



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλυση και Επεξεργασία Δορυφορικών Δεδομένων Ραντάρ τύπου Συνθετικής Απεικόνισης (Synthetic Aperture Radar/SAR)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Γεώργιος Α. Μαυρομμάτης

Επιβλέπων : Παναγιώτης Φράγκος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα , Μάρτιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλυση και Επεξεργασία Δορυφορικών Δεδομένων Ραντάρ τύπου Συνθετικής Απεικόνισης (Synthetic Aperture Radar/SAR)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Γεώργιος Α. Μαυρομμάτης

Επιβλέπων : Παναγιώτης Φράγκος
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Μαρτίου 2023

.....

Παναγιώτης Φράγκος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Αθανάσιος Παναγόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Δρ. Γεώργιος Σταματάκος
Ερευνητής Α' ΕΠΙΣΕΥ

Αθήνα, Μάρτιος 2023

.....
Παναγιώτης Γεώργιος Α. Μαυρομάτης

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

Copyright © Παναγιώτης Γεώργιος Μαυρομάτης, 2023

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

Τα ραντάρ εδώ και δεκαετίες βρίσκονται στην πρώτη γραμμή της επιστήμης βοηθώντας την ανάπτυξή της σε πολλούς κλάδους. Ένας τρόπος χρησιμοποίησης των ραντάρ σήμερα είναι η δημιουργία εικόνας μέσω την επεξεργασίας των δεδομένων που αυτά λαμβάνουν. Ένας τύπος ραντάρ που ειδικεύεται στην εν λόγω δημιουργία είναι τα Ραντάρ τύπου Συνθετικής Απεικόνισης ή όπως διεθνώς ονομάζονται Synthetic Aperture Radar με την ονομασία που έχει επικρατήσει να είναι ραντάρ SAR, από την τα αρχικά του διεθνούς τους όρου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση και η επεξεργασία δεδομένων ραντάρ SAR, τα οποία βρίσκονται στο διάστημα και η δημιουργία της εικόνας SAR σε μορφή αποχρώσεων του γκρι. Ύστερα γίνεται κατηγοριοποίηση των εικόνων που έχουν δημιουργηθεί ώστε να καλυφθούν όλοι οι δυνατοί τύποι εδάφους που απαντώνται πάνω στην γήινη επιφάνεια. Τα δεδομένα προς επεξεργασία της διπλωματικής έχουν αντληθεί από το ραντάρ SAR που βρίσκεται πάνω στην διαστημική αποστολή Sentinel-1.

Προς διεκπεραίωση του παραπάνω στόχου, αρχικά προσεγγίζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των ραντάρ SAR καθώς και οι θεμελιώδεις σχέσεις και μεγέθη που τα διέπουν. Στην συνέχεια γίνεται ενδελεχής ανάλυση του τρόπου επεξεργασίας των δεδομένων σε ένα ραντάρ SAR καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την δημιουργία μιας ποιοτικής εικόνας. Επιπλέον, αναλύεται η αποστολή Sentinel-1, ο τρόπος ως προς τον τρόπο λειτουργήσε, τα τεχνικά της χαρακτηριστικά αλλά και τα δεδομένα τα οποία παράχθηκαν από τον δορυφόρο. Στην συνέχεια τα δεδομένα αυτά με την σειρά τους ομαδοποιούνται στις ευρωπαϊκές ισχύουσες κατηγορίες, ανάλογα με την επεξεργασία που ήδη έχουν υποστεί από τον δορυφόρο και οι οποίες ονομάζονται προϊόντα.

Λέξεις Κλειδιά

Ραντάρ SAR, Επεξεργασία Δεδομένων, Ανάλυση Δεδομένων, Εικόνα SAR, Αμφισημίες, Παραμορφώσεις, Εικόνα SLC, Αποστολή Sentinel-1.

Abstract

Radars have been at the forefront of science for decades, helping its development in many disciplines. One of the many ways of using radars, nowadays, is to create images by properly processing the data they receive. A type of radar that specializes in this procedure is the Synthetic Aperture Radar, widely known as SAR radar.

Under this context, this thesis aims at the analysis and processing of data collected by SAR radars, which are located in space, and the creation of the corresponding SAR images in a grayscale format. Then, the previously created images are further classified into all possible terrain types found on the earth's surface. We acquire the data employed in this thesis from the SAR radar on board the Sentinel-1 space mission of the European Space Agency.

To this end, we first elaborate on the theoretical foundations of SAR radars, with a special focus on the underlying technical parameters of such a radar and the relationships between them. Next, we provide a thorough review of how data are processed in a SAR radar as well as the factors that directly affect the quality of the derived image. We further analyze the Sentinel-1 mission, including its overall function, its technical characteristics, as well as the specific data captured by the satellite. Then, these data are in turn grouped into categories, known as products, based on European standards that describe the processing they have undergone by the satellite.

Key Words

SAR Radar, Data Processing, Data Analysis, SAR Image, Ambiguities, Distortions, SLC Image, Senteinel-1 Mission.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού μου κύκλου σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), το έτος 2023. Αποτελεί το τελευταίο βήμα για την απόκτηση του διπλώματός μου και αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους αυτούς που συνέβαλαν στην πορεία μου μέχρι εδώ.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου, κ. Παναγιώτη Φράγκο, Καθηγητή ΕΜΠ, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και να διευρύνω τους ορίζοντές μου πάνω στο αντικείμενο. Η στήριξη, η εμπιστοσύνη και το αμείωτο ενδιαφέρον που μου έδειξε όλον αυτόν τον καιρό ήταν εξόχως σημαντικά στην εκπόνηση της εργασίας μου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Μασσίνα, Υποψήφιο Διδάκτορα (ΥΔ) της Σχολής ΣΗΜΜΥ / ΕΜΠ, που με καθοδήγησε ορθά κατά την διάρκεια της ενασχόλησής μου με την εργασία, ώστε να προσεγγίσω το αντικείμενο πολύπλευρα. Η συμβολή του ήταν πραγματικά πολύτιμη καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Ένα μεγάλο «ευχαριστώ» οφείλω σε όλους τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και με στήριξαν καθώς και στους συμφοιτητές μου, με τους οποίους συνεργαστήκαμε, διαβάσαμε, γελάσαμε και πορευτήκαμε μαζί καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησής μας στην σχολή. Επιπλέον, ακόμα ένα «ευχαριστώ» αξίζουν όλοι οι καθηγητές μου, από τις πρώτες βαθμίδες της σχολικής μου εκπαίδευσης μέχρι και σήμερα καθώς και όλοι οι άνθρωποι που με έχουν βοηθήσει στο πέρας του χρόνου ώστε να φτάσω εδώ που βρίσκομαι.

Το μεγαλύτερο, όμως, «ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ» το οφείλω στην μητέρα μου και στην γιαγιά μου που με μεγάλωσαν με απέραντη αγάπη, μου συμπαραστάθηκαν και με στήριξαν στις δυσκολίες μου συμβάλλοντας καθοριστικά στην επιτυχία μου.

Τέλος η, εν λόγω, διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στην μνήμη της μητέρας μου και της γιαγιάς μου.

Παναγιώτης Γεώργιος Α. Μαυρομάτης

Αθήνα, Μάρτιος 2023

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract.....	2
Ευχαριστίες.....	3
Κατάλογος Εικόνων.....	6
Κατάλογος Συνοτομογραφιών.....	7
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Κεφάλαιο 1: Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (Synthetic Aperture Radar: SAR)...	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Ο ρόλος της φέρουσας συχνότητας (f) και του μήκους κύματος (λ).....	12
1.3 Πόλωση (Polarization) και Είδη Σκέδασης (Scattering).....	14
1.4 Interferometry (InSAR) (Συμβολομετρία).....	16
1.5 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Ραντάρ SAR.....	16
1.6 Γεωμετρία Ραντάρ SAR και Βασικά Μεγέθη.....	17
Κεφάλαιο 2: Επεξεργασία Δεδομένων και Παραγωγή Εικόνας.....	23
2.1 Τύποι Προϊόντων Ραντάρ SAR.....	23
2.1.1 Level-0.....	23
2.1.2 Level-1.....	23
2.1.3 Level-2.....	24
2.2 Συλλογή Δεδομένων SAR.....	25
2.3 2-D Πρόβλημα Δειγματοληψίας: Αμφισημίες (Ambiguities).....	32
2.4 Παραμορφώσεις Εικόνας (Image Distortion).....	33
2.5 Ρυθμός Συλλογής Δεδομένων (Data Rate).....	39
2.6 Επεξεργασία Σήματος SAR και Σχηματισμός Εικόνας.....	40
2.7 Multi-Look Επεξεργασία.....	44
2.8 Ραντάρ SAR στην Απεικόνιση Επιφάνειας Θαλάσσης.....	45
Κεφάλαιο 3: Αποστολή Sentinel-1 (Sentinel-1 Mission).....	48
3.1 Εισαγωγή για το Sentinel-1.....	48
3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Sentinel-1.....	49
3.3 Περιγραφή του Δορυφόρου.....	52

3.4 Ονοματολογία των Δεδομένων του Sentinel-1.....	53
3.5 Διαχωριστική ικανότητα (Resolution) ανά Operational Mode.....	53
3.6 Δημιουργία SLC Εικόνας από το Sentinel-1.....	56
Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα.....	57
Λεξιλόγιο.....	59
Βιβλιογραφία.....	67

Κατάλογος Εικόνων

1.1.1 Απεικόνιση Τοπίου ενός Φακού Φωτογραφικής Μηχανής.....	10
1.3.1 Είδη Σκέδασης.....	14
1.5.1 Strip Mode (SM).....	16
1.5.2 Spotlight SAR.....	17
1.6.1 Γεωμετρία SAR.....	18
1.6.2 Γραμμική Διαμόρφωση Συχνότητας (Linear Frequency Modulation, LFM)...	19
1.6.3 Βηματική Συχνότητα (Stepped Frequency, SF).....	20
1.6.4 Γωνία β_s	22
2.2.1 Κίνηση Ραντάρ SAR και «Φωτισμός» της Γης.....	26
2.2.2 Ακριβής Γεωμετρία Δορυφόρου SEASAT.....	28
2.2.3 Ορισμός Γωνιών μιας Γεωμετρίας SAR.....	30
2.2.4 Παράδειγμα Προσπίπτουσας Δέσμης SAR σε Λόφο.....	31
2.4.1 Slant Range Scale Distortion.....	34
2.4.2 Παράδειγμα Scale Distortion.....	35
2.4.3 Foreshortening.....	35
2.4.4 SAR Εικόνα με Παραμόρφωση Foreshortening.....	36
2.4.5 Layover.....	36
2.4.6 SAR Εικόνα με Παραμόρφωση Layover.....	37
2.4.7 Σκίαση (Shadowing).....	37
2.4.8 SAR Εικόνα με Παραμόρφωση Shadowing.....	38
2.6.1 SAR Point Target Return.....	41
2.6.2 Συμπιέσεις (Compressions).....	42
2.6.3 Γωνίες 'Roll', 'Pitch' και 'Yaw'.....	43
2.8.1 Εικόνα Ocean SAR.....	46
3.1 Δορυφόρος Sentinel-1.....	48
3.2.1 Acquisition Modes.....	52
3.3.1 Απεικόνιση Sentinel-1.....	53
3.4.1 Ονοματολογία Δεδομένων Sentinel-1.....	55
3.6.1 Βήματα Επεξεργασίας των Raw Data προς την SLC Εικόνα.....	56

Κατάλογος Συντομογραφιών

Κατάλογος Συντομογραφιών Ξένων Όρων	
EC	European Commission
EDRS	European Data Relay Satellite System
ENL	Equivalent Number of independent Looks
ESA	European Space Agency
EW	Extra Wide Swath
FDBAQ	Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization
FR	Full Resolution
GRD	Ground Range Detected
HH	Horizontal Polarization Transmitted/Horizontal Polarization Received
HR	High Resolution
HV	Horizontal Polarization Transmitted/Vertical Polarization Received
IPP	Inter-Pulse Period
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
ISP	Instrument Source Packets
IW	Interferometric Wide Swath
LFL	Linear Frequency Modulation
MLC	Multi Look Complex
MR	Medium Resolution
MSI	Sentinel-2 Multispectral Instrument
OCN	Level-2 Ocean Product
OLI	Landsat Operational Land Imager
OSW	Ocean Swell Spectra
OWI	Ocean Wind Field
PRF	Pulse Repetition Frequency
PRI	Pulse Repetition Interval
PRIMA	Piattaforma Italiana Multi Applicativa
RAR	Real Aperture Radar
RDI	Range Doppler Imaging

RVL	Surface Radial Velocity
SAR	Synthetic Aperture Radar
SF	Stepped Frequency
SLC	Single Look Complex
SM	Stripmap
TOPSAR	Terrain Observation with Progressive Scans SAR
VH	Vertical Polarization Transmitted/Horizontal Polarization Received
VV	Vertical Polarization Transmitted/Vertical Polarization Received
WV	Wave

Κατάλογος Πινάκων

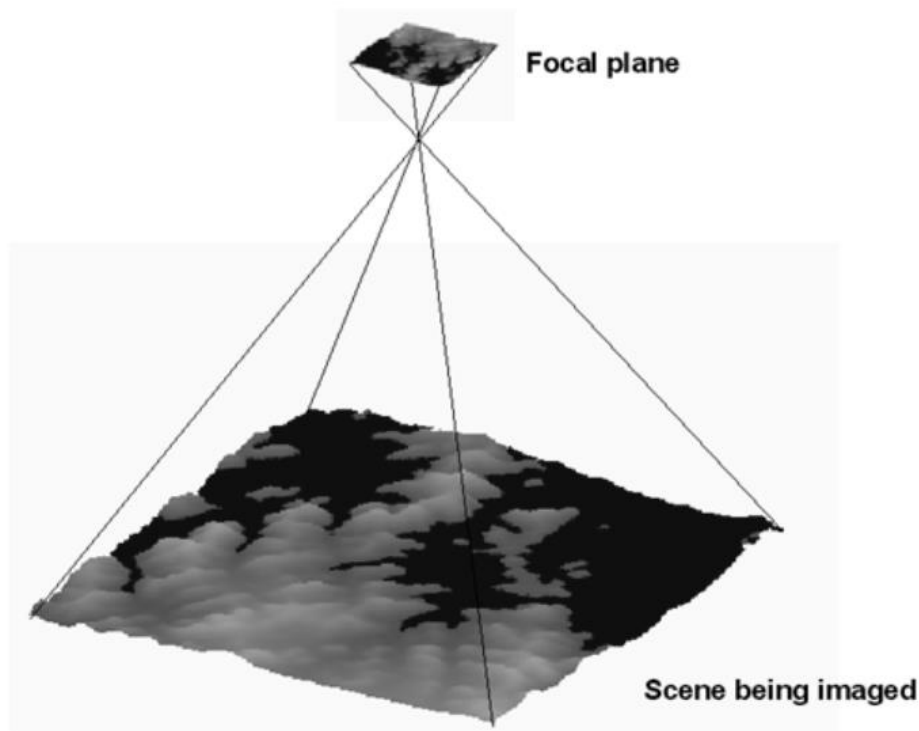
Πίνακας 1.2.1: Ζώνες Συχνοτήτων	13
Πίνακας 3.5.1: Διαχωριστικές ικανότητες ανά Operational Mode.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (Synthetic Aperture Radar: SAR)

1.1 Εισαγωγή

Τα ραντάρ απεικόνισης (imaging radars) παράγουν εικόνες του εδάφους που με την πρώτη ματιά είναι πολύ όμοιες με τις εικόνες που όλοι είμαστε εξοικειωμένοι να βλέπουμε από κλασικά όργανα που λειτουργούν στην περιοχή του ορατού ή του υπέρυθρου μέρους του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Παρόλα αυτά, οι βασικές αρχές πίσω από την δημιουργία εικόνας με ένα ραντάρ απεικόνισης είναι θεμελιωδώς διαφορετικές από τα παραπάνω όργανα. Οι αισθητήρες του ορατού και του υπέρυθρου χρησιμοποιούν ένα σύστημα από φακούς ή κάτοπτρα για να σχεδιάσουν την ακτινοβολία αυτού που βλέπουν σε ένα δισδιάστατο πίνακα από ανιχνευτές, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ηλεκτρονικός είτε, στα πρώτα όργανα τηλεπισκόπησης (remote sensing), ένα φιλμ που χρησιμοποιεί χημικές διαδικασίες. Η «δισδιάστατικότητα» μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας και συστήματα σαρωτών ή μετακινώντας μια απλή σειρά από ανιχνευτές. Αυτή η προσέγγιση της εικόνας-φωτογραφίας, με την οποία είμαστε όλοι εξοικειωμένοι από την λήψη μιας απλής φωτογραφίας με την φωτογραφική μας μηχανή ή το κινητό μας, διατηρεί τις σχετικές γωνιακές σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων στην σκηνή που φωτογραφίζουμε και της απεικόνισής τους στο εστιακό επίπεδο (focal plane) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



1.1.1 Απεικόνιση Τοπίου ενός Φακού Φωτογραφικής Μηχανής

Εξαιτίας αυτών των γωνιακών σχέσεων, η ανάλυση (resolution) της εικόνας εξαρτάται από το πόσο μακριά είναι η κάμερα από το μέρος που θέλει να φωτογραφίσει. Όσο πιο κοντά είναι η κάμερα τόσο καλύτερη είναι η ανάλυση και τόσο μικρότερες λεπτομέρειες μπορούμε να αναγνωρίσουμε στην εικόνα. Όσο η κάμερα μετακινείται μακρύτερα η ανάλυση χειροτερεύει και μόνο μεγαλύτερα αντικείμενα μπορούμε να διακρίνουμε.

Τα ραντάρ απεικόνισης χρησιμοποιούν έναν αρκετά διαφορετικό μηχανισμό για να παράξουν εικόνες, με αποτέλεσμα και τα χαρακτηριστικά της εικόνας να είναι αρκετά διαφορετικά από αυτά των εικόνων που δημιουργούνται από όργανα στο ορατό ή το υπέρυθρο φάσμα. Υπάρχουν 2 διαφορετικοί μηχανισμοί με τους οποίους τα ραντάρ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να παράγουν εικόνα και σύμφωνα με αυτούς τα ραντάρ ομαδοποιούνται σε ραντάρ πραγματικού μήκους γνωστά ως Real Aperture Radar (RAR) και σε ραντάρ συνθετικού μήκους γνωστά ως Synthetic Aperture Radar (SAR). Εμείς στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ασχοληθούμε μόνο με την δεύτερη κατηγορία, δηλαδή τα ραντάρ SAR.

