχνικών και μηχανισμών. Οι τεχνικές αυτές που χρησιμοποιούνται στις ασύρματες αρχιτεκτονικές ισχύουν στη μεγαλύτερη δικτυακή αρχιτεκτονική.

- Γλώσσες κατάστασης λειτουργίας - Τα CRs, καθώς προσαρμόζονται, πρέπει να διαβιβάζουν τις παρατηρήσεις τους και την κατάσταση λειτουργίας τους σε άλλα CRs στο δίκτυο. Λίγες "γλώσσες" θα απαιτηθούν για να περιγράψουν τις παρατηρήσεις και την κατάσταση λειτουργίας. Αυτές οι πληροφορίες είναι πιθανό να είναι πιο πολλές από τις κοινές πληροφορίες θέσης συνδέσεων. Παραδείγματος χάριν, ένα radio στέλνει έναν κατάλογο όλων των πομπών που έχει αισθανθεί πρόσφατα σε άλλα CRs στο δίκτυο. Η καταχώρηση για κάθε πομπό μπορεί να περιλαμβάνει το φάσμα συχνότητας, την τοποθεσία, και το είδος σημάτων (π.χ. περιορισμένης ζώνης FM. Η γλώσσα και τα απαραίτητα πρωτόκολλα για τα δίκτυα CR πρέπει να επηρεάσουν τις γενικές δικτυακές αρχιτεκτονικές.

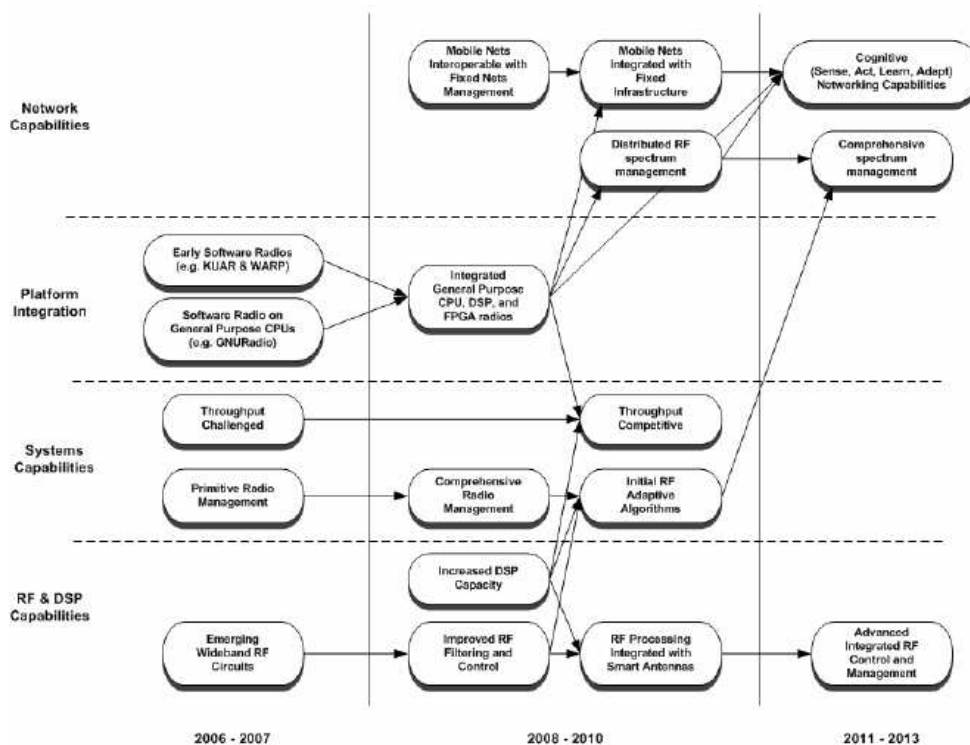
- Διανεμημένη διαχείριση των πόρων - το ραδιοφάσμα είναι ένας διανεμημένος πόρος. Η χρήση του φάσματος σε μια θέση έχει επιπτώσεις στη διαθεσιμότητα εκείνου του φάσματος σε άλλες θέσεις δικτύων. Η κατανομή του ραδιοπόρου φάσματος πρέπει να πραγματοποιηθεί κατά τρόπο συνεταιριστικό και να ισορροπηθεί μεταξύ (των γρήγορων) τοπικών αποφάσεων και (της βέλτιστης) γενικής κατανομής. Οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται για να διαθέσουν το διανεμημένο ραδιοφάσμα και τους κινητούς πόρους δικτύων βασισμένοι στα φορτία κυκλοφορίας και το λειτουργικό περιβάλλον ισχύουν στην υποδομή GENI - και θα απαιτήσουν νέες υπηρεσίες μέσα στο δίκτυο GENI.

Αυτά τα παραδείγματα επιδεικνύουν πώς οι τεχνικές και οι μηχανισμοί στα δίκτυα CR θα έχουν μια επιρροή στην αρχιτεκτονική, το σχέδιο, και τις εφαρμογές των δικτύων γενικά.