Επίσης μια ακόμα διαφορά των ραντάρ από τις απλές κάμερες που λειτουργούν στην περιοχή του ορατού και του υπέρυθρου στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι και ο τρόπος με το οποίο λαμβάνουν τις εικόνες. Οι απλές κάμερες συνήθως απλά κοιτάνε προς τα κάτω την περιοχή που θέλουν να απεικονίσουν πάνω από ένα αεροσκάφος ή τουλάχιστον δεν έχουν περιορισμούς στο να κοιτάνε προς τα κάτω, από θεμελιώδη σκοπιά. Αυτό όμως δεν συμβαίνει και με τα ραντάρ. Για να αποφύγουμε τις, γνωστές σε όλους μας στον τομέα των ραντάρ, αμφισημίες (ambiguities), ο αισθητήρας του ραντάρ χρησιμοποιεί την κεραία η οποία «φωτίζει» την επιφάνεια στην οποία θέλει να «τραβήξει την φωτογραφία» αποκλειστικά από μια συγκεκριμένη πλευρά του αεροσκάφους, χωρίς να μπορεί αυτό να αλλάξει. Είναι τόσο σημαντικό άλλωστε, που αναγράφεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου. Όπως θα δούμε παρακάτω όταν θα αναλύσουμε την αποστολή Sentinel-1 η πλευρά από την οποία συλλέγει τα δεδομένα είναι μια και συγκεκριμένη. Συνήθως η κεραία έχει μια δέσμη (beam) με την οποία «φωτίζει» την γη και ουσιαστικά μέσω αυτής της δέσμης στέλνει στη γη τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε μορφή παλμών και στη συνέχεια συλλέγει τα σήματα οπισθοσκέδασης (back-scattered signals) τα οποία επεξεργαζόμαστε για να φτάσουμε στην τελική εικόνα. [5]

Το ραντάρ τύπου SAR, όπως είπαμε, ανήκει στην κατηγορία των ραντάρ απεικόνισης. Αυτά τα ραντάρ μπορούν να είναι είτε αερομεταφερόμενα (airborne) είτε επί δορυφόρων σχετικά χαμηλής τροχιάς (spaceborne) και παρέχουν δισδιάστατες απεικονίσεις της γήινης επιφάνειας χρησιμοποιώντας εκπομπές ραντάρ, συνήθως παλμικού τύπου, προς αυτήν. Είναι δηλαδή ραντάρ τα οποία βρίσκονται πάνω σε κάποιο κινούμενο μέσο και «φωτογραφίζουν» την «ακίνητη» επιφάνεια της Γης. Οι κύριες εφαρμογές των ραντάρ SAR στην εποχή μας είναι είτε για χαρτογράφηση της γης είτε για πολιτικές είτε για στρατιωτικές εφαρμογές. Ειδικά όμως για την τρίτη κατηγορία χρησιμοποιείται μια «παραλλαγή» του συγκεκριμένου ραντάρ το Αντίστροφο Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης (Inverse Synthetic Aperture Radar: ISAR). Σε αυτό τον τύπο, το ραντάρ είναι επίγειο και ακίνητο ενώ ο στόχος έχει μια

κίνηση ως προς το ραντάρ, εξ ού και ο όρος Αντίστροφο. Ο συγκεκριμένος τύπος ραντάρ ωστόσο δεν θα αναλυθεί περισσότερο στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Η ιδέα πίσω από την λειτουργία του ραντάρ SAR είναι πολύ απλή. Σε ένα οποιοδήποτε ραντάρ η χωρική ανάλυση (spatial resolution) είναι άμεσα συνδεδεμένη το πηλίκο του μήκους κύματος των κυμάτων του αισθητήρα που παράγει η κεραία προς το πραγματικό, κατασκευαστικό μήκος της κεραίας λήψης του αισθητήρα της κεραίας. Για έναν λοιπόν δορυφόρο στο διάστημα ο οποίος λειτουργεί σε μήκος κύματος 5cm (~6GHz συχνότητα λήψης, δηλαδή ένα C-band radar), για να πάρουμε ένα spatial resolution των 10m θα χρειαζόμασταν μια κεραία μήκους 4.250m, δηλαδή πάνω από 42 γήπεδα ποδοσφαίρου. Μια τέτοιου μήκους κεραία είναι εύκολα αντιληπτό ότι δεν θα ήταν καθόλου πρακτική σε ένα δορυφόρο. Έτσι το ραντάρ SAR χρησιμοποιεί μια πολύ μικρότερη σε μήκος κεραία η οποία με διαδοχικές λήψεις (acquisition modes) που συνδυάζονται, δημιουργούν μια εικόνα ίδιας, ακόμα και καλύτερης ανάλυσης από μια μεγάλη κεραία. [2]

1.2 Ο ρόλος της φέρουσας συχνότητας (f) και του μήκους κύματος (λ)

Οι συνήθεις οπτικοί αισθητήρες όπως του Landsat Operational Land Imager (OLI) καθώς και του Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) συλλέγουν δεδομένα στο φάσμα του ορατού φωτός, κοντά στην υπέρυθρη ακτινοβολία (near infrared) και ανάμεσα από υπέρυθρη και μικροκύματα (short-wave infrared) στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Οι αισθητήρες των ραντάρ, από την άλλη, χρησιμοποιούν μεγαλύτερα μήκη κύματος στην τάξη του εκατοστού (cm) έως και μέτρο (m), τα οποία δίνουν ειδικές δυνατότητες όπως το να παρατηρεί κανείς μέσα από τα σύννεφα.

Τα διαφορετικά μήκη κύματος του ραντάρ SAR συχνά αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία ως ζώνες συχνοτήτων (frequency bands), με το γράμμα που προηγείται της λέξης να συμβολίζει ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων ή μήκους κύματος. Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε τις διάφορες ονομασίες των ζωνών συχνοτήτων, σε τι συχνότητα αντιστοιχούν, κατ' επέκταση σε τι μήκος κύματος αντιστοιχούν καθώς και λίγα λόγια για τις τυπικές εφαρμογές που χρησιμοποιούμε την εκάστοτε ζώνη συχνοτήτων.

Band	Συχνότητα	Μήκος Κύματος	Τυπική Εφαρμογή
Ka	27-40 GHz	1.1-0.8 cm	Σπάνια χρησιμοποιείται για SAR (αεροπορική επιτήρηση)
K	18-27 GHz	1.7-1.1 cm	Σπάνια χρησιμοποιείται για SAR (απορρόφηση νερού)
Ku	12-18 GHz	2.4-1.7 cm	Σπάνια χρησιμοποιείται για SAR (δορυφορική υψομετρία)
X	8-12 GHz	3.8-2.4 cm	Υψηλής ποιότητας SAR (αστική παρακολούθηση, πάγος και χιόνι, ελαφρά διείσδυση στην βλάστηση, fast coherence decay σε περιοχές με βλάστηση)
C	4-8 GHz	7.5-3.8 cm	Το κυριότερο band που χρησιμοποιείται στα SAR (παγκόσμια χαρτογράφηση, ανίχνευση αλλαγών, παρακολούθηση σε περιοχές με χαμηλή έως και μέτρια διείσδυση), θαλάσσια ναυσιπλοΐα
S	2-4 GHz	15-7.5 cm	Μικρή χρήση που συνεχώς όμως αυξάνεται πάνω στο παρατήρηση της γης (Earth Observtion), παρατήρηση σε αγροτικές περιοχές (προσφέρει μια επέκταση των λειτουργιών του SAR σε μεγαλύτερη πυκνότητα βλάστησης)
L	1-2 GHz	30-15 cm	Μέτριας ανάλυσης SAR (γεωφυσική παρακολούθηση, βιομάζα, χαρτογράφηση βλάστησης, υψηλή διείσδυση και InSAR)
P	0.3-1 GHz	100-30 cm	Βιομάζα, χαρτογράφηση βλάστησης και εκτιμήσεις. Το πρώτο p-band SAR στο διάστημα εκτοξεύτηκε το 2020. Πειραματικό κυρίως ακόμα SAR

Πίνακας 1.2.1: Ζώνες Συχνοτήτων

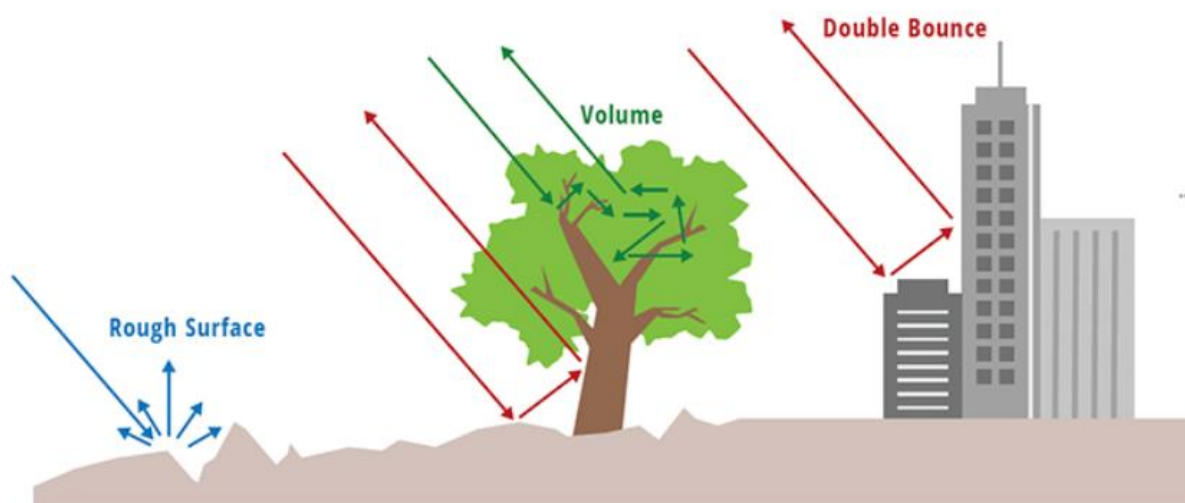
Το μήκος κύματος είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να αξιολογούμε όταν δουλεύουμε με SAR, αφού αυτό καθορίζει πώς το σήμα του ραντάρ επιδρά με την επιφάνεια που προσπίπτει καθώς και πόσο μακριά μπορεί να διεισδύσει το σήμα στο μέσο διάδοσής του. Για παράδειγμα, ένα X-band ραντάρ το οποίο λειτουργεί με μήκος κύματος περίπου 3 cm έχει πολύ μικρή ικανότητα να διεισδύσει σε μια φυλλώδη περιοχή και για αυτό πιο πολύ αλληλοεπιδρά με τα πάνω φύλλα του φυλλώδους θόλου. Αντίθετα ένα L-band σήμα, που έχει περίπου μήκος κύματος στα 23 cm, μπορεί να καταφέρει μεγαλύτερη διείσδυση μέσα στο δάσος με αποτέλεσμα να επιτρέπει μεγαλύτερη αλληλοεπίδραση του σήματος με τους κορμούς και τα κλαδιά των

δέντρων. Το μήκος κύματος δεν έχει σχέση μόνο με την διείσδυση του σήματος στα δάση αλλά και σε άλλα είδη εδάφους όπως χώμα και πάγο. Για παράδειγμα οι επιστήμονες χρησιμοποιούν SAR για την «αποκάλυψη» χαμένων πόλεων ακόμα και αστικού τύπου υποδομών που είναι «κρυμμένα» στο πέρασμα του χρόνου από πυκνή βλάστηση ή άμμο ερήμων.[6]

1.3 Πόλωση (Polarization) και είδη Σκέδασης (Scattering)

Το SAR μπορεί να συλλέξει σήματα που έχουν διαφορετικές πολώσεις, ελέγχοντας την πόλωση τόσο στην οδό της μετάδοσης όσο και στην οδό της λήψης. Ο όρος polarization (πόλωση) αναφέρεται στον προσανατολισμό του αεροσκάφους στον οποίο το μεταδιδόμενο σήμα ταλαντεύεται. Ενώ ο προσανατολισμός μπορεί να είναι προς οποιαδήποτε γωνία, οι αισθητήρες SAR τυπικά μεταδίδουν και λαμβάνουν το σήμα με γραμμική πόλωση. Η οριζόντια πόλωση συμβολίζεται με το γράμμα H, ενώ η κάθετη πόλωση με το γράμμα V, από τα αγγλικά Horizontal και Vertical αντίστοιχα.

Το πλεονέκτημα των αισθητήρων του ραντάρ SAR είναι ότι μπορούν να ελέγξουν επακριβώς την πόλωση του σήματος τόσο στην οδό της μετάδοσης όσο και στην οδό της λήψης. Όταν το σήμα μεταδίδεται με κάθετη (V) και λαμβάνεται οριζόντια (H) πόλωση, το συμβολίζουμε ως VH. Εναλλακτικά ένα σήμα που μεταδίδεται οριζόντια (H) και λαμβάνεται οριζόντια (H) συμβολίζεται ως HH κ.ο.κ. Εξετάζοντας την ισχύ του σήματος από αυτές τις διαφορετικές πολώσεις, μπορούμε να συλλέξουμε πληροφορίες για την δομή της επιφάνειας που φωτογραφίζεται βασιζόμενοι στους παρακάτω τύπους σκέδασης (scattering): σκέδαση τραχείας επιφάνειας (rough surface), σκέδαση ογκώδους (volume) και σκέδαση με διπλή αναπήδηση (double bounce). Ένα ενδεικτικό παράδειγμα αυτών των διαφορετικών σκεδάσεων σε αυτές τις επιφάνειες φαίνεται στην παρακάτω:



1.3.1: Είδη Σκέδασης

-Σκέδαση τραχείας επιφάνειας (rough surface): Αυτό το είδος σκέδασης όπου η προσπίπτουσα επιφάνεια αποτελείται από απλό χρώμα ή νερό παρουσιάζει καλύτερα δεδομένα λήψης συνήθως με την VV πόλωση.

-Σκέδαση ογκώδους (volume): Αυτό το είδος όπου η προσπίπτουσα επιφάνεια αποτελείται από φύλλα και κλαδιά σε ένα δασικό θόλο (θόλος όπως το βλέπει το ραντάρ από ψηλά) παρουσιάζει καλύτερα δεδομένα λήψης συνήθως με την ανάμεικτη πόλωση είτε VH είτε HV.

-Σκέδαση με διπλή αναπήδηση (double bounce): Αυτό το είδος όπου η προσπίπτουσα επιφάνεια αποτελείται από κτήρια, κορμούς δέντρων και γενικά επιφάνειες με μια υψομετρική διαφορά όπου το σήμα αρχικά προσπίπτει κάπου πιο χαμηλά και στην συνέχεια σε ένα ψηλότερο σημείο, παρουσιάζει καλύτερα δεδομένα λήψης συνήθως με την HH πόλωση.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η σκέδαση μπορεί να παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην λήψη του σήματος ωστόσο αυτός δεν είναι ο κυρίαρχος. Το μήκος κύματος, όπως προαναφέραμε, παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο καθώς χωρίς την κατάλληλη επιλογή αυτού, η σκέδαση μπορεί να οδηγήσει σε αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ένα C-band σήμα διεισδύει μόνο στο πάνω μέρος του δασικού θόλου και για αυτό θα έχουμε σκέδαση τραχείας επιφάνειας σε συνδυασμένο με ένα μικρό μέρος ογκώδους σκέδασης, ενώ ο εξαρχής μας στόχος ίσως ήταν η ογκώδης σκέδαση, καθώς επειδή μιλάμε για δάσος θέλαμε μεγαλύτερη διείσδυση του σήματος ώστε να έχουμε και καλύτερη πληροφορία. Από την άλλη όμως, ένα L-band ή ένα P-band σήμα θα μπορούσε να έχει αυτή την μεγαλύτερη διείσδυση που επιθυμούμε στο φύλλωμα και σε αυτή την περίπτωση θα είχαμε περισσότερο ογκώδη σκέδαση όσο και σκέδαση διπλής αναπήδησης από τους κορμούς των δέντρων. Εν κατακλείδι το είδος σκέδασης είναι σημαντικό, αλλά επικουρικό καθώς τον κύριο ρόλο έχει το μήκος κύματος του ραντάρ (ή η συχνότητα αν θέλουμε να εκφράσουμε και την άλλη όψη του νομίσματος).[6]

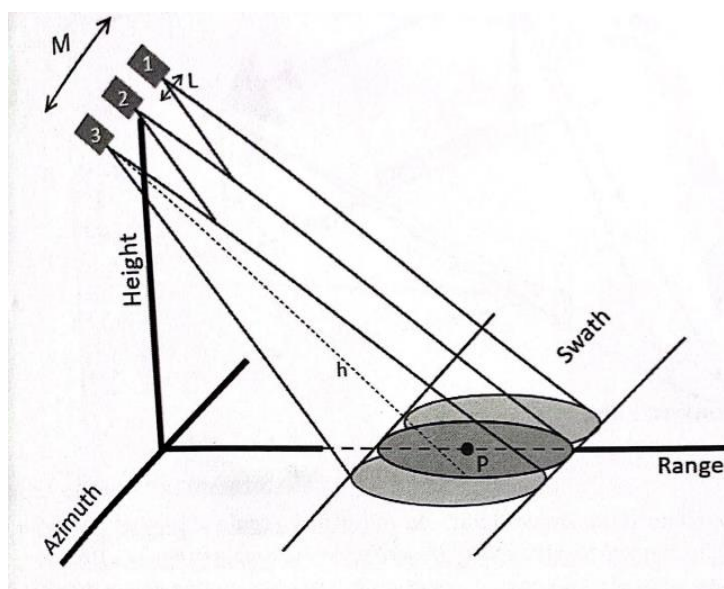
1.4 SAR Interferometry (InSAR) (Συμβολομετρία SAR)

Τα δεδομένα SAR μπορούν να αναλυθούν με ακόμα ένα τρόπο που ονομάζεται Interferometry (συμβολομετρία), σε συντομογραφία InSAR. Το InSAR χρησιμοποιεί την πληροφορία φάσης του μιγαδικού αριθμού που καταγράφεται από τον αισθητήρα του ραντάρ για να μετρήσει και το υψόμετρο του στόχου πέρα από την απλή του απεικόνιση. Χρειαζόμαστε τουλάχιστον 2 απεικονίσεις την ίδιας περιοχής από το ραντάρ ώστε να μπορούμε να δημιουργήσουμε δεδομένα για το υψόμετρο αλλά και γενικότερα για αλλαγές στην τοπογραφία του της περιοχής που απεικονίζεται. Αυτές οι υψομετρικές πληροφορίες που παράγουμε μπορούν να είναι πολύ ακριβείς (με ακρίβεια εκατοστού, cm) και βοηθούν ώστε να ταυτοποιήσουμε τυχούσες εδαφικές παραμορφώσεις της περιοχής από εκρήξεις ηφαιστειών ή σεισμούς.[6]

1.5 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Ραντάρ SAR

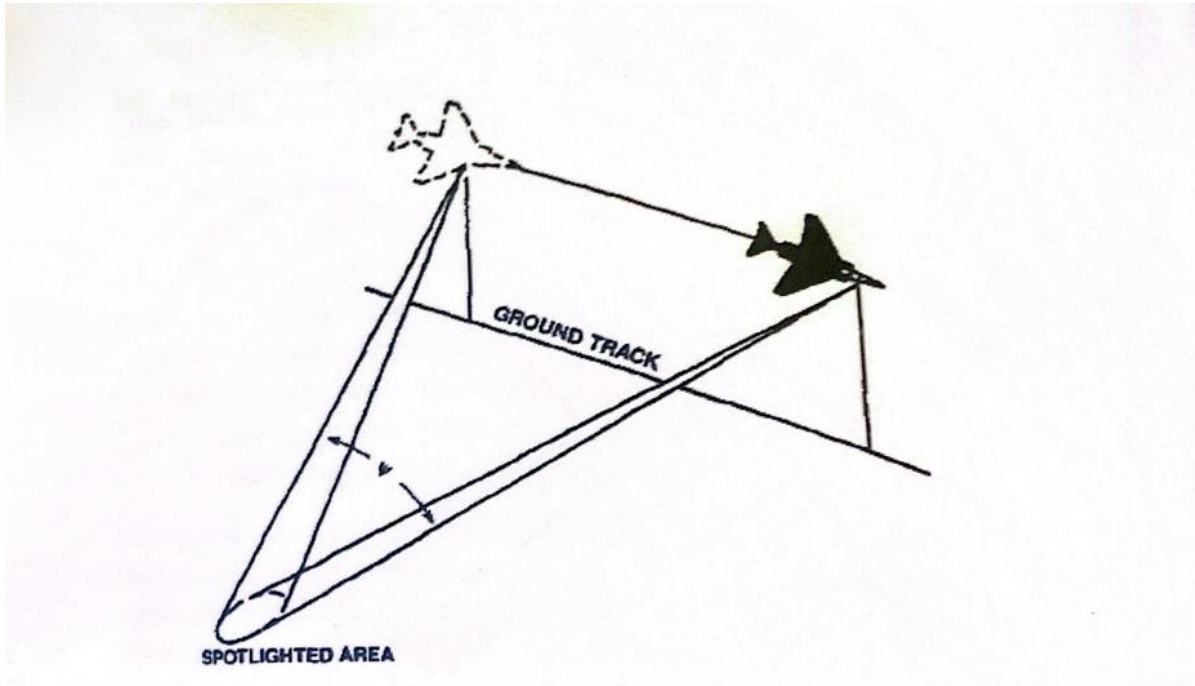
Το αεροσκάφος ή δορυφόρος που έχει πάνω του το ραντάρ SAR κινείται προς μια κατεύθυνση ενώ η ακτινοβολία της κεραίας του είναι κάθετη στην κατεύθυνση κίνησής του. Την κατεύθυνση πρόσπτωσης της ακτινοβολίας του ραντάρ SAR προς την γη, την ονομάζουμε 'range direction' και είναι η κατεύθυνση διάδοσης των ΗΜ κυμάτων. Συμβατικά θεωρούμε ότι η αυτή η κατεύθυνση βρίσκεται πάνω στον άξονα Χ'-Χ του ορθοκανονικού συστήματος συντεταγμένων. Αντίθετα η κατεύθυνση κίνησης του φορέα, αφού είναι κάθετη σε αυτήν, βρίσκεται πάνω στον Υ'Υ, κατά την ίδια σύμβαση και ονομάζεται 'cross range direction' (κατεύθυνση κάθετη στην κατεύθυνση range) ή 'along track direction' (κατεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς του φορέα) ή 'azimuth direction' (κατεύθυνση κατά μήκος του αζιμουθίου), με την τελευταία ονομασία να είναι η πιο κοινή σε χρήση.

Το ραντάρ SAR στην κατεύθυνση range στέλνει μια δέσμη ώστε να μεταδώσει τα ΗΜ κύματα προς την γη. Σύμφωνα με αυτή την δέσμη μπορούν να διακριθούν 2 τρόποι λειτουργίας του ραντάρ SAR. Στο πρώτο τρόπο λειτουργίας η δέσμη εκπομπής της κεραίας είναι ακίνητη και έτσι με την κίνηση του φορέα η στιγμιαία επιφάνεια φωτισμού (antenna footprint) σχηματίζει μια ταινία απεικόνισης που ονομάζεται 'Swath'. Αυτός είναι ο τρόπος και ονομάζεται 'Strip Mode' ή εν συντομία SM όπως αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



1.5.1: Strip Mode (SM)

Στον δεύτερο τρόπο, καθώς κινείται ο φορέας του ραντάρ η δέσμη της κεραίας στρέφεται, είτε με ηλεκτρικό είτε με μηχανικό τρόπο, έτσι ώστε να παρακολουθείται πάντα ο ίδιος στόχος. Αυτός ο τρόπος ονομάζεται 'Spotlight SAR' και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

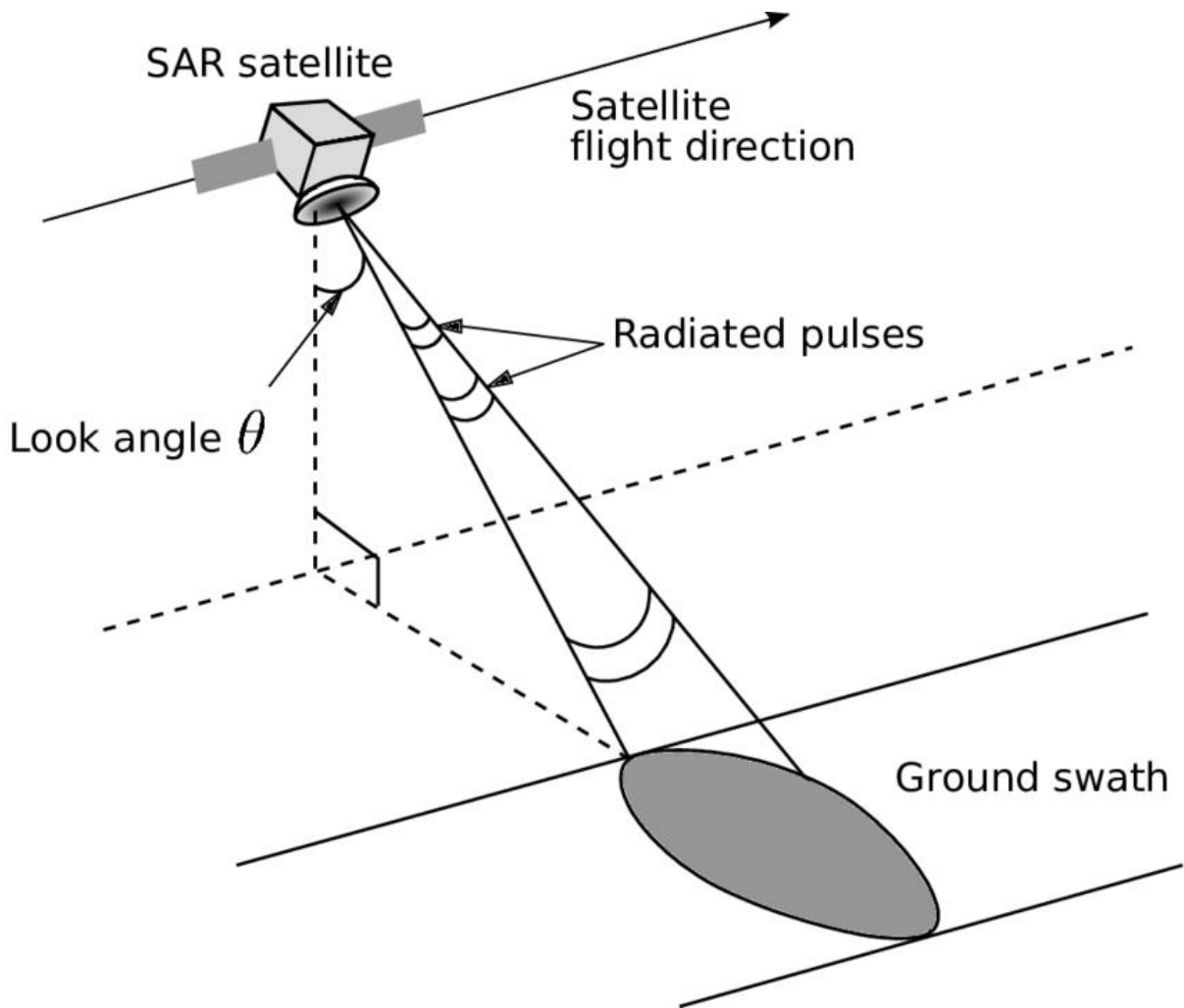


1.5.2: Spotlight SAR

Γενικά τα ραντάρ SAR έχουν αρκετά διαφορετικά acquisition modes ή αλλιώς operational modes (τρόπους συλλογής δεδομένων ή τρόποι λειτουργίας). Εμείς στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με το 'Strip Mode' (SM), ενώ για τα υπόλοιπα θα γίνει μια απλή αναφορά με κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους, χωρίς να ειπωθεί κάτι εκτενέστερα. [2]

1.6 Γεωμετρία Ραντάρ SAR και Βασικά Μεγέθη

Το σχήμα παρακάτω δείχνει την βασική γεωμετρία ενός Ραντάρ SAR το οποίο χρησιμοποιεί 'StripMode' (SM):



1.6.1: Γεωμετρία SAR

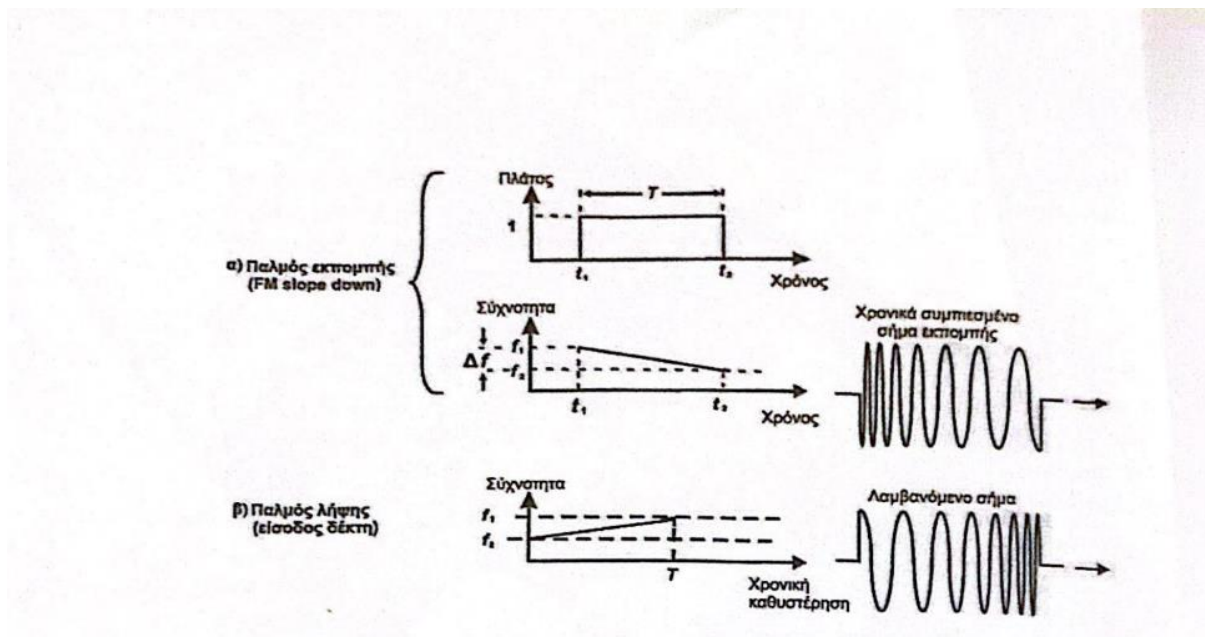
Θεωρητικά, ο φορέας του ραντάρ ίπταται σε υψόμετρο h πάνω από την γη, με σταθερή ταχύτητα v , κατά την διεύθυνση του Oy (azimuth direction) και εκπέμπει παλμούς προς τα πλάγια, δηλαδή στην Ox (range direction), όπως ήδη έχουμε αναφέρει. Οι παλμοί αυτοί μπορούν να έχουν τις εξής 2 παρακάτω μορφές ώστε να προσφέρουν επαρκώς μεγάλο εύρος ζώνης εκπομπής (Bandwidth, B):

α) Να είναι παλμοί γραμμικής διαμόρφωσης συχνότητας (Linear Frequency Modulation, LFM). Σε αυτή την περίπτωση το ραντάρ για να δημιουργήσει την εικόνα χρειάζεται N παλμούς οπισθοσκέδασης (backscattering) από την γήινη επιφάνεια.

β) Να είναι παλμοί τύπου βηματικής συχνότητας (Stepped Frequency, SF). Σε αυτή την περίπτωση για να δημιουργηθεί η εικόνα χρειαζόμαστε N ριπές παλμών (bursts).

Στην LFM περίπτωση (η οποία διεθνώς απαντάται και με τον όρο 'chirp', τιτίβισμα δηλαδή), για να δημιουργηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, η φέρουσα συχνότητα στον

εκπεμπόμενο παλμό ραντάρ αυξάνεται (slope up) ή μειώνεται (slope down) με τον χρόνο όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



1.6.2: Γραμμική Διαμόρφωση Συχνότητας (Linear Frequency Modulation, LFM)

Το εύρος ζώνης B για τον εν λόγω τύπου παλμού εκπομπής δίδεται προσεγγιστικά από την σχέση:

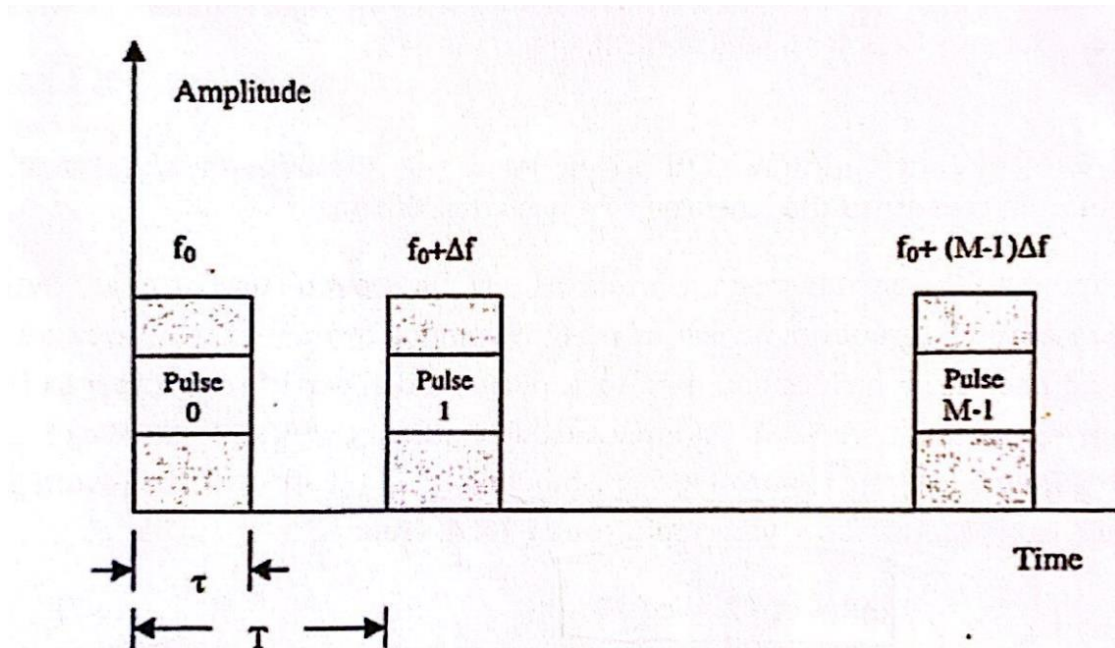
$$B = f_{max} - f_{min} \quad (1.1)$$

όπου f_{max} η μέγιστη εκπεμπόμενη συχνότητα και f_{min} η αντίστοιχη ελάχιστη εκπεμπόμενη συχνότητα στο φέρον του παλμού LFM. Το αυξημένο αυτό εύρος ζώνης παρέχει την δυνατότητα ικανοποιητικής διαχωριστικής ικανότητας στόχων στην κατεύθυνση range (βλέπε παρακάτω). Χρειαζόμαστε, λοιπόν, N παλμούς επιστροφής και κατά την λήψη και την επεξεργασία των παλμών αυτών, απαιτείται λήψη M δειγμάτων ανά παλμό. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται, προς επεξεργασία στον δέκτη του ραντάρ, $M \times N$ μιγαδικά δεδομένα σκέδασης, επί των οποίων εφαρμόζεται η μέθοδος απεικόνισης Range-Doppler Imaging (RDI) συνήθως.

Κατ' αναλογία, στην περίπτωση που έχουμε εκπομπή κυματομορφής βηματικής συχνότητας (SF) εκπέμπονται αρχικά M παλμοί, στον καθένα από τους οποίους η φέρουσα συχνότητα είναι σταθερή με τον χρόνο, αλλά αυξάνεται από παλμό σε παλμό με βήμα Δf , σύμφωνα με την σχέση:

$$f_m = f_0 + (m - 1)\Delta f \quad (1.2)$$

όπου $m=1,2,\dots,M$ όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



1.6.3: Βηματική Συχνότητα (Stepped Frequency, SM)

όπου τ στην διεθνή βιβλιογραφία συνήθως συμβολίζεται ο χρόνος διάρκειας ενός παλμού ενώ T ή T_E ο χρόνος επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Interval, PRI).

Το εύρος ζώνης B στην περίπτωση αυτή δίνεται από την σχέση:

$$B = M \cdot \Delta f \quad (1.3)$$

Το σύνολο των M εκπεμπόμενων παλμών αποτελεί μια ριπή εκπομπής (burst). Στην συνέχεια, προκειμένου να επιτευχθεί μια απεικόνιση SAR, έχουμε εκπομπή και λήψη N τέτοιων ριπών, οπότε δημιουργούμε πάλι μια μήτρα μιγαδικών δεδομένων οπισθοσκέδασης $M \times N$.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, οι δυο παραπάνω τύποι εκπομπής ραντάρ, μπορούν να θεωρηθούν μαθηματικά ισοδύναμοι, με την έννοια ότι λαμβάνονται τα δεδομένα σκέδασης από τον στόχο του ραντάρ για M διαφορετικές συχνότητες και για N διαφορετικές γωνίες θέασης.

Τέλος, ένα άλλο σημαντικό μέγεθος στην λειτουργία του ραντάρ SAR είναι το Συνθετικό Μήκος (Synthetic Length) που συμβολίζεται με L_e και ορίζεται ως το μήκος τροχιάς του φορέα κατά την διάρκεια λήψης N παλμών που απαιτούνται για τον σχηματισμό της εικόνας SAR. Η σχέση που μας δίνει αυτό το συνθετικό μήκος στην περίπτωση παλμών LFM είναι:

$$L_e = v \cdot N \cdot T_E \quad (1.4)$$

όπου T_E ο χρόνος επανάληψης παλμών και v η ταχύτητα του φορέα του φορέα του ραντάρ.

Ενώ στην περίπτωση που έχουμε εκπομπή τύπου SF τότε η σχέση μεταβάλλεται ως:

$$L_e = v \cdot N \cdot M \cdot T_E \quad (1.5)$$

όπου η διάρκεια καθεμιάς από τις N ριπές είναι:

$$T_b = M \cdot T_E \quad (1.6)$$

όπου M προφανώς ο αριθμός των διαφορετικών συχνοτήτων ανά ριπή.

Ένα ακόμα μέγεθος το οποίο είναι σημαντικό και φαίνεται στην εικόνα (1.6.1) είναι η γωνία θέασης θ ή β_s (look angle, squint angle), που ουσιαστικά είναι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα R (slant range, βλέπε παρακάτω) με τον άξονα $z'z$.

Τώρα αν θεωρήσουμε R την απόσταση του ραντάρ SAR από τον προς καταγραφή στόχο, τότε εύκολα βλέπουμε ότι σε καρτεσιανές συντεταγμένες το R γράφεται ως:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \quad (1.7)$$

Αν θεωρήσουμε ψ την γωνία που σχηματίζει το R με το επίπεδο xy (grazing angle, βλέπε παρακάτω) στο σημείο που βρίσκεται ο στόχος (λέμε σημείο καταχρηστικά μιας και ο στόχος δεν είναι σημειακός και έχει διαστάσεις, απλά θεωρούμε σαν σημείο το κέντρο του στόχου προς απλοποίηση) τότε από την γεωμετρία του σχήματος η διαχωριστική ικανότητα (range resolution) Δx του ραντάρ στην κατεύθυνση range προκύπτει εύκολα από τον τύπο:

$$\Delta x = \frac{c}{2 \cdot B \cdot \cos\psi} \quad (1.8)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός ($\sim 3 \cdot 10^8$ m/s) και B προφανώς το εύρος ζώνης.

Από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης τόσο μικρότερο είναι το Δx , άρα και τόσο καλύτερη διαχωριστική ικανότητα στην κατεύθυνση range.

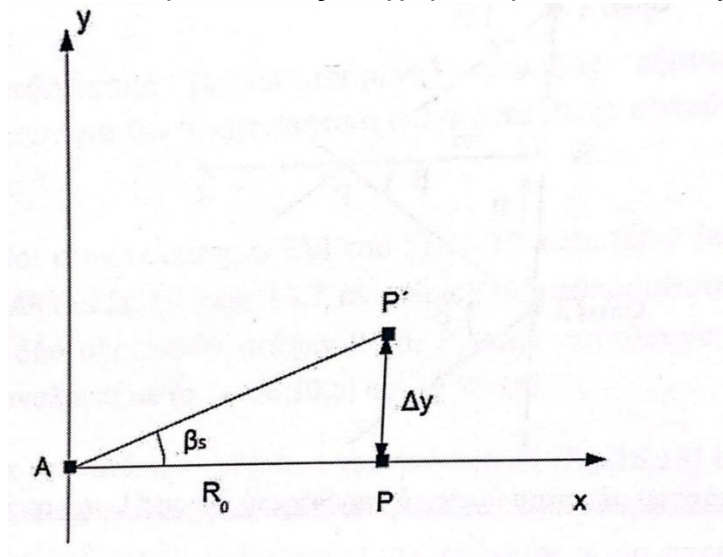
Από την άλλη στην κατεύθυνση 'cross range' η διαχωριστική ικανότητα Δy (cross range resolution) σχετίζεται με την ικανότητα του δέκτη να διαχωρίζει συχνότητες Doppler.

Για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t_0 το ραντάρ απέχει από τον στόχο απόσταση R_0 . Έτσι, μετά από αρκετές πράξεις και προσεγγίσεις προκύπτει από την θεωρία των ραντάρ ότι:

$$\Delta y = \frac{\lambda \cdot R_0}{2 \cdot L_e} \quad (1.9)$$

όπου R_0 η εν λόγω απόσταση την δεδομένη χρονική στιγμή, λ το μήκος κύματος του λειτουργίας του ραντάρ και L_e το συνθετικό μήκος που αναφέραμε. Επομένως, παρατηρούμε ότι, με την πρώτη ματιά, η 'cross range resolution' πέρα από ότι εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από το συνθετικό μήκος και ανάλογα από το μήκος κύματος, εξαρτάται ανάλογα και από την θέση R_0 του ραντάρ σε σχέση με τον στόχο. Όμως η R_0 είναι η θέση του σώματος μια δεδομένη χρονική στιγμή t_0 . Αυτό, λοιπόν, σημαίνει ότι έμμεσα το Δy εξαρτάται και από τον χρόνο. Ωστόσο θα δούμε στην συνέχεια, που θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση αυτών των εννοιών στο κομμάτι της επεξεργασίας και της δημιουργίας της εικόνας, ότι τα δεδομένα αυτά αλλάζουν και τα συμπεράσματα δεν είναι τα ίδια.

Ωστόσο, στην προκειμένη φάση, ας δούμε και λίγο διαφορετικά το Δy και να το προχωρήσουμε ένα βήμα παρακάτω. Έστω ότι έχουμε τον στόχο P και τον στόχο P' που θέλουμε να τους διαχωρίσουμε. Τότε το Δy φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



1.6.4: Γωνία β_s

Η γωνία θέασης β_s , λοιπόν, μπορεί να γραφεί ως:

$$\beta_s = \frac{\Delta y}{R_0} \quad (1.10)$$

και αντικαθιστώντας στην συνέχεια το Δy από την παραπάνω σχέση έχουμε ότι:

$$\beta_s = \frac{\lambda}{2 \cdot L_e} \quad (1.11)$$

που αποτελεί θεμελιώδη σχέση για το ραντάρ SAR.