#### **4.2.4 Roadmap τεχνολογίας Cognitive Radio**

Τα σημερινά πρώιμα CRs χτίζονται από τους επεξεργαστές γενικού σκοπού και τους κοινούς επεξεργαστές σημάτων και τις προγραμματίσιμες σειρές πυλών τομέων (field programmable gate arrays). Στο μέλλον προσδοκούμε πλούσιες εξελίξεις στο ραδιοέλεγχο και τη διαχείριση, την αυξανόμενη ικανότητα επεξεργασίας σε όλα τα επίπεδα, και τη βελτιωμένη διανεμημένη διαχείριση των πόρων. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι προσδοκώμενες εξελίξεις στο cognitive radio.





Εικόνα 84 : Προσδοκώμενη ανάπτυξη γύρω από το cognitive radio

Διάφορες πλατφόρμες cognitive radio είναι αυτήν την περίοδο υπό ανάπτυξη και αναμένονταν να ωριμάσουν και να εξεταστούν πλήρως για τη χρήση σε μεγαλύτερη κλίμακα μέχρι τις αρχές του 2007. Μια γενικής χρήσης cognitive radio πλατφόρμα περιλαμβάνει το αναδιαμορφώσιμο υλικό ή/και DSP για τη ραδιοεπεξεργασία σήματος, μαζί με μια ή περισσότερες ενσωματωμένες κεντρικές μονάδες επεξεργασίας για τα πρωτόκολλα σε επίπεδο πακέτου. Το λογισμικό πλατφορμών για αυτές τις αναδυόμενες εφαρμογές υλικού σχεδιάζεται για να λάβει υπόψη αυτές τις απαιτήσεις. Η ραδιοδιαχείριση περιορίζεται και η ολοκλήρωση με την υπάρχουσα υποδομή είναι σε βασικό επίπεδο.

Κατά τη διάρκεια του χρονικού πλαισίου του 2008-2010 θα δούμε τη συνεχή αύξηση στην ικανότητα επεξεργασίας σήματος στους επεξεργαστές γενικού σκοπού, τους επεξεργαστές σημάτων, και τις προγραμματίσιμες σειρές πυλών τομέων. Η βελτιωμένη ραδιοδιαχείριση, η προσαρμογή, η διανεμημένη κατανομή των πόρων και η διαλειτουργικότητα με τη σταθερή υποδομή θα προκύψουν. Το 2011-2013 αναμένουμε να δούμε την περιεκτική ολοκλήρωση των κινητών δικτύων που εξελίσσονται σε πιο προσαρμοστικά γνωστικά δίκτυα. Δυναμικά και υψηλής ικανότητας κινητά δίκτυα θα είναι οι αρχικοί τρόποι με τους οποίους η πλειοψηφία των χρηστών έχει πρόσβαση στο δίκτυο.

## Βιβλιογραφία

- [1] Joseph Mitola III, Software Radio Architecture, Object-Oriented Approaches to Wireless Systems Engineering, 2000
- [2] Perspective on Software Defined Radio - Download and Reconfigurability for Radio Software, ITU Seminar on IMT- 2000 and Systems Beyond Ottawa, 2002 Stephen M. Blust Chair SDR Forum
- [3] The Digital Front-End of Software Radio Terminal, Tim Hentschel, Matthias Henker, and Gerhard Fettweis, Dresden University of Technology, IEEE Personal Communications, August 1999, 1070-9916/99/\$10.00 © 1999 IEEE
- [4] Protocol and Architectural Issues for Software Radio, E. Berruto and G. Colombo, CSELT, Software Radio Workshop, Brussels, May 1997, AC015
- [5] Software Defined Radio (SDR) Products for Radio and Radar, Interactive Circuits & Systems (ICS) Ltd, Μάιος 2000, [www.ics-ltd.com](http://www.ics-ltd.com)
- [6] Developing a Software Radio Platform with ICS Radio PCI products, Interactive Circuits & Systems (ICS) Ltd, Μάιος 2000, [www.ics-ltd.com](http://www.ics-ltd.com)
- [7] Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio, Dissertation, Doctor of Technology Joseph Mitola III, Royal Institute of Technology (KTH), Teleinformatics Electrum 204, SE-164 40 Kista, Sweden, Μάιος 2000
- [8] Tim Hentschel, Gerhard Fettweis, AD Conversion and Channelization for Multi-Mode Terminals
- [9] Jonathan Jones, Performance of 12-bit and 14-bit ADCs for SDR, Applications Interactive Circuits & Systems (ICS) Ltd, Δεκέμβριος 2000
- [10] Design and Performance of Software Radio: ECEn 493R Final Report, April 12, 2001 Jonathan Vance, Charles Middleton, Sarah Hedengren, Brent Fawson, & Anshul Malvi
- [11] Software Radio Technology Challenges and Opportunities First European Workshop on Software Radios Keynote Address Joseph Mitola III The MITRE Corporation, McLean, VA 22102
- [12] Reconfigurable SDR Equipment and Supporting Networks-Reference Models and Architectures, Wireless World Research Forum Working Group 3, Μάιος 2002