Τέλος, γενικά και οι διαχωριστικές ικανότητες στις κατευθύνσεις range και cross range είναι θεμελιώδεις σχέσεις για το ραντάρ SAR και μονάδα μέτρησής τους προφανώς είναι το μέτρο (m), μιας και μιλάμε για μήκη. [2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Επεξεργασία Δεδομένων και Παραγωγή Εικόνας

2.1 Τύποι Προϊόντων Ραντάρ SAR

Τα προϊόντα, γενικά, ενός ραντάρ SAR, μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες. Αυτή η κατηγοριοποίηση έχει προκύψει από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (European Space Agency, ESA) και ουσιαστικά μας δίνει ένα καλύτερο τρόπο να καταλάβουμε πώς οι απλοί μιγαδικοί αριθμοί που συλλέγει το ραντάρ SAR επεξεργάζονται και καταλήγουν στην εικόνα (SAR Image) που θέλουμε. Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι η εξής:

- Level-0
- Level-1
- Level-2

2.1.1 Level-0

Τα Level-0 προϊόντα περιέχουν ουσιαστικά συμπιεσμένα και ανεπεξέργαστα δεδομένα, μαζί με κάποια σχόλια καθώς και βοηθητικές πληροφορίες ώστε να γίνει στην συνέχεια η επεξεργασία. Αυτά δεδομένα καλούνται raw data τα οποία βρίσκονται ανεπεξέργαστα στα λεγόμενα Instrument Source Packets (ISP). Τα Level-0 προϊόντα μπορούν να διαιρεθούν σε 4 κλάσεις.

-SAR Level-0 standard products: Τα 'standard products' περιέχουν ουσιαστικά τα βασικά δεδομένα του ISP έχοντας όμως και SAR σήματα ηχούς (echo), βαθμονόμησης (calibration) και θορύβου (noise).

-SAR Level-0 calibration products: Τα 'calibration products' εκφράζουν παλμούς βαθμονόμησης όπως αυτοί εξέρχονται από την ροή του ISP.

-SAR Level-0 noise products: Τα 'noise products' εκφράζουν παλμούς θορύβου ή ισοδύναμους με θόρυβο καθώς αυτοί εξέρχονται από την ροή του ISP.

-SAR Level-0 annotation products: Τα 'annotation products' περιέχουν τους πρωτογενείς και δευτερεύοντες τίτλους οδηγιών για την επεξεργασία των 'raw data' όπως αυτοί εξέρχονται από την ροή ISP.

2.1.2 Level-1

Τα Level-1 προϊόντα είναι ουσιαστικά η βάση στην οποία η πλειοψηφία των χρηστών επεξεργάζεται και φτάνει στα υψηλότερα επίπεδα. Ωστόσο για να φτάσουμε και στα Level-1 προϊόντα έχουμε και εκεί κάνει μια αρκετά μεγάλη επεξεργασία από τα raw data που είναι και η κύρια που γίνεται γενικά σε αυτά τα δεδομένα. Τα τελικά προϊόντα μπορεί να είναι είτε τα λεγόμενα Single Look Complex (SLC) είτε τα Ground Range Detected (GRD) τα οποία αλλιώς ονομάζονται και Multi Look Complex (MLC).

Τα SLC προϊόντα αποτελούνται από εστιασμένα δεδομένα, που έχουν αντιστοιχίσει στην γη (geo-referenced) χρησιμοποιώντας τα δεδομένα τροχιάς και θέσης (orbit and attitude) από τον δορυφόρο και παρέχουν κεκλιμένη (slant-range) γεωμετρία. Τα προϊόντα είναι απαλλαγμένα από την ολίσθηση Doppler και κάθε γραμμή από pixel παρουσιάζει σημεία κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στην τροχιά του δορυφόρου. Τα προϊόντα σε κάθε διάσταση περιέχουν ένα single look χρησιμοποιώντας όλο το εύρος του διαθέσιμου σήματος καθώς και μιγαδικά δείγματα (τόσο πραγματικό όσο και φανταστικό μέρος), διατηρώντας την πληροφορία φάσης.

Τα βήματα επεξεργασίας που ακολουθούμε για να παραχθούν τα Level-1 προϊόντα, αν θέλουμε να τα ομαδοποιήσουμε κάπως και να τα συγκεντρώσουμε επιγραμματικά, είναι τα παρακάτω: pre-processing, Doppler centroid estimation, single look complex focusing και post-processing για την παραγωγή τόσο των SLC όσο και των GRD εικόνων. Τέλος τα προϊόντα έχουν διορθώσει την διστατική καθυστέρηση στο αζιμούθιο (azimuth bi-static delay), το μοτίβο ανύψωσης της κεραίας (elevation antenna pattern) και τις απώλειες κατά range (range spreading loss).

Από την άλλη, τα GRD προϊόντα αποτελούνται από εστιασμένα SAR δεδομένα τα οποία είναι υπέρθεση 2 ή παραπάνω θεάσεων τα οποία προβάλλονται στην γη χρησιμοποιώντας το Earth ellipsoid model WGS84. Η προβολή των GRD προϊόντων διορθώνεται χρησιμοποιώντας κάποιο δεδομένο ύψους εδάφους, που ανήκει στις γενικές πληροφορίες του προϊόντος.

Οι συντεταγμένες του GRD είναι οι επικλινείς συντεταγμένες λήψης του δορυφόρου κατά slant range, προβαλλόμενες όμως στο ελλειψοειδές της Γης. Τα pixel έχουν και πληροφορίες ύψους. Οι πληροφορίες φάσης έχουν χαθεί ως αποτέλεσμα της προαναφερθείσας υπέρθεσης. Το τελικό GRD έχει περίπου τετραγωνικά μεγαλύτερη ανάλυση pixel και τετραγωνικά μεγαλύτερο διάστημα ανάμεσα στα pixel το οποίο μειώνει τις κηλίδες (speckles, βλέπε παρακάτω στις παραμορφώσεις) με κόστος όμως την χωρική ανάλυση (spatial resolution).

Για να μπορέσει, λοιπόν, να γίνει αυτή η μετάβαση από τα Level-0 προϊόντα στα Level-1 προϊόντα χρειάζεται να υποστούν μια επεξεργασία. Παραπάνω αναφέραμε επιγραμματικά τα βήματα αλλά η πραγματική διαδικασία είναι πολύ πιο πολύπλοκη. Έτσι στις παρακάτω παραγράφους θα εξηγήσουμε με λεπτομέρεια πώς γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και διάφορα άλλα σημαντικά θέματα που προκύπτουν.

2.1.3 Level-2

Τα Level-2 προϊόντα αποτελούνται από γεω-τοποθετημένα (geo-located) γεωφυσικά προϊόντα τα οποία έχουν αντληθεί από το προηγούμενο επίπεδο επεξεργασίας δηλαδή το Level-1. Υπάρχει μόνο ένα στάνταρ Level-2 προϊόν για τον αέρα, τα κύματα και τις σημερινές εφαρμογές, το λεγόμενο Level-2 Ocean (OCN). Το OCN προϊόν μπορεί να περιέχει τα παρακάτω γεωφυσικά στοιχεία τα οποία αντλούνται από τα SAR δεδομένα:

-Ocean Wind Field (OWI): Το OWI στοιχείο είναι ουσιαστικά ένας υπολογισμός της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του αέρα αναλυόμενος πάνω στις γεωγραφικές συντεταγμένες και σε ύψος περίπου 10m πάνω από την επιφάνεια της Γης. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να αντληθούν τόσο από το SM όσο και από το IW και το EW.

-Ocean Swell Spectra (OSW): Το OSW στοιχείο είναι ένα δισδιάστατο κυματικό φάσμα (swell spectrum) του ωκεανού και περιέχει έναν υπολογισμό της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του αέρα για κάθε κυματικό φάσμα. Τέλος το OSW στοιχείο παρέχει συνεχή μέτρηση των διαφόρων κυματικών φασμάτων σε C-Band και παράγεται τόσο από το SM όσο και από το WV.

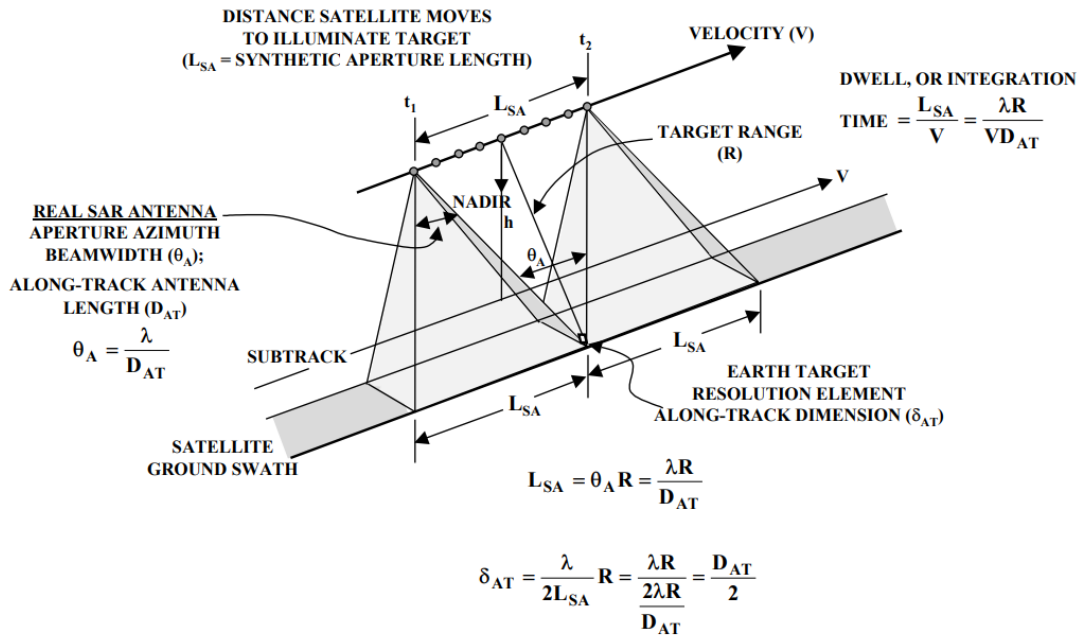
-Surface Radial Velocity (RVL): Το RVL στοιχείο είναι μια διαφορά μεταξύ του μετρούμενου Level-2 Doppler και του γεωμετρικά υπολογισμένου Level-1 Doppler, πάλι πάνω σε γεωγραφικές συντεταγμένες. Τέλος το RVL στοιχείο μπορεί να παραχθεί και από τα 4 operational modes (SM, EW, IW, WV).

Τα OCN προϊόντα μπορούν να παραχθούν από όλα τα operational modes και θέλοντας να ομαδοποιήσουμε καλύτερα αυτά που είπαμε παραπάνω στην ανάλυση των OCN στοιχείων μπορούμε να πούμε ότι, όταν έχουμε SM mode το OCN προϊόν θα περιέχει και τα τρία στοιχεία, από το IW και το EW mode το OCN προϊόν θα έχει μόνο τα OWI και RVL στοιχεία ενώ τέλος από το WV mode θα περιέχονται μόνο OSW και RVL στοιχεία. [3]

2.2 Συλλογή δεδομένων SAR

Καταρχάς σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι κάποια πράγματα έχουν αναφερθεί και στα ανωτέρω κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας όμως στα κάτωθι κεφάλαια θα προσπαθήσουμε να συγκεντρώσουμε όλες τις διαδικασίες της επεξεργασίας των δεδομένων ώστε να παραχθεί η τελική εικόνα. Κατά γενική ομολογία, αυτή είναι η πιο δύσκολη διαδικασία, πάρα πολλά στάδια και ακόμα και ο χρόνος που απαιτεί προς ολοκλήρωση είναι πολύ μεγάλος γεγονός που διαπιστώσαμε και οι ίδιοι στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας μας.

Ας πάρουμε όμως την ανάλυση από την αρχή. Ο τρόπος με το οποίο «φωτίζει» ένα ραντάρ SAR την γη από το διάστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



ACHIEVABLE ALONG-TRACK RESOLUTION IS INDEPENDENT OF RANGE AND RADAR FREQUENCY AND IMPROVES WITH SMALLER REAL ANTENNA APERTURE

2.2.1: Κίνηση Ραντάρ SAR και «Φωτισμός» της Γης

Ας υποθέσουμε ότι οι κουκίδες πάνω στο συνθετικό μήκος L_{SA} (σε προηγούμενο κεφάλαιο το είπαμε L_e όμως γράφεται και έτσι στην διεθνή βιβλιογραφία και στο παρόν κεφάλαιο θα το χρησιμοποιήσουμε έτσι ώστε να συμβαδίσουμε με τα σχήματα και να μην δημιουργηθεί σύγχυση των όρων) είναι οι διαδοχικές θέσεις του δορυφόρου στις οποίες το ραντάρ SAR στέλνει έναν παλμό. Κάθε παλμός ταξιδεύει προς τον στόχο τον οποίο υποδεικνύει η δέσμη της κεραίας και ο παλμός που ανακλάται γυρίζει πίσω και συλλέγεται πάλι από την κεραία. Το ραντάρ SAR μπορεί και «δουλεύει» μιας και τόσο ο παλμός που μεταδίδεται όσο και ο παλμός που συλλέγεται ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, μια ταχύτητα πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα με την οποία κινείται η το ραντάρ. Ειδάλλως αν δεν συνέβαινε αυτό το ραντάρ δεν θα ήταν σε θέση να συλλέξει τον παλμό οπισθοσκέδασης. Το σύστημα του SAR αποθηκεύει το αρχείο φάσης του κάθε σήματος οπισθοσκέδασης καθώς η δέσμη του ραντάρ κινείται κατά μήκος της τροχιάς του φορέα. Ύστερα γίνεται το weighting (προσδίδεται βάρος σε κάθε στοιχείο), το phase shifting (δηλαδή η μεταβολή φάσης) και το summing (δηλαδή η άθροιση) ώστε να γίνει η εστίαση και να αποθηκευτεί κάθε στόχος ως ένα στοιχείο ανάλυσης (resolution element). Οι παραπάνω διαδικασίες γίνονται με την σειρά. Έπειτα, δημιουργείται η φωτογραφία τοποθετώντας την συνολική ληφθείσα ενεργειακή απόκριση κατά την διάρκεια της εστίασης ενός συγκεκριμένου στόχο, στην θέση της εικόνας που ανταποκρίνεται στην θέση του στόχου στην επιφάνεια γης που «σκάνανε» το ραντάρ. Το ραντάρ SAR επιτυγχάνει ένα πολύ μεγάλο κέρδος επεξεργασίας σήματος λόγω της συναφούς άθροισης (coherent summation) στον άξονα της φάσης από τις ανταποκρίσεις που συσχετίζονται με το range του ραντάρ. Σε πολλές περιπτώσεις χιλιάδες παλμοί αθροίζονται για το ίδιο κελί ανάλυσης. Η ισχύς του κάθε σημείου της γης που πέφτει πάνω του η δέσμη του ραντάρ, αυτά τα σημεία ονομάζονται «σκεδαστές» (scatterers), που διαδίδεται σε πολλούς παλμούς, κατά την

διάρκειας της απεικόνισης (illustration), συγκεντρώνεται σε ένα μοναδικό σημείο στην φωτογραφία με την επεξεργασία.

Όταν τα ραντάρ SAR πήγαν πρώτη φορά στο διάστημα μέσω του SEASAT, οι τεχνικές οπτικής επεξεργασίας ήταν ο θεμέλιος λίθος για την παραγωγή της φωτογραφίας. Οι ψηφιακοί επεξεργαστές ήταν πολύ λίγοι σε αριθμό και ο πρώτος ψηφιακός επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε από το SEASAT χρειαζόταν περίπου 20 ώρες επεξεργασίας για να μετατρέψει μια 18-δευτερολέπτων συλλογή δεδομένων σε ένα 100x100km image frame. Μολονότι αυτή η υπερβολικά μεγάλη καθυστέρηση επεξεργασίας (delay) σχεδόν εξαφανίστηκε όσο οι ψηφιακές τεχνολογίες μπήκαν στην ζωή μας και οι ικανότητες επεξεργασίας βελτιώθηκαν, η συλλογή δεδομένων SAR και η επεξεργασία τους παρουσιάζει ακόμα αρκετές προκλήσεις στους σχεδιαστές δορυφόρων και αποστολών και είναι ένα από τα κύρια κριτήρια για την απόδοση του εκάστοτε προγράμματος και την κατανομή των πόρων.

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα η δέσμη της κεραίας «φωτίζει» τον στόχο όταν ο φορέας φτάσει την θέση της στιγμής t_1 και όχι πριν. Συνεχίζει να «φωτίζει» τον στόχο κατά την διάρκεια όλου του συνθετικού μήκους L_{SA} μέχρι να φτάσει την θέση της χρονικής στιγμής t_2 . Ο χρόνος που χρειάζεται για να διανύσει όλο το συνθετικό μήκος L_{SA} ονομάζεται integration time ή dwell time και όπως βλέπουμε στο σχήμα ορίζεται ως:

$$DWEELL TIME = \frac{L_{SA}}{V} \quad (2.1)$$

Εδώ να πούμε ότι η κεραία προφανώς δεν είναι ένα σημείο και έχει διαστάσεις που μάλιστα είναι πολύ σημαντικές για την επεξεργασία των δεδομένων, όπως θα δούμε παρακάτω.

D_{AT} εννοούμε την διάσταση, το μήκος δηλαδή της κεραίας, κατά την 'along-track' κατεύθυνση.

θ_A συμβολίζουμε το 'εύρος δέσμης κατά το αζιμούθιο' (azimuth beamwidth), το οποίο ορίζεται ως:

$$\theta_A = \frac{\lambda}{D_{AT}} \quad (2.2)$$

R συμβολίζουμε την λεγόμενη απόσταση 'range-to-target' ή 'line of sight' που θα δούμε αργότερα, πιο αναλυτικά, ότι λέγεται κυρίως slant range καθώς και τον πόσο σημαντικό ρόλο έχει τόσο στην δημιουργία της εικόνας όσο όμως και στις παραμορφώσεις που προκύπτουν.

Συνεχίζουμε τώρα με το να αναλύσουμε αυτό που ήδη έχουμε αναφέρει παραπάνω για την διαχωριστική ικανότητα κατά 'along track' και να το πάμε ένα βήμα παραπέρα. Το συνθετικό μήκος L_{SA} μπορεί και αλλιώς να γραφτεί ως:

$$L_{SA} = \theta_A \cdot R = \frac{\lambda \cdot R}{D_{AT}} \quad (2.3)$$

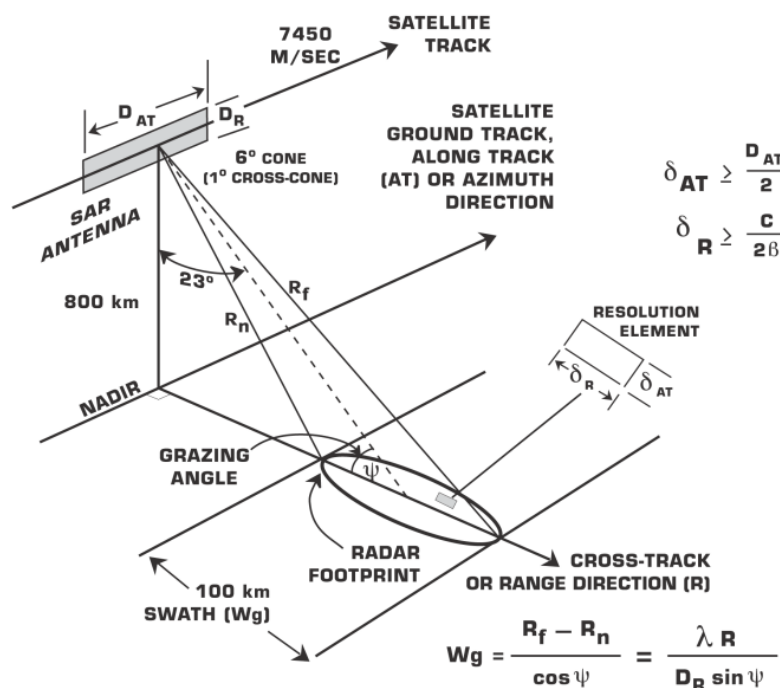
Έτσι η χωρική ανάλυση κατά την κατεύθυνση 'along track' προκύπτει:

$$\delta_{AT} = \frac{\lambda}{2L_{SA}} R = \frac{\lambda R}{2\lambda R} = \frac{D_{AT}}{2} \quad (2.4)$$

Σύμφωνα με την ανωτέρω ανάλυση βλέπουμε ότι η χωρική ανάλυση κατά ‘along track’ προσεγγίζει το μισό του μήκους (διάσταση) της αντένας κατά την ίδια κατεύθυνση. Αυτό το αποτέλεσμα με την πρώτη ματιά είναι ανεξάρτητο από το μήκος κύματος και από το ‘slant range’ R. Για να μπορέσουμε όμως να φτάσουμε σε αυτή την χωρική ανάλυση κατά αζιμούθιο θα πρέπει στην επεξεργασία να χρησιμοποιηθούν όλοι οι παλμοί της κεραίας.

Εφόσον, λοιπόν, όπως είδαμε, η χωρική ανάλυση κατά αζιμούθιο δεν εξαρτάται από το ‘slant range’, το ερώτημα που προκύπτει είναι πόσο μακριά μπορούμε να φτάσουμε από το στόχο και μιας και δεν εξαρτάται καν από την ‘slant range’, μήπως μπορούμε να φτάσουμε «άπειρα» μακριά; Αυτό το ερώτημα θα απαντηθεί παρακάτω εκτενώς και θα γίνει ξεκάθαρο ότι υπάρχουν περιορισμοί στις εφαρμογές που δεν αφήνουν το ραντάρ να απομακρυνθεί όσο θέλει από τον στόχο, δηλαδή η ‘slant range’ να γίνει άπειρα μεγάλη. Αυτοί οι περιορισμοί δηλώνονται θεσπίζοντας μη αποδεκτά όρια σε σημαντικούς στόχους της εφαρμογής, όπως το ‘coverage’ και την γεωμετρία με την οποία θέλουμε το ραντάρ να «φωτίζει» την γη. Υπάρχουν, επίσης και τεχνολογικοί περιορισμοί που θέτουν όρια στις εφαρμογές. Κάποια σημαντικά τεχνολογικά προβλήματα μπορεί να είναι η αναλογία και ο όγκος της συλλογής δεδομένων και οι κατασκευαστικοί περιορισμοί της κεραίας, όπως η ισχύς των εκπεμπόμενων παλμών, ο έλεγχος φάσης και η βαθμονόμηση (calibration).

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γεωμετρία του ραντάρ SAR πάλι, αυτή τη φορά όμως έχοντας πάρει την ακριβή γεωμετρία που είχε το πρώτο ‘spaceborne’ ραντάρ SAR, το SEASAT:



2.2.2: Ακριβής Γεωμετρία Δορυφόρου SEASAT

Όπως είδαμε το συνθετικό μήκος είναι μια συνάρτηση του εύρους δέσμης (beamwidth) της κεραίας, στην περίπτωση του SEASAT ήταν 16 km. Στην κατεύθυνση range, το πλάτος της δέσμης η οποία προσπίπτει στην γη είναι μια συνάρτηση της δέσμης του ορίου περίθλασης (diffraction-limited beam) και της γεωμετρίας με την οποία το ραντάρ φωτίζει την γη όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Έτσι προκύπτει ότι το πλάτους του swath W_g είναι:

$$W_g = \frac{R_f - R_n}{\cos\psi} \quad (2.6)$$

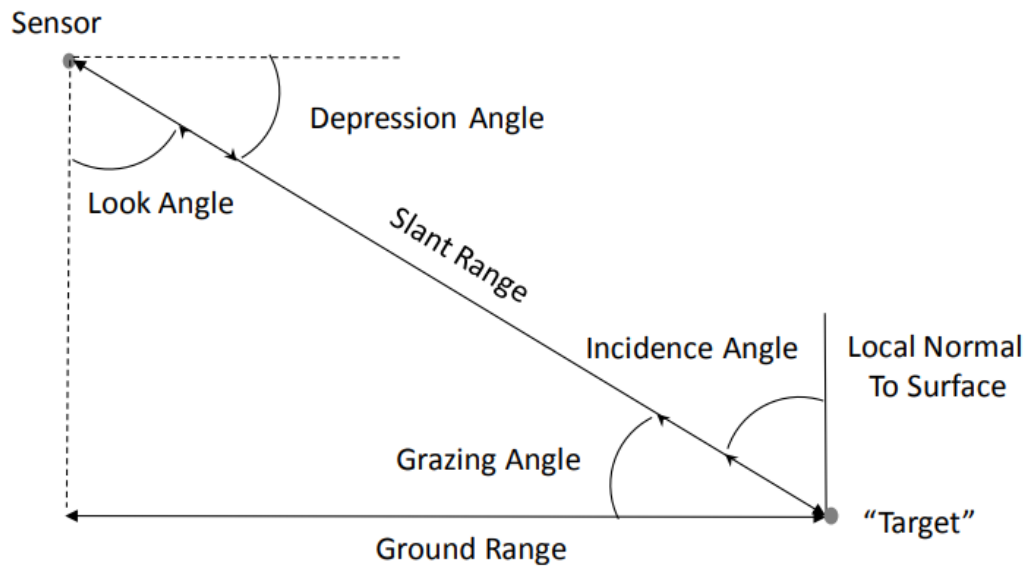
όπου τα R_f και τα R_n φαίνονται στο σχήμα και η ψ είναι η 'grazing angle' δηλαδή η γωνία που σχηματίζει το 'slant range' με την γη, την οποία αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο όμως θα αναλυθεί παρακάτω εκτενέστερα. Χρησιμοποιώντας το grazing angle, καταρχάς παρέχεται μια έκφραση του πλάτους του 'swath' σε σχέση με το 'diffraction-limited beam' και επιπροσθέτως δίνεται και η σχέση του με το differential range δηλαδή την απόσταση κοντά R_n (R_{near}) και την απόσταση μακριά R_f (R_{far}). Στην περίπτωση του SEASAT το W_g ήταν 100km. Για να απεικονίσουμε τον στόχο της γης που «φωτίζεται», κάθε παλμός μεταφέρει το 'differential range' του στόχου 2 φορές αρχικά κατά την μετάδοση και μετά την αλληλεπίδραση με την γη κατά την λήψη. Τέλος το W_g μπορεί να γραφεί και ως:

$$W_g = \frac{\lambda R}{D_R \sin\psi} \quad (2.7)$$

Όπου το D_R είναι η διάσταση της κεραίας στην κατεύθυνση 'range' και τα υπόλοιπα τα γνωστά. Εδώ βλέπουμε μια διαφορετική έκφραση της ίδιου μεγέθους που μας εισάγει μέσα και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της κεραίας (κατά range) [4]

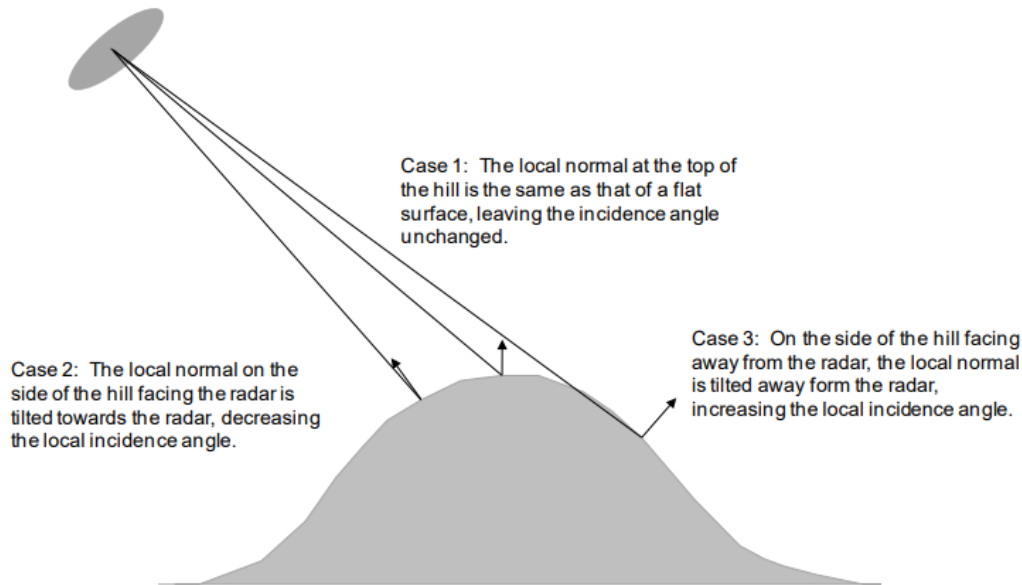
Ωστόσο σε αυτό το σημείο καλό θα ήταν να αναλύσουμε λίγο και τις διαφορετικές γωνίες που μπορούν να υπάρξουν σε μια γεωμετρία SAR καθώς και να δούμε τις σχέσεις μεταξύ τους. Οι παρακάτω όροι αρκετές φορές συγχέονται μεταξύ τους οπότε ας του δούμε με την σειρά. Ας ρίξουμε, λοιπόν, πρώτα μια ματιά στο παρακάτω σχήμα.

Για να ορίσουμε καλύτερα τις γωνίες που μας ενδιαφέρουν, ουσιαστικά στο σχήμα ο στόχος συμβολίζεται καταχρηστικά με ένα απλό σημείο:



2.2.3: Ορισμός Γωνιών μιας Γεωμετρίας SAR

Η 'look angle', όπως φαίνεται και στο σχήμα, ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του άξονα z'z και της 'slant range'. Η 'incidence angle' ορίζεται η γωνία που σχηματίζει ο κάθετος άξονας ως προς την γη στο σημείο του στόχου με την 'slant range', ένας άλλος τρόπος να την εκφράσουμε είναι ως το διάνυσμα διάδοσης των κυμάτων του ραντάρ ως προς την επιφάνεια. Όταν η καμπυλότητα παραλείπεται η 'look angle' στο ραντάρ με την 'incidence angle' στην επιφάνεια της γης είναι ίσες. Αυτό όμως ουσιαστικά είναι η εξαίρεση του κανόνα που εφαρμόζεται από ελάχιστες έως μηδενικές περιπτώσεις σε πραγματικές συνθήκες, πιο πολύ χρησιμοποιείται αυτή η ισότητα για εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς προσφέρει μια πιο εύκολη γεωμετρία από την πραγματική. Κάποιες φορές κατά την διεθνή βιβλιογραφία, οι δύο (2) αυτοί όροι χρησιμοποιούνται καταχρηστικά ο ένας αντί του άλλου, πράγμα που είναι κατά προσέγγιση σωστό μόνο για αεροσκάφη που πετούν στην ατμόσφαιρα της γης και μάλιστα σχετικά χαμηλά (low-flying aircrafts) και όταν δεν παρουσιάζεται έντονο ανάγλυφο στο έδαφος. Στην περίπτωση όμως που μελετάμε εμείς, δηλαδή ενός συστήματος 'spaceborne' η καμπυλότητα της επιφάνειας πρέπει οπωσδήποτε να μπαίνει ως παράγοντας στους υπολογισμούς. Αυτό οδηγεί σε μια incidence angle που είναι πάντα διαφορετική από την 'look angle' για τις επίπεδες επιφάνειες. Αν το έδαφος έχει έντονο ανάγλυφο, δηλαδή δεν είναι επίπεδο, η τοπική 'incidence angle' μπορεί να ποικίλει στην εικόνα του ραντάρ από pixel σε pixel. Για να το καταλάβουμε καλύτερα ας δούμε το παρακάτω σχήμα:



2.2.4: Παράδειγμα Προσπίπτουσας Δέσμης SAR σε Λόφο

Ας σκεφτούμε, λοιπόν, την περίπτωση του παραπάνω λόφου, ο οποίος φωτίζεται από ένα σύστημα ραντάρ κατά τον τρόπο που βλέπουμε. Η δέσμη του ραντάρ (beam) φωτίζει «ταυτόχρονα» σημεία τα οποία είναι είτε επίπεδα είτε κεκλιμένα προς και τις δυο πλευρές του λόφου. Στην πλευρά του λόφου όπου «βλέπει» το ραντάρ (case 2), η ακτίνα του, τοπικά, ανακλάται περισσότερο προς το ραντάρ, με αποτέλεσμα η 'incidence angle' να είναι μικρότερη από τα αντίστοιχα σημεία που βρίσκονται στην επίπεδη επιφάνεια (case 1) του λόφου. Αντίστοιχα στα σημεία που βρίσκονται στην πλευρά που «δεν βλέπει» το ραντάρ (case 3), η ακτίνα του ραντάρ ανακλάται μακριά από το ραντάρ με αποτέλεσμα να δημιουργεί μια γωνία πρόσπτωσης (angle of incidence) μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της επίπεδης περίπτωσης (case 1). Βλέπουμε λοιπόν η ίδια δέσμη που φωτίζει την ίδια στιγμή μια επιφάνεια μπορεί να έχει διαφορετικές 'incidence angle' από σημείο σε σημείο, για την ίδια όμως 'look angle' που είναι μια και κοινή.

Ένας όρος, ακόμα, που χρησιμοποιείται πάνω σε μια γεωμετρία ραντάρ SAR, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.3 είναι η γωνία ανάμεσα στην δέσμη του ραντάρ και τον οριζόντιο άξονα του τοπικού συστήματος του ραντάρ που ονομάζεται 'depression angle' και είναι προφανώς πάντα συμπληρωματική (το άθροισμά τους σχηματίζει ορθή γωνία 90°) με την 'look angle'. Κατ' επέκταση αυτό σημαίνει ότι μια μικρή look angle δημιουργεί μια μεγάλη 'depression angle' και το αντίθετο. Ομοίως συχνά μπορούμε να βρούμε στην βιβλιογραφία και τον όρο 'grazing angle' που αναφέραμε και παραπάνω και είναι η γωνία που σχηματίζει η προσπίπτουσα δέσμη στην γη με την τον οριζόντιο τοπικό άξονα της γης όπως φαίνεται και στο σχήμα. Προφανώς και αυτή είναι συμπληρωματική αντίστοιχα με την incidence angle όμως, κατά τα παραπάνω, εν γένει δεν είναι ίση με την 'depression angle'. Ο όρος 'depression angle' συναντάται κυρίως σε βιβλιογραφία που έχει να κάνει με στρατιωτική χρήση (military) των ραντάρ SAR, αντικείμενο που δεν μελετάει αυτή η διπλωματική. Οπότε κατά τα παρακάτω θα χρησιμοποιήσουμε κυρίως τους όρους look angle και incidence angle και σπανιότερα

και στην 'grazing angle' καθώς και αυτή μας δίνει κάποια σημαντικά στοιχεία μελέτης ενίοτε. [5]

2.3 2-D Πρόβλημα Δειγματοληψίας: Αμφισημίες (Ambiguities)

Το ραντάρ SAR είναι ένας δισδιάστατος (range και along track) αισθητήρας παραγωγής εικόνας (imaging sensor). Αυτό δημιουργεί την απαίτηση να συλλέγονται δεδομένα τόσο στην κατεύθυνση range όσο και στην along track, τα οποία μπορούν να υποστούν επεξεργασία και να δημιουργήσουν μια εικόνα που είναι χωρίς αμφισημίες (unambiguous). Τα σχήματα της παραπάνω παραγράφου 2.2.1 και 2.2.2 προσφέρουν μια απεικόνιση ώστε να μας βοηθήσουν να οπτικοποιήσουμε τις δισδιάστατες σχέσεις ασάφειας που είναι πολύ σημαντικές στις εφαρμογές SAR.

Όπως είπαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο η ανάλυση κατά αζιμούθιο είναι περίπου το μισό του μήκους της κεραίας στην αζιμουθιακή διεύθυνση και αυτή η ανάλυση είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα του ραντάρ και την απόσταση ραντάρ από τον στόχο. Θα ήταν λοιπόν εύκολο να πούμε ότι η ανάλυση κατά την along track διεύθυνση θα μπορούσε να γίνει πολύ καλή απλώς δημιουργώντας μια κεραία με πολύ μικρό μήκος διάστασης στην κατεύθυνση along track (D_{AT}). Αυτό θα ήταν στην πραγματικότητα το ιδανικό αλλά οι συνθήκες αμφισημίας (ambiguity conditions) θέτουν κάποια όρια στο να έχει η κεραία πρακτικά πολύ μικρό μέγεθος. Για να μπορέσουμε να συλλέξουμε τα δεδομένα along track και κατά συνέπεια να πάρουμε την ανάλυση κατά την ίδια διεύθυνση, το ραντάρ αναγκάζεται να στέλνει έναν παλμό κάθε φορά που η πλατφόρμα του μεταφράζει το μισό από το μήκος της κεραίας κατά along track. Αυτή η συνθήκη δημιουργεί ένα κάτω όριο για την Pulse Repetition Frequency / PRF (Συχνότητα Επανάληψης Παλμών). Η σχέση για αυτό το κάτω όριο δόθηκε από τον K. Tomiyasu το 1978:

$$\frac{2 \times \text{Velocity of Radar } (V)}{\text{Antenna Length } (D_{AT})} < PRF \quad (2.8)$$

Αν όμως αντικαταστήσουμε το D_{AT} από την σχέση (2.4) προκύπτει και αυτός ο τρόπος έκφρασης της (2.8):

$$\frac{\text{Velocity of Radar}}{\text{Azimuth Resolution}} = \frac{V}{\delta_{AT}} < PRF \quad (2.9)$$

Επομένως από την (2.8) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο εμείς προσπαθούμε να μικρύνουμε την αζιμουθιακή διάσταση της κεραίας (D_{AT}) η PRF μεγαλώνει, που αυτό σημαίνει ότι το ραντάρ θα πρέπει να παράγει παλμούς γρηγορότερα. Αυτό έχει ως συνέπεια να μένει λιγότερος χρόνος ανάμεσα στους παλμούς (το μέγεθος αυτό προφανώς είναι ο αντίστροφος του PRF και είναι γνωστό ως Inter-Pulse Period ή IPP) ώστε να συλλέξουν δεδομένα στην 'range' κατεύθυνση.

Δυστυχώς μόνο ένας παλμός για δεδομένη συχνότητα ραντάρ μπορεί να είναι το 'target zone' κάθε φορά, ειδάλως δημιουργείται ασάφεια στην 'range' κατεύθυνση, αναιρώντας την δημιουργία δισδιάστατης εικόνας. Αυτή η συνθήκη θέτει ένα άνω όριο στην PRF το οποίο είναι συνάρτηση του πλάτους του 'swath', που είναι η προβολή

της 'slant range' στην κατεύθυνση 'range', δηλαδή στην γη, το οποίο είδαμε και στην σχέση (2.6) να συμβολίζεται ως $R_f - R_n$ (= S, για διευκόλυνση του δίνουμε το γράμμα S για ορισμό) και της πραγματικής μη συμπιεσμένης (uncompressed) διάρκειας του παλμού T και έτσι καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$PRF < \frac{1}{2T + \frac{2(R_f - R_n)}{c}} \quad (2.10)$$

Γενικά για τα spaceborne SAR η διάρκεια του παλμού T είναι πολύ μικρότερη από τον επόμενο προσθετικό όρο του παρονομαστή της σχέσης (2.10) οπότε η σχέση κατά προσέγγιση χωρίς να δημιουργεί μαθηματικά προβλήματα μπορεί να γραφτεί ως:

$$PRF < \frac{c}{2(R_f - R_n)} \quad (2.11)$$

Όσο αυξάνεται λοιπόν το πλάτος του 'swath', άρα και η 'incidence angle' τόσο περισσότερος χώρος χρειάζεται ανάμεσα στους παλμούς. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι η προσπάθεια για μεγαλύτερη επικάλυψη της γης με ένα 'swath', που αυτό στην διεθνή βιβλιογραφία ονομάζεται coverage, σταδιακά έρχεται σε σύγκρουση με την επιθυμία για καλύτερη χωρική ανάλυση κατά 'along track'. Έτσι συνδυάζοντας τις (2.10) και (2.11) έχουμε τα όρια για το PRF και είναι:

$$\frac{V}{\delta_{AT}} < PRF < \frac{c}{2 \times Swath Width} \quad (2.12)$$

Αν προχωρήσουμε την (2.12) ένα βήμα παραπέρα προκύπτει ο γενικός κανόνας για τις Single Look Images (Level-1) που διατυπώθηκε από τον Russel Keith Raney το 1998:

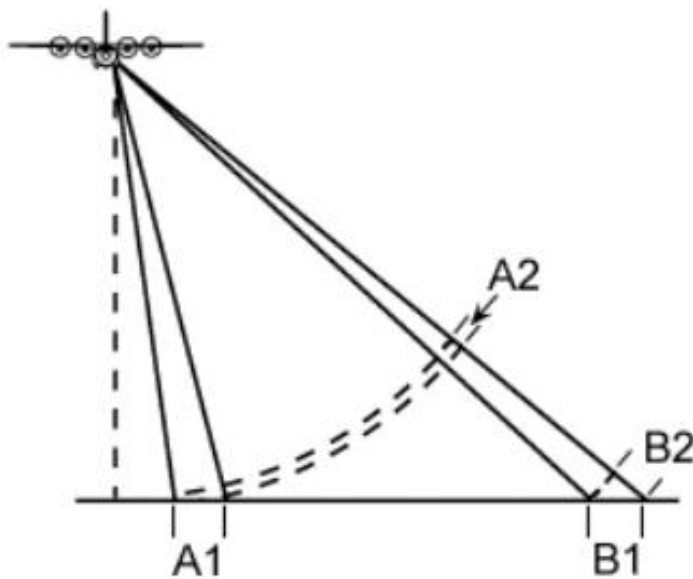
$$\frac{2 \times Swath Width}{\delta_{AT}} < \frac{c}{V} \quad (2.13)$$

Η αλήθεια είναι ότι υπάρχουν ακόμα πιο περίπλοκες διαδικασίες για τους χρόνους διάδοσης και λήψης καθώς και τον συντονισμό τους. Στην πραγματικότητα στο διάστημα, περισσότεροι από ένας παλμοί μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα και έτσι για να αποφύγουμε τα σήματα, που λαμβάνουμε μετά την οπισθοσκέδαση, να «μπλεχτούν» ουσιαστικά μεταξύ τους και με τα σήματα εκπομπής θα πρέπει να εφαρμοστεί το λεγόμενο temporal interlacing ('χρονικό πλέξιμο', μείξη) των σημάτων που μεταδίδονται και αυτών που επιστρέφουν. Με άλλα λόγια, ώστε να γίνει πιο κατανοητή η παραπάνω έννοια, ουσιαστικά «πλέκουμε» (interlace) τα σήματα που πηγαίνουν και αυτά που έρχονται, δίνοντας προτεραιότητα κάθε φορά σε αυτό το σήμα που πρέπει είτε να εκπέμψουμε είτε να λάβουμε ώστε να μην μπερδευτούν μεταξύ τους και χαθεί ο γενικός έλεγχος. Αυτή η διαδικασία, που όπως φαίνεται είναι αρκετά δύσκολο να περιγραφεί, μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε πόσο πιο απαιτητική είναι η υλοποίησή της. [4]

2.4 Παραμορφώσεις Εικόνας (Image Distortion)

Εξαιτίας του κεκλιμένου τρόπου κατά τον οποίο το ραντάρ βλέπει το έδαφος, την γεωμετρία που δημιουργείται από αυτόν και επειδή το ραντάρ είναι μια συσκευή μέτρησης αποστάσεων, οι εικόνες ραντάρ πολλές φορές έχουν πολλές γεωμετρικές και ραδιομετρικές παραμορφώσεις. Οι γεωμετρικές παραμορφώσεις χωρίζονται σε 2 κατηγορίες τις παραμορφώσεις κλίμακας 'slant range' (slant range scale distortion) και τις παραμορφώσεις εξαιτίας του 'relief displacement' (μετατοπίσεων αναγλύφου).