- [13] S. Mann, M. A. Beach, P. A. Warr and J. P. McGeehan, "Increasing the talk-time of mobile radios with efficient linear transmitter architectures," IEE Electronics & Communication Engineering Journal, Vol. 13, No 2, pp., 65-76, Απρίλιος 2001
- [14] D.J. Jennings, J.P. McGeehan, 'A High Efficiency RF Transmitter using VCO-derived Synthesis: CALLUM', IEEE transactions on microwave theory and techniques, Vol. 47, No. 6, Ιούνιος 1999
- [15] D.C. Cox, 'Linear Amplification with nonlinear components', IEEE Transactions on Communications, Vol. 22, pp.1942-1945, Δεκέμβριος 1974
- [16] Integrating and Applying Internet Protocols with a Reconfigurable Software Radio - The Low Power Transceiver (LPT), David J. Zillig, Network Support Group/Code 567 NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD William D. Horne, Ronald Pawlikowski, and Carl F. Kwadrat ITT Industries, Advanced Engineering & Science Division, Reston, VA.
- [17] Modulation Scheme Recognition Techniques for Software Radio on a General Purpose Processor Platform Keith E. Nolan, Linda Doyle, Donal O'Mahony, Philip Mackenzie Networks and Telecommunications Research Group, Trinity College, Dublin 2, Rep. of Ireland
- [18] Tim Hentschel, Gerhard Fettweis, Sample Rate Conversion for Software Radio
- [19] Flexible Integrated Radio Integrated Radio Systems Technology Systems Technology (FIRST), Carl Taylor, Project Manager, ERA Technology Ltd, Software Radio Workshop 98
- [20] Cognitive radios: The future of SDR technology, Dr. Bruce Fette, Ph.D.. Οκτώβρης 2005
- [21] S. Blust, "IMT-2000: Third Generation Wireless, The Vision of a Global Wireless Network" (Tempe, Az: SDR Forum) Μάρτιος 1998
- [22] Zangi, K., "Software Radio Issues in Cellular Base Stations", IEEE JSAC (NY: IEEE Press) Απρίλιος 1999
- [23] Mikkonen, J., Quality of Service in Radio Access Networks (Tampere, Finland: Tampere University of Technology) Μάιος 1999
- [24] Προσομοίωση Συστήματος Επικοινωνίας Software Radio, Μιχαήλ Ν. Καλοχριστιανάκης, Νοέμβριος 2002
- [25] Software radio structure for second generation mobile communications systems, Wiesler and F. Jondral, Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (NY: IEEE Press) 1998

- [26] J. Mitola, *Cognitive Radio: Model-Based Competence for Software Radio* Licentiate Thesis (Stockholm: KTH) 1999
- [27] Cai Tao and Song junde, "A New Architecture of Third Generation Mobile System Based on Software Radio," ICCT'98, Beijing, Οκτώβρης 1998
- [28] On the use of Cognitive Radio for Decreasing Electromagnetic Radiation, J. Palicot– C. Roland
- [29] Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications, S. Haykin, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Φεβρουάριος 2005.
- [30] *Ultra Wideband Wireless Communications*, H. Arslan and M. E. Sahin, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc., 2006,
- [31] R. H. Walden, "Analog-to-Digital Converter Survey and Analysis," *IEEE JSAC*, vol. 17, no. 5, Απρίλιος 1999
- [32] H. Yoshida et al., "A Software Defined Radio Receiver Using the Direct Conversion Principle: Implementation and Evaluation," *IEEE Int'l. Symp. Pers., Indoor and Mobile Radio Commun.*, vol. 2, 2000
- [33] *Technical Document on Cognitive Radio Networks*, GDD-06-20, GENI: Global Environment for Network Innovations Σεπτέμβρης 2006
- [34] *Ultra Wide Bandwidth communications towards Cognitive Radio*, Marco Chiani, Andrea Giorgetti, and Gianluigi Liva, 2005
- [35] *Architecture for an open-source cognitive radio*, Erich Stuntebeck, Timothy O'Shea, Joseph Hecker, T. Charles Clancy
- [36] *Consumer Applications of Cognitive Radio Defined Networks*, Sheryl Ball, Adam Ferguson, Thomas W. Rondeau, 2005
- [37] *Ad-hoc Cognitive Radio–Development to Frequency Sharing System by using Multi-hop Network*, Takeo Fujii, Yasuo Suzuki
- [38] J. Mitra III, G. Q. Maguire JR., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Commun.*, Αύγουστος 1999
- [39] *Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms*, James O'Daniell Neel, 2006

- [40] Demonstration and Analyses of Collaboration, Coexistence, and Interoperability of Cognitive Radio Platforms, Nolan, K.E., Sutton, P.D., Doyle, L.E., Rondeau, T.W., Le, B., Bostian, C.W.,
- [41] Cognitive Radio Techniques for Wide Area Networks, William Krenik and Anuj Batra, 2005
- [42] Spectrum Policy Task Force Report, Federal Communications Commission, ET Docket No. 02-135, Νοέμβριος 2002
- [43] Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands, Federal Communications Commission, ET Docket No. 04-186, 2004
- [44] Physical Layer Design Issues Unique to Cognitive Radio Systems, Danijela Čabrić, Robert W. Brodersen