Οι παραμορφώσεις κλίμακας 'slant range' συμβαίνουν επειδή, το ραντάρ μετράει την απόσταση των αντικειμένων στην 'slant range' και όχι την πραγματική απόσταση από τον κάθετο άξονα που ενώνει τον φορέα με το έδαφος.



2.4.1: Slant Range Scale Distortion

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα οι στόχοι A1 και B1 έχουν το ίδιο μέγεθος στο έδαφος, όμως οι απεικονίσεις τους στο 'slant range' δηλαδή τα A2 και B2 είναι εμφανώς διαφορετικές. Αυτό ουσιαστικά οδηγεί τους στόχους που βρίσκονται κοντά στον φορέα ή μάλλον κοντά στην νοητή κάθετη του φορέα προς την γη, να φαίνονται πιο μικροί και συμπιεσμένοι σχετικά με τους στόχους που βρίσκονται πιο μακριά από αυτήν. Χρησιμοποιώντας όμως τριγωνομετρία η απόσταση της προβολής του 'slant range' στην γη μπορεί να υπολογιστεί από την 'slant range' καθώς και το ύψος του φορέα ώστε να το μετατρέψουμε τα αντικείμενα στο κανονικό τους μέγεθος σύμφωνα με τον χώρο που καταλαμβάνουν πραγματικά στην γη. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την παραμορφωμένη κλίμακα μιας εικόνας SAR και από κάτω την διορθωμένη κανονική της όψη.

Slant-Range Scale Distortion



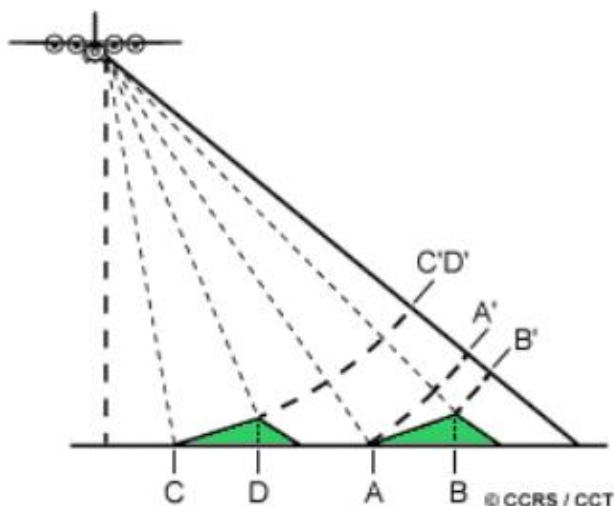
Corrected image



2.4.2: Παράδειγμα Scale Distortion

Όπως και με τις κάμερες και τα 'scanners', οι εικόνες από ραντάρ έχουν γεωμετρικές παραμορφώσεις λόγω του 'relief displacement'. Αυτή η μετατόπιση αναγλύφου είναι μονοδιάστατη και προκύπτει κάθετα κάτω από την πορεία του φορέα. Οι παραμορφώσεις λόγω του 'relief displacement' μπορεί να είναι το 'foreshortening', το 'layover' και το 'shadowing'.

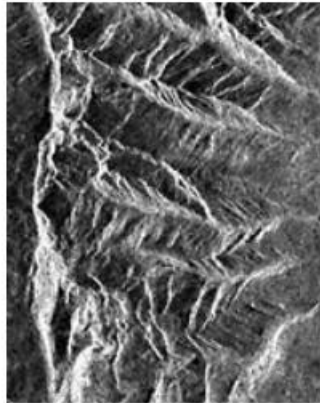
Το foreshortening προκαλείται όταν η δέσμη του ραντάρ φτάνει πρώτα στην βάση μιας εδαφικής ανύψωσης και ανακλάται πίσω πριν προλάβει να φτάσει την κορυφή της ίδιας ανύψωσης. Πάλι όπως και στο 'slant range scale distortion' το ραντάρ μετράει απόσταση κατά την διεύθυνση slant range και έτσι ο λόφος εμφανίζεται συμπιεσμένος όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα όπου η πλαγιά AB του λόφου έχει πολύ μικρότερο μήκος από την A'B' που βλέπουμε ότι μετράει κατά slant range το ραντάρ:



2.4.3: Foreshortening

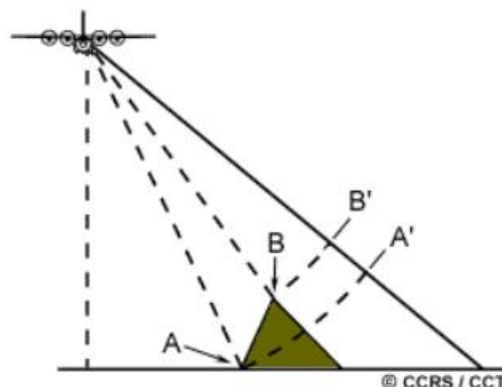
Μάλιστα βλέπουμε ότι πάλι όσο πιο κοντά στην κάθετη διεύθυνση του φορέα ως προς τη γη βρίσκεται η ανύψωση, στην περίπτωση της παραπάνω εικόνας (2.4.3) η πλαγιά

CD, τόσο πιο μικρό είναι το μήκος της κατά 'slant range' καθώς όπως βλέπουμε τα C'D' έχουν πλησιάσει τόσο κοντά λες και είναι σχεδόν το ίδιο σημείο. Αυτό έχει αποτέλεσμα να χάνεται όλη η πλαγία CD και να γίνεται ουσιαστικά ένα μεμονωμένο σημείο. Επιπλέον όπως γίνεται κατανοητό και εποπτικά από το σχήμα και η 'incidence angle' παίζει ρόλο στο φαινόμενο. Στις πραγματικές SAR φωτογραφίες, όπως αυτή που ακολουθεί, η παραμόρφωση του 'foreshortening' ουσιαστικά δίνει στις περιοχές της εικόνας που την έχουν υποστεί πιο φωτεινό χρώμα.



2.4.4: SAR Εικόνα με Παραμόρφωση Foreshortening

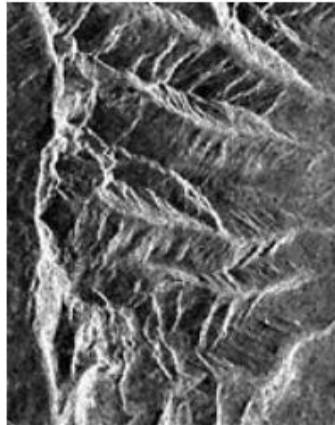
Το 'layover' προκαλείται όταν ο η δέσμη του παλμού του ραντάρ προσκρούει πρώτα στην κορυφή του λόφου και έπειτα στην βάση του. Έτσι το σήμα που γυρνάει πίσω από την κορυφή θα συλλεχθεί προτού συλλεχθεί το σήμα που αντιστοιχεί στην βάση του λόφου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κορυφή του λόφου να μετατοπίζεται προς το ραντάρ σε σχέση με την κανονική της θέση και η βάση να κείται σαν να γυρνάει ανάποδα. Σε αυτή την περίπτωση ο αγγλικός όρος της παραμόρφωσης δίνει ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο συμβαίνει καθώς η κορυφή «lays over» της βάσης, όπως δείχνει και το παρακάτω σχήμα:



2.4.5: Layover

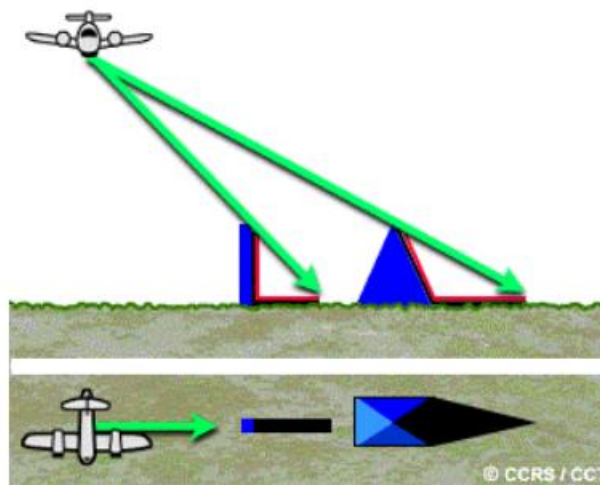
Έτσι ουσιαστικά ενώ η πληροφορία θα έπρεπε να μεταφέρεται από το A στο B μεταφέρεται από το B' στο A'. Το 'layover' είναι μια ακραία μορφή παραμόρφωσης

'foreshortening' και έτσι και σε αυτή, τα σημεία της εικόνας που την έχουν υποστεί είναι αρκετά πιο φωτεινά, όπως βλέπουμε και παρακάτω:



2.4.6: SAR Εικόνα με Παραμόρφωση Layover

Η τελευταία περίπτωση που έχει να κάνει με παραμόρφωση λόγω 'relief displacement' είναι το 'shadowing'. Όπως φανερώνει και η ίδια η λέξη 'shadowing', προκύπτει όταν η δέσμη του ραντάρ αδυνατεί να «φωτίσει» το μέρος που βρίσκεται πίσω από έναν λόφο καθώς αυτός τον καλύπτει όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



2.4.7: Σκίαση (Shadowing)

Οι κόκκινες επιφάνειες του παραπάνω σχήματος δεν «φωτίζονται» καθόλου από την δέσμη του ραντάρ. Έτσι αυτές οι περιοχές αργότερα στην εικόνα SAR θα είναι μαύρες καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια ώστε να γίνει η οπισθοσκέδαση. Επιπλέον στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι όσο η incidence angle μεγαλώνει απομακρυνόμενοι από την προβολή του φορέα στην γη, τόσο και η παραμόρφωση του shadow γίνεται μεγαλύτερη και αυτή καθώς η δέσμη του ραντάρ «κοιτάζει» όλο και πιο λοξά την επιφάνεια της γης. Τέλος, όπως βλέπουμε και στην παρακάτω εικόνα SAR με έντονη την παραμόρφωση 'shadowing', οι μαύρες περιοχές που την έχουν υποστεί δεν έχουν καμία πληροφορία.



2.4.8: SAR Εικόνα με Παραμόρφωση Shadowing

Όλες οι παραπάνω γεωμετρικές παραμορφώσεις επηρεάζουν και την ενέργεια που λαμβάνει το ραντάρ. Αφού η ενέργεια οπισθοσκέδασης συλλέγεται στην 'slant range' κατεύθυνση, η ληφθείσα ενέργεια μιας πλαγίας ενός λόφου σύμφωνα με τα παραπάνω συμπιέζεται σε μια μικρότερη περιοχή της εικόνας από την κανονική, δηλαδή με άλλα λόγια συμπιέζεται σε λιγότερα pixels. Αυτό το γεγονός δημιουργεί μεγαλύτερους ψηφιακούς αριθμούς επειδή η ενέργεια που λαμβάνεται από τα διαφορετικά αντικείμενα αθροίζεται στο κάθε pixel. Δυστυχώς αυτό το ενεργειακό φαινόμενο δεν μπορεί να διορθωθεί. Για αυτό άλλωστε οι περιοχές σε μια ραντάρ εικόνα που παρουσιάζουν layover και shadow δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ερμηνεία της εικόνας μιας και η πληροφορία εκλείπει. Αυτές λοιπόν οι παραμορφώσεις στην ενέργεια λόγω του παραπάνω φαινομένου ονομάζονται ραδιομετρικές παραμορφώσεις. [7]

Τέλος, ένα ακόμα είδος παραμόρφωσης που είναι ευρέως γνωστό και απαντάται σχεδόν συνέχεια στις εικόνες SAR πριν υποστούν την τελική τους επεξεργασία είναι το λεγόμενο 'speckle'. Αρκετές εικόνες SAR εμφανίζουν μια κοκκώδη σύσταση, σαν να έχει πέσει πάνω στην εικόνα «αλατοπίπερο» ή άμμος. Αυτές, λοιπόν οι κουκίδες ονομάζονται speckle. Το 'speckle' δημιουργείται ως αποτέλεσμα παρεμβάσεων ενός συναφούς παλμού από διαφορετικά σημεία σκέδασης μέσα σε ένα κελί ανάλυσης. Η αλληλεπίδραση της μαγνητικής ακτινοβολίας με ένα περίπλοκο σείτ από σημεία σκέδασης είναι, πιθανόν, η λιγότερο κατανοητή πτυχή της κατασκευής και εφαρμογής του συστήματος επεξεργασίας SAR. Οι μη συναφείς αισθητήρες γενικά χρησιμοποιούν φυσικά ανοίγματα περιορισμένης περίθλασης για την εστίαση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τα οποία ακολουθούνται από ανακλαστές που είναι ευαίσθητοι στην ολική ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει επάνω τους. Αντίθετα, ένα SAR στέλνει ένα εξαιρετικά ακριβές σήμα στον στόχο του και όταν η ακτινοβολία λόγω σκέδασης επιστρέφει, τότε το ραντάρ SAR καταγράφει όχι μόνο το μήκος του επιστρέφοντος σήματος αλλά και την φάση του. Η πληροφορία φάσης είναι αυτή που επιτρέπει μετά το γεγονός, την άθροιση πολλών χιλιάδων καταγεγραμμένων σημάτων στον συσχετιστή κατά την διαδικασία σύνθεσης της απεικόνισης. Τα συναφή σήματα έχουν ιδιότητες οι οποίες είναι αρκετά διαφορετικές

από τα αντίστοιχα τους μη συναφή. Στα συναφή, η παρεμβολή ανάμεσα σε στόχους σε ένα κελί ανάλυσης είναι η βάση για το φαινόμενο που ονομάζουμε 'speckle'. Για αυτό, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία στις εικόνες SAR, ακόμα και όταν τους δίνουμε μια ομοιόμορφη είσοδο (input). Αυτή η ποικιλία μπορεί να θεωρηθεί μια μορφή θορύβου. Παρόλα αυτά το 'speckle' δεν είναι ακριβώς θόρυβος καθώς υπάρχει πληροφορία που μπορεί να αντληθεί από αυτό επειδή το 'speckle' είναι η 'υπογραφή ραντάρ' ενός στόχου κάτω από ένα σύνολο διαφορετικών συνθηκών [4].

2.5 Ρυθμός Συλλογής Δεδομένων (Data Rate)

Όλα τα spaceborne ραντάρ SAR έχουν έναν «έμφυτο»-κατασκευαστικό περιορισμό στο πόσα δεδομένα μπορούν να συλλέξουν. Συνεπώς η ανάλυση κατά range, το πλάτος του 'Swath' και το 'dynamic range' (ο αριθμός των χρήσιμων επιπέδων ενός σήματος), όλα συναγωνίζονται για να πάρουν περισσότερους πόρους ώστε να επιτύχουν καλύτερα την δουλειά τους, μέσα όμως σε κάποια όρια που υπάρχουν. Από την άλλη, σημαντικά στοιχεία του σχεδιασμού ενός ραντάρ όπως ο σύνδεσμος δορυφόρου εδάφους το λεγόμενο 'satellite to ground link' ή αλλιώς 'downlink', οι μετατροπείς από αναλογικό σε ψηφιακό (A/D converters) και οι 'recorders' που υπάρχουν πάνω στον δορυφόρο χρειάζονται και αυτοί πόρους για να δουλέψουν. Έτσι δημιουργείται μια αέναη «μάχη» καθώς στα σύγχρονα SAR η παροχή πόρων στην μια λειτουργία συνήθως χαλάει την απόδοση της άλλης όπως είδαμε και σε παραπάνω παράγραφο. Η συλλογή λοιπόν των δεδομένων, το Data Rate, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ώστε να δημιουργηθεί μια καλύτερη απεικόνιση. Η πλήρης σχέση που περιγράφει για μια single look εικόνα το data rate δίνεται παρακάτω:

$$Data Rate = 2\beta_s N \frac{Swath Width Time}{IPP} \quad (2.14)$$

Το Swath Width Time ονομάζεται ο λόγος που είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή:

$$Swath Width Time = \frac{2(R_f - R_n)}{c} \quad (2.15)$$

Η συνήθης μονάδα μέτρησης του Data Rate είναι το Mbps. Επιπλέον, όπως μπορούμε να καταλάβουμε αν αναλύσουμε περισσότερο την σχέση (2.14), 4 σημαντικοί παράγοντες προκύπτουν από τον ορισμό του Data Rate και αυτοί είναι οι εξής:

1. Η ανάλυση κατά range. Το εύρος ζώνης του παλμού 'bandwidth' (β) του ραντάρ ορίζει κατά τα παραπάνω την ανάλυση κατά range ($\delta_R = \frac{c}{2\beta}$). Όσο το β αυξάνεται και η ανάλυση range γίνεται μικρότερη,
2. Ο αριθμός των bits για κάθε δείγμα (N), κάποιες φορές το ονομάζουμε και quantization rate. Το 'dynamic range' ορίζει πόσα bits χρειαζόμαστε για να διατηρήσουμε την ποιότητα δεδομένων της εικόνας.

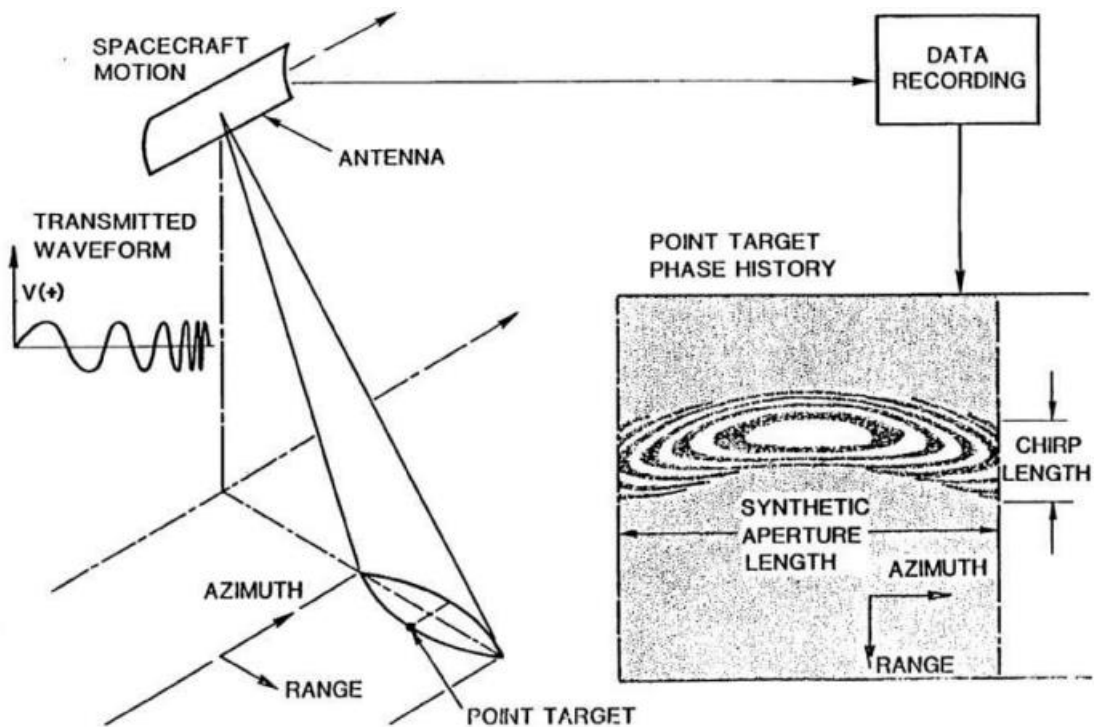
3. Το ελάχιστο Inter-Pulse Period (IPP). Το εύρος του 'Swath' υπαγορεύει μια ελάχιστη χρονική διάρκεια (2.15) ώστε το IPP να παραμένει χωρίς ασάφειες στην συλλογή δεδομένων κατά range.

4. Το μέγιστο Inter-Pulse Period (IPP). Η ανάλυση κατά αζιμούθιο ορίζει την μέγιστη χρονική διάρκεια του IPP ώστε να μην υπάρχουν ασάφειες στην συλλογή δεδομένων κατά αζιμούθιο.

Οι κατασκευαστές ενός ραντάρ SAR πρέπει να επιλέξουν ένα PRF ή αντίστροφα ένα IPP ώστε να μην δημιουργείται ασάφεια σε range και αζιμούθιο. Οι παράγοντες (3) και (4) που είδαμε παραπάνω συχνά δίνουν μια βοήθεια στους σχεδιαστές καθώς ο χρόνος που χρειάζεται για να συλλέξουμε πληροφορία από το 'Swath' (3) είναι μικρότερος από το IPP (4) που χρειάζεται για την αζιμουθιακή ανάλυση. Θετική χρήση αυτού του χρονικού πλεονεκτήματος μπορεί να μειώσει το data rate, μείωση που είναι γνωστή διεθνώς με τον όρο time expansion buffering ή stretch processing. Αυτή η τεχνική επέτρεψε στο SEASAT να μειώσει το data rate. Το εύρος ζώνης παλμού του SEASAT ήταν 19 MHz και η το sampling rate από τους βασιζόμενους στην γη (ground based) μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό ($2\beta_s$) ήταν 44 Mbits / sec, με το N να είναι 5 bits για κάθε δείγμα, τιμές που είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός data rate 220Mbps. Οι παράγοντες (3) και (4) έκαναν αυτό τον ρυθμό να μειωθεί σε 120Mbps. [4]

2.6 Επεξεργασία Σήματος SAR και Σχηματισμός Εικόνας

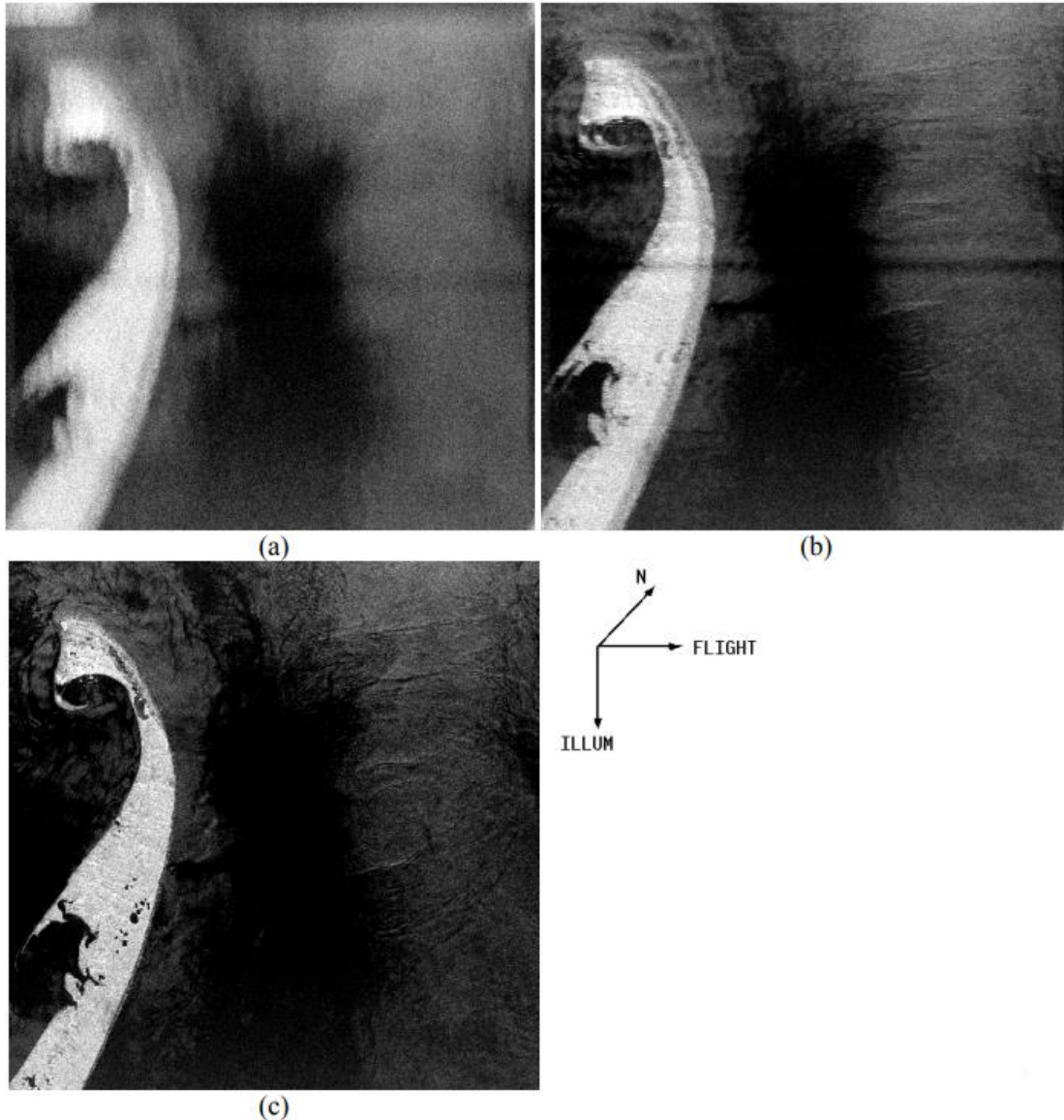
Σε έναν επεξεργαστή σήματος SAR υπάρχουν συγκεκριμένες διαδικασίες που πρέπει να γίνουν ώστε τα 'raw data' (level-0) να δημιουργήσουν την εικόνα. Τα 'raw data' δεν είναι εικόνα καθώς σημειακοί στόχοι βρίσκονται σε όλη τη 'range' διάσταση (εξαιτίας του μεγάλης συχνότητας παλμού του ραντάρ) και στην αζιμουθιακή διάσταση (εξαιτίας της κίνησης της δέσμης διαμέσου του σημειακού στόχου για την διάρκεια του dwell time). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η πορεία των 'raw data' ενός τυπικού σημειακού στόχου, όπως η δέσμη κινείται στην αζιμουθιακή ή 'along track' διεύθυνση.



2.6.1: SAR Point Target Return

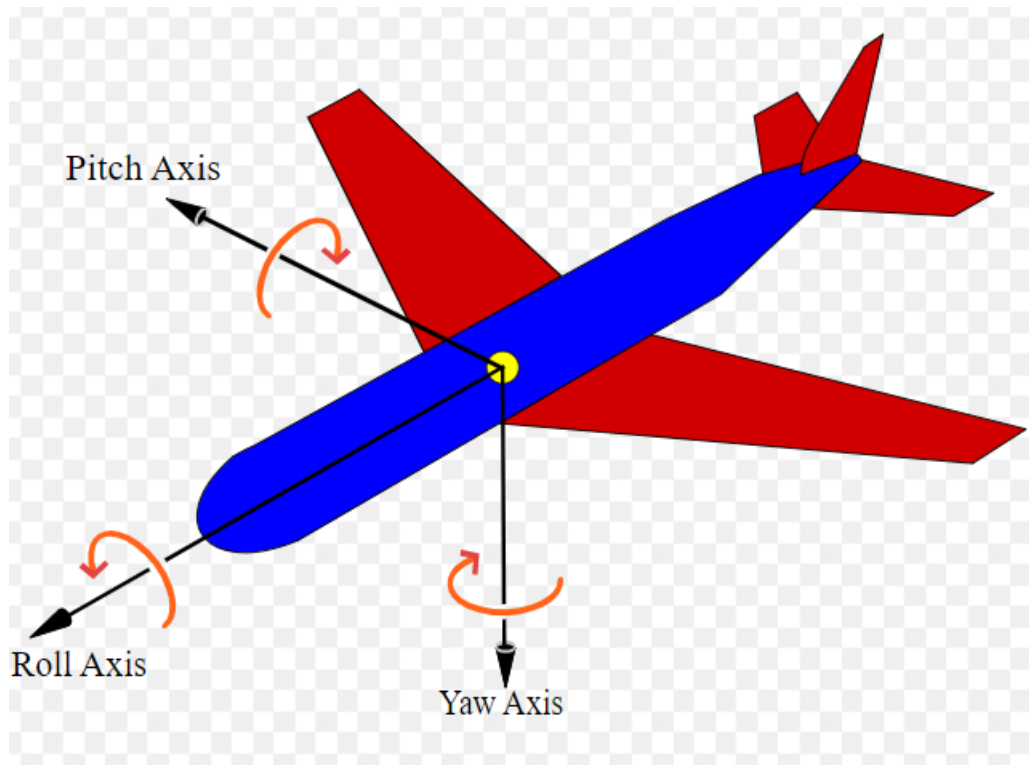
Όπως το ραντάρ κινείται από τον στόχο, η 'slant range' αρχίζει να αλλάζει από στόχο σε στόχο, σχηματίζοντας το καμπυλωτό ίχνος που φαίνεται παραπάνω. Αυτή η μετάφραση του στόχου παράγει και ένα 'along track' ίχνος συχνότητας/χρόνου στην αζιμουθιακή κατεύθυνση, που προκαλείται από το Doppler και η κωδικοποίηση του παλμού κατά 'range' παράγει άλλο ένα σχεδόν ίδιο ίχνος συχνότητας/χρόνου στην range διεύθυνση.

Ο επεξεργαστής του σήματος SAR συμπιέζει αυτή την κατανεμημένη πληροφορία στόχου σε δυο διαστάσεις την 'range' και την αζιμουθιακή ώστε να δημιουργηθεί η εικόνα. Αυτά οι 2 συμπιέσεις (compressions) είναι τα 2 πιο βασικά βήματα επεξεργασίας για την παραγωγή της εικόνας και είναι διεθνώς γνωστά με τους όρους 'range compression' και 'azimuth compression'. Η πολυπλοκότητα αυτής της διαδικασίας μπορεί να φανεί στην παρακάτω εικόνα (2.7.2). Η (a) εικόνα είναι ένα παράδειγμα καταγραφής 'raw data' από ένα σύστημα SAR. Όλοι οι σημειακοί στόχοι (δ_R με δ_{AT} στοιχεία ανάλυσης) που υπάρχουν στην δέσμη κατά ένα στιγμιότυπο παλμού υπερθέτονται και δημιουργούν ένα πολύπλοκο 'μοτίβο παρεμβολής', το οποίο δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμο σε όρους στόχου και θέσης στόχου. Αυτή είναι η κατάσταση την οποία πρέπει να ξεμπερδέψει ο επεξεργαστής SAR ώστε να παράξει την εικόνα μέσω της δειγματοληψίας που έγινε στην ανάλογη περιοχή. Επιπλέον στα 'raw data' είναι και ενσωματωμένα παραμορφώσεις και διαταραχές που δεν θέλουμε να υπάρχουν, ανάμεσα στην πλατφόρμα συλλογής (collection platform) και στην γη οι οποίες θα πρέπει και αυτές να ληφθούν υπόψη μας.



2.6.2 Συμπίεσεις (*Compressions*)

Παραδείγματα από τέτοιες παραμορφώσεις και διαταραχές περιλαμβάνουν την καμπυλότητα της 'range' διεύθυνσης, την κίνηση της γης κατά την διάρκεια της περιόδου ενσωμάτωσης (integration period), την εκκεντρικότητα τροχιάς, τον θόρυβο από την θέση του διαστημοπλοίου και πολλά άλλα. Σαν αποτέλεσμα, πολλές πολύπλοκες διαδικασίες πρέπει να διενεργηθούν πριν τον σχηματισμό της εικόνας όπως διόρθωση κίνησης της πλατφόρμας για μετατοπίσεις roll, pitch και yaw καθώς και της κίνησης του στόχου κατά τον 'dwell time' ραντάρ-στόχου. Για να καταλάβουμε καλύτερα τα roll, pitch και yaw είναι οι διορθωτικές περιστροφικές κινήσεις που γίνονται σε ένα ιπτάμενο αντικείμενο, στην περίπτωση μας το διαστημόπλοιο, ώστε κατά τους αντίστοιχους άξονες (roll axis, pitch axis, yaw axis) και φαίνεται καλύτερα στο παρακάτω σχήμα:



2.6.3: Roll, Pitch, Yaw

Αυτές οι παραμορφώσεις και οι διαταραχές αφαιρούνται μέσω μιας σειράς επαναλαμβανόμενων διαδικασιών που περιλαμβάνουν διόρθωση τροχιάς και θέσης του ραντάρ, σαφείς αλγόριθμους διόρθωσης της καμπυλότητας κατά range και πολλές επιλογές από μια ποικιλία εφαρμόσιμων τεχνικών αυτόματης εστίασης (auto-focusing). Πολλά προηγμένα διαστημικά ραντάρ SAR ομαλοποιούν τις επιπτώσεις της γενικότερης κίνησης της γης και τα προβλήματα που αυτή δημιουργεί χρησιμοποιώντας κάποιες μοίρες ($\pm 3^\circ$ απόκλιση από την τυπική 90 λεπτών τροχιά) προγραμματισμένης καθοδήγησης κατά yaw (yaw steering) συντονισμένη με την τροχιακή θέση της διαστημικής πλατφόρμας. Το ζήτημα είναι να οδηγήσουμε την δέσμη της πραγματικής κεραίας ώστε να παραμένει ορθογώνια στην κίνηση του δορυφόρου ως προς την γη παρά ως προς την τροχιά του αεροσκάφους. Τα σχήματα (b) και (c) της παραπάνω εικόνας (2.6.2) δείχνουν το ενδιάμεσο βήμα μετά την συμπίεση του κατανεμημένου στόχου κατά range και την τελική εικόνα μετά και την συμπίεση κατά azimuth αντίστοιχα. Ενσωματωμένα σε αυτή την διαδικασία είναι και όλες οι πολύπλοκες διορθώσεις που συζητήσαμε παραπάνω.

Διάφορες τεχνικές υπολογισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουμε την SAR εικόνα. Μια μέθοδος είναι να χρησιμοποιήσουμε υπολογιστικές τεχνικές στο φάσμα του Fourier και αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως είναι το FFT (Fast Fourier Transform). Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν 'time domain matched filters'. Η επιλογή εξαρτάται από την εφαρμογή και συχνά βασίζεται στην υπολογιστική αποδοτικότητα. Σε κάθε περίπτωση, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο, η ανάλυση κατά 'along track' είναι συντριπτικά βελτιωμένη σε σχέση με τα Real Aperture Radar και δεν είναι εξαρτημένη, σε πρώτη φάση, από την απόσταση από τον στόχο και το μήκος κύματος.

Εν κατακλείδι, ο σχηματισμός μιας εικόνας SAR (χωρίς να τον συγχέουμε με το post-processing και την ταυτοποίηση αντικειμένων (feature identification) περιλαμβάνει πολλές επεξεργασίες και υπολογισμούς για να φτάσουμε στο τελικό αποτέλεσμα. Για να καταλάβουμε την κλίμακα του φόρτου επεξεργασίας, ας σκεφτούμε ένα μοναδικό κανάλι ενός spaceborne SAR να συλλέγει μια 100 km εύρους 'swath' εικόνα με μια ταχύτητα συλλογής της διαστημικής πλατφόρμας στα 7600 m/s. Αυτές οι τιμές είναι ρεαλιστικές και μάλιστα κάποια από τα ραντάρ SAR κατά καιρούς χρησιμοποιούσαν σχεδόν τα ίδια μεγέθη. Ας υποθέσουμε ότι το ραντάρ έχει την ικανότητα δημιουργίας μιας εικόνας όπου το μέγεθος του κάθε pixel είναι 10m κατά ground range και 10m κατά along track μετά την επεξεργασία. Το ραντάρ συλλέγει πάνω από 7 εκατομμύρια pixels ανά δευτερόλεπτο και ο επεξεργαστής χρειάζεται πάνω από 1000 διαδικασίες για κάθε pixel ώστε να παραχθεί η εικόνα. Ένας πραγματικού χρόνου ή σχετικά πραγματικού χρόνου SAR επεξεργαστής πρέπει να είναι ικανός να κάνει 10^9 διαδικασίες το δευτερόλεπτο ως συνάρτηση της πολυπλοκότητας του ραντάρ και της πλατφόρμας. Προσθέτοντας και παραπάνω κανάλια στο ραντάρ στην περίπτωση ενός ολικά πολωμένου (fully polarized) SAR ή περισσότερα κανάλια μηκών κύματος και πόλωσης, καταλαβαίνουμε πόσο πιο πολύπλοκη γίνεται η όλη διαδικασία.

Μολονότι, λοιπόν, η επεξεργασία SAR είναι και θα παραμείνει έντονη υπολογιστικά, μας προσφέρει το πλεονέκτημα μιας πολύ καλής χωρικής ανάλυσης 'range' και 'along track' με μια μικρή σε μήκος κεραία, γεγονός που κάνει το ραντάρ SAR ελκυστικό για χρησιμοποίηση τόσο σε αεροπλάνα όσο και διαστημόπλοια. Τα οικονομικά οφέλη μιας εικόνας καλής χωρικής ανάλυσης, ανεξάρτητης καιρικών φαινομένων, είναι σπουδαία. Η μεγάλη περιοχή κάλυψης που είναι δυνατή από τα διαστημικά ραντάρ κάνει τα SAR ελκυστικά για πολλές εφαρμογές, κυρίως για ωκεανούς και παρατήρηση πάγων, για λόγους κλίμακας, συνοπτικής μεταβλητότητας (synoptic variability), επίδρασης καιρικών συνθηκών και κλίματος καθώς και πλήθους γνωστών αλλά και αναδυόμενων λόγων, τόσο με επιστημονικό όσο και με εμπορικό χαρακτήρα. [4]

2.7 Multi-Look Επεξεργασία

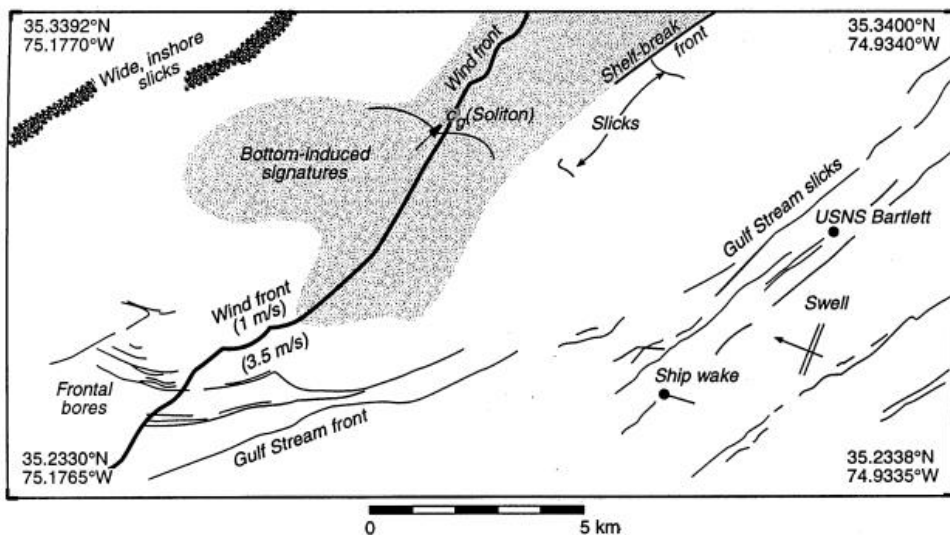
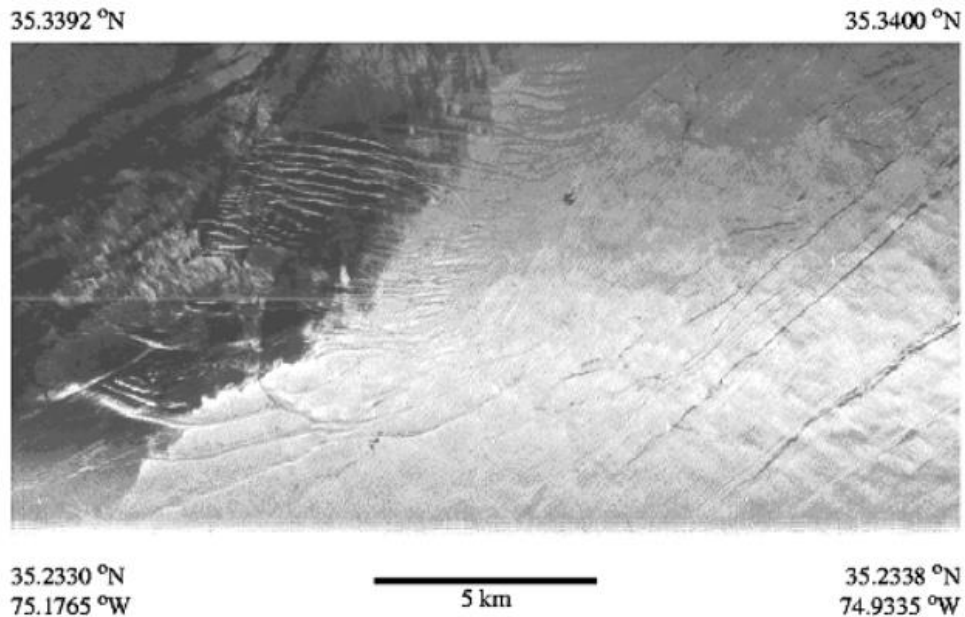
Η επεξεργασία multi-look εμπεριέχει την δημιουργία διαφορετικών ανεξάρτητων εικόνων από μια περιοχή που «φωτογραφίζει» το ραντάρ SAR, υποδιαιρώντας ή χωρίζοντας σε μέρη το διαθέσιμο εύρος φάσματος (bandwidth / είτε στην range κατεύθυνση, είτε στην αζιμουθιακή, είτε και στις δύο), και μετά συνδυάζοντας αυτές τις εικόνες ξανά ώστε να δημιουργήσουμε την τελική εικόνα. Η μέση συχνότητα Doppler από κάθε χωρισμένη θέαση (look) είναι ανάλογη στον χρόνο στον οποίο τα δεδομένα για το συγκεκριμένο look συλλέχθηκαν σχετικά με τον τοπικό χρόνο αναφοράς του κεντροειδούς Doppler. Αυτή είναι μια σημαντική ιδέα καθώς βρίσκεται στην καρδιά των λεγόμενων cross-spectral τεχνικών, τις οποίες δεν έχει νόημα να τις αναλύσουμε παραπάνω ωστόσο βοηθούν κομβικά ώστε να γίνει σημαντικά καλύτερη η χαρτογράφηση των ωκεανών, πράγμα για το οποίο θα μιλήσουμε εκτενέστερα στην επόμενη παράγραφο. Χωρίζοντας, λοιπόν, το φάσμα του εύρους ζώνης σε N κομμάτια που δεν υπερκαλύπτει το ένα το άλλο, μπορούν να δημιουργηθούν στατιστικά ανεξάρτητες εικόνες από το μέρος που «βλέπει» το ραντάρ και στην συνέχεια με τον συνδυασμό να μειώσουμε την παραμόρφωση 'speckle' που έχουμε αναφέρει σε

προηγούμενη παράγραφο. Διαιρώντας το εύρος ζώνης μας δίνει την δυνατότητα να «σπάσουμε» την φυσική συνάφεια του σήματος. Σημεία σκέδασης που μπορεί να ενωθούν σε ένα μέρος το φάσματος, όταν το «σπάμε», μπορεί να διαχωριστούν και πάλι. Ωστόσο το αντίτιμο για αυτή την μείωση της συνάφειας του σήματος, το πληρώνουμε σε χωρική ανάλυση. Το 'κλειδί' στην συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται στο να μπορούμε να εκτιμήσουμε σωστά αν το ανάγλυφο το οποίο επεξεργάζεται το SAR χρειάζεται αυτή την τεχνική, έτσι ώστε να έχουμε ένα 'trade – off' από την ποιότητα της ανάλυσής μας.

Μια εικόνα SAR μπορεί να σχηματιστεί χρησιμοποιώντας όλο το σήμα ή μέρος του εύρους ζώνης του. Εάν χρησιμοποιήσουμε όλο το εύρος ζώνης, το αποτέλεσμα ονομάζεται ή single look ή one look ή πλήρως εστιασμένη επεξεργασία και πετυχαίνει μια χωρική ανάλυση κατά range $\frac{c}{2\beta}$ και μια αζιμουθιακή ανάλυση $\frac{1}{2} D_{AT}$ κατά τα γνωστά. Οι τεχνικές 'multi-look' μπορούν να εφαρμόσουν 'two-look', 'three-look', 'four-look' κλπ. Το 'speckle' μειώνεται όσο αυξάνουμε τα 'looks' και συγκεκριμένα μειώνεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των ουσιαστικών (effective) στατιστικώς ανεξάρτητων 'looks'. [4]

2.8 Ραντάρ SAR στην Απεικόνιση Επιφάνειας θάλασσας

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ένα από τα 'field' που θα μελετήσουμε παρακάτω στο πειραματικό κομμάτι είναι η απεικόνιση της ωκεανού, όπως το λένε διεθνώς ή αν το κάνουμε περισσότερο συγκεκριμένο της θάλασσας σαν γενική έννοια. Αυτή η απεικόνιση έχει κάποιες δυσκολίες που δεν συναντάμε στο χερσαίο έδαφος και κυρίως προκαλούνται από την κίνηση της θάλασσας. Στην παρούσα παράγραφο, λοιπόν, θα δούμε κάποια σημαντικά στοιχεία για την απεικόνιση των ωκεανών από ραντάρ SAR ώστε να γίνουν απόλυτα κατανοητές οι ανωτέρω, εν λόγω, δυσκολίες. Παρακάτω, Εικόνα (2.8.1), παρουσιάζουμε και μια εικόνα SAR από θάλασσα μαζί και με μια υποτυπώδη ανάλυση από κάτω ώστε να καταλαβαίνουμε περίπου τι βλέπουμε. Ακόμα και αυτή η υποτυπώδης ανάλυση που χρειάζεται για μια εικόνα SAR στην θάλασσα, όταν δεν είσαι εξοικειωμένος με αυτές, μας δείχνει πόσο διαφορετική είναι η απεικόνιση της θάλασσας από την στεριά για την οποία κυρίως μιλήσαμε παραπάνω.



2.8.1: Εικόνα Ocean SAR

Τα ραντάρ SAR βασίζονται στην ακριβή μέτρηση της φάσης και του Doppler, τα οποία μέσα από την επεξεργασία σήματος που γίνεται, επιτρέπουν στην απεικόνιση να δημιουργηθεί με πολύ καλή ανάλυση μάλιστα στην αζιμουθιακή διεύθυνση. Η συζήτηση όμως περί επεξεργασίας σήματος SAR και σχηματισμού εικόνας περιέχει και την υπόθεση μιας στιγμιαίας μεταβολής Doppler ως αποτέλεσμα της εγκάρσιας κίνησης της δέσμης του ραντάρ κατά μήκος του αντικειμένου που «φωτίζεται». Η φυσική κίνηση ενός αντικειμένου (με μια συνιστώσα κατά μήκος της line of sight (slant range) την ώρα της παρατήρησης από το ραντάρ θα παράξει, επίσης, μια μεταβολή Doppler και θα επηρεάσει πώς θα φαίνεται η τελική εικόνα.

Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο παλμό SAR της μικροκυματικής ενέργειας και της επιφάνειας του θάλασσας είναι αρκετά περίπλοκη και εξαρτάται από το μήκος κύματος, την πόλωση, την γεωμετρία, τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τις ηλεκτρικές ιδιότητες της επιφάνειας της θάλασσας. Η ενέργεια SAR πρωτογενώς

σκεδάζεται από την επιφάνεια της θάλασσας σε μορφή μικρών (σε κλίμακα mm ή cm), που περιέχουν αέρα, επιφανειακών κυμάτων τα οποία ονομάζονται κύματα Bragg. Το ραντάρ SAR είναι εν μέρει ευαίσθητο στα κύματα Bragg στα οποία το μήκος κύματος αντιστοιχίζεται στην προβολή του ηλεκτρομαγνητικού μήκους κύματος του SAR πάνω στην τοπική επιφάνεια του ωκεανού. Ένα κύμα Bragg στην επιφάνεια της θάλασσας θα προκαλέσει την σκέδαση όλων των ηλεκτρομαγνητικών 'wavefronts' (όλα τα σημεία ενός κύματος που έχουν την ίδια φάση) από διαφορετικά τμήματα ώστε να είναι ίδια σε φάση και να προστεθούν διαδοχικά.

Η επιφάνεια της θάλασσας σταθερά κινείται και η μέση κυματική δομή θα περιέχει μια ποικιλία από κινήσεις με συνιστώσες κατά μήκος της line of sight του ραντάρ. Αυτές οι κινήσεις θα περιέχουν μικρές μεταβολές συχνότητας Doppler στα επιστρέφοντα σήματα. Αυτές οι μεταβολές, που έχουν ως αποτέλεσμα την λανθασμένη καταγραφή των σημείων σκέδασης του παραθύρου που «βλέπει» το ραντάρ, δημιουργούν μια «μουτζούρα» και μια θολούρα στην αζιμουθιακή κατεύθυνση. Αυτή η «μουτζούρα» είναι σαν ένα low pass φίλτρο να αφαιρεί σημαντικά κομμάτια από το κύμα του ωκεανού. Αυτές οι μεταβολές, επίσης, τείνουν να είναι διαφορετικές για διαφορετικές φάσεις των κυρίαρχων κυμάτων και η αρχή καθώς και το μέγεθος της επίδρασης αυτής εξαρτάται κυρίως από το μεγάλο ύψος του κύματος αλλά και άλλους παράγοντες. Ο όρος που έχει δοθεί διεθνώς στο παραπάνω φαινόμενο είναι velocity bunching (συσσώρευση ταχύτητας). Είναι ένας θεμελιώδης παράγοντας που οριοθετεί την ικανότητα του SAR να «φωτογραφίζει» περιοχές της θάλασσας. Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί και από μεγαλύτερα αντικείμενα τα οποία κινούνται γενικά στο μέρος που «κοιτάει» το SAR την εκάστοτε στιγμή. Για παράδειγμα πλοία παρατηρούνται σε διαφορετική περιοχή από την κορυφή των 'απόνερων' που αφήνουν ή τρένα εμφανίζονται να κινούνται σε διαφορετικά σημεία από τις ράγες. [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Sentinel-1 Mission



3.1 Sentinel-1

3.1 Εισαγωγή για το Sentinel-1

Η αποστολή Sentinel-1 είναι η αποστολή από την οποία θα συλλέξουμε τα δεδομένα τα οποία θα επεξεργαστούμε ώστε να φτάσουμε στις εικόνες που θέλουμε. Ωστόσο θα πρέπει πρώτα να πούμε κάποια βασικά πράγματα για την αποστολή ώστε να την κατανοήσουμε καλύτερα αλλά και να καταλάβουμε το πλαίσιο στο οποίο δούλεψε αλλά και δουλεύει ακόμα ο δορυφόρος.

Καταρχάς η αποστολή Sentinel-1 είναι στο πλαίσιο της γενικής αποστολής European Radar Observatory για να ενισχυθεί με στοιχεία η βάση δεδομένων Copernicus της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission, EC) καθώς και της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (European Space Agency, ESA). Το Copernicus είναι μια ευρωπαϊκή πρωτοβουλία για την ανάπτυξη περισσότερων υπηρεσιών πληροφορίας που έχουν να κάνουν με το περιβάλλον και την προστασία. Βασίζεται σε δεδομένα παρατήρησης που συλλέγονται τόσο από το διάστημα από αποστολές όπως η Sentinel-1 αλλά και από εδαφικές (ground-based) πληροφορίες.

Η Sentinel-1 φέρει πάνω της ένα C-band ραντάρ το οποίο δουλεύει σε 4 διαφορετικά acquisition modes (ή operational modes) με διαφορετικές αναλύσεις (resolutions)

μέχρι και 5m αλλά και διαφορετική κάλυψη (coverage) μέχρι και 400km. Παρέχει διπλή δυνατότητα Πόλωσης (Polarization), πολύ μικρό χρόνο επανεπίσκεψης του ίδιου μέρους καθώς και ιδιαιτέρως γρήγορα αποτελέσματα. Για κάθε παρατήρηση (observation), ακριβείς μετρήσεις της θέσης του διαστημικού λεωφορείου (spacecraft) και της τροχιάς του είναι διαθέσιμες.

Το ραντάρ SAR C-band που διαθέτει έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε μήκη κύματος που μπορούν να παρακάμψουν τα σύννεφα αλλά και την απουσία καλού φωτισμού και μπορεί να συλλέξει δεδομένα όλες τις ώρες της μέρας και με οποιοδήποτε καιρό επικρατεί.

Η αποστολή αποτελείται από 2 δορυφόρους τον Sentinel-1A και τον Sentinel-1B οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο orbital plane.

Η αποστολή δημιουργήθηκε για να δουλεύει προ-προγραμματισμένα (pre-programmed), χωρίς επικάλυψη στα operational modes (conflict-free), να φωτογραφίζει παγκοσμίως τα διάφορα μέρη της γης, ακτογραμμές και ναυτιλιακές διαδρομές (shipping routes) με καλή ανάλυση και να καλύπτει τον παγκόσμιο Ωκεανό με vignettes (βινιέτες: σαν αυτό που λέμε στο σχέδιο σκαρίφημα, σαν ασπρόμαυρη απεικόνιση). Τα παραπάνω, λοιπόν, εξασφαλίζουν την αξιοπιστία των υπηρεσιών που παρέχει ο Sentinel-1 καθώς και το σταθερό, μακροχρόνιο αρχείο δεδομένων για εφαρμογές που βασίζονται σε μακροχρόνιες σειρές. [1]

3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Sentinel-1

Σε αυτή την ενότητα θα καταγράψουμε όλα τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της αποστολής Sentinel-1. Κάποια από αυτά είναι πολύ βασικά, άλλα όχι τόσο οπότε στην παρούσα ενότητα κάνουμε μια ολοκληρωμένη καταγραφή όλων των στοιχείων και ότι χρειάζεται θα αναλυθεί περισσότερο στις επόμενες ενότητες.

Εκτοξεύσεις:

-Ο Sentinel-1A, πύραυλος της οικογένειας πυραύλων Soyuz (ρωσικοί πύραυλοι), εκτοξεύθηκε στις 3 Απριλίου του 2014 από την κοινότητα Κουρου της Γαλλικής Γουιάνας.

- Ο Sentinel-1B και αυτός πύραυλος της οικογένειας πυραύλων Soyuz, εκτοξεύθηκε στις 25 Απριλίου του 2016 και αυτός από την κοινότητα Κουρου της Γαλλικής Γουιάνας.

Τροχιά:

Πολική, ηλιοσύγχρονη (sun-synchronous)

Υψόμετρο:

693km ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Χρόνος Επανεπίσκεψης (Revisit Time)

6 μέρες όταν και οι 2 πύραυλοι (Sentinel-1A και Sentinel-1B) είχαν εκτοξευθεί. Πριν την εκτόξευση του 1B αυτός ο χρόνος ήταν διπλάσιος δηλαδή 12 μέρες.

Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Δορυφόρου:

2.8m μήκος, 2.5m πλάτος, 4m ύψος με ηλιακούς πίνακες διαστάσεων 2x10m και μια αντέννα ραντάρ μήκους 12m.

Μάζα:

2,300kg (συμπεριλαμβανομένου 130kg καυσίμων για όλη την διάρκεια της ζωής του δορυφόρου).

Κεραία :

Οι ακριβείς διαστάσεις της αντέννας είναι 12.3m x 0.821m, το βάρος της είναι 880kg που αποτελεί και το 40% το βάρους στις συνολικής μάζας του δορυφόρου και ο τύπος της αντέννας είναι το slotted waveguide radiators.

Κεντρική Συχνότητα Λειτουργίας:

Ραντάρ SAR C-band με κεντρική συχνότητα λειτουργίας στα 5.405GHz που αυτό αντιστοιχεί σε μήκος κύματος περίπου 5.5465763cm.

Εύρος Ζώνης (Bandwidth):

Το εύρος ζώνης είναι από 0-100MHz και μπορεί να προγραμματιστεί η τιμή του με το μέγιστο να είναι τα 100MHz.

Εύρος Γωνίας Πρόσπτωσης (Incidence Angle Range):

Η περιοχή 'γωνιών πρόσπτωσης' είναι 20°- 46°.

Πλευρά Λήψης (Look Direction):

Δεξιά.

Δέσμη (Beam):

Το εύρος της δέσμης κατά αζιμούθιο (azimuth beam width) είναι 0.23° με ικανότητα περιστροφής κατά αζιμούθιο (azimuth beam steering range) από -0.9° έως 0.9°. Το εύρος ανύψωσης της δέσμης (elevation beam width) είναι 3.43° και η ικανότητα περιστροφής ανύψωσης της δέσμης (elevation beam steering range) είναι από -13.0° μέχρι 12.3°.

Εύρος Παλμού (Pulse Width):

Το εύρος παλμού είναι από 5 - 100μs, με δυνατότητα να μπορεί να προγραμματιστεί.

Συχνότητα Επανάληψης Παλμού (PRF, Pulse Repetition Frequency):

Το PRF είναι από 1 – 3kHz, με δυνατότητα να μπορεί να προγραμματιστεί.

Transmit Duty Cycle:

Το μέγιστο duty cycle είναι 12%. Αλλά επιμερίζοντάς το για καθένα από τα acquisition modes διαφέρει και είναι για το SM 8.5%, για το IW 9%, για το EW 5% και για το WV 0.8%.

Θόρυβος Δέκτη (Receiver Noise):

3dB.

Μέγιστη Ισχύς RF (RF Peak Power):

4.075 kW έως 4.368kW

Μέθοδος Επεξεργασίας Δεδομένων (Data Compression):

Η μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων που ακολουθείται είναι η FDBAQ (Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization).

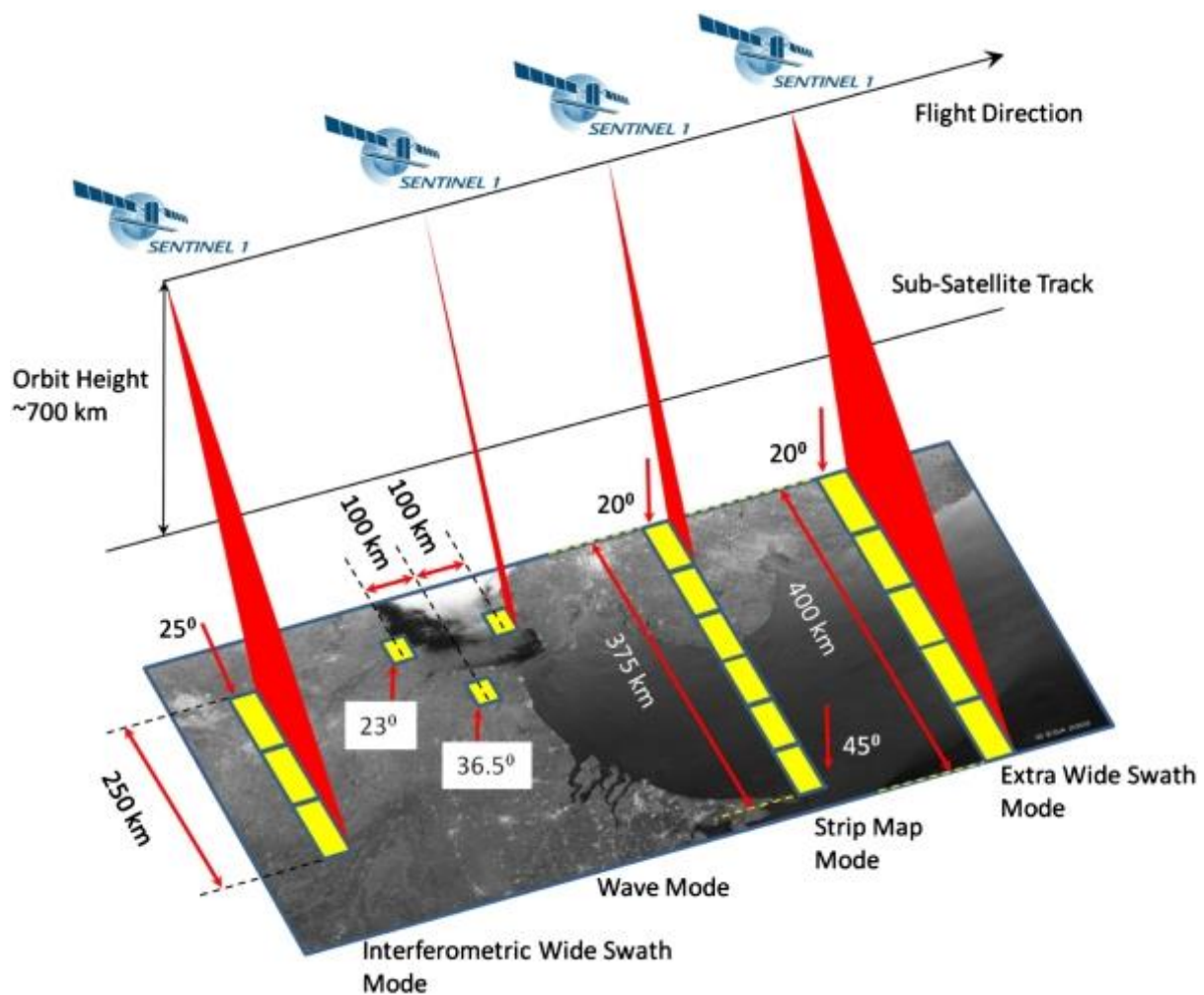
Διάρκεια Ζωής:

Τουλάχιστον 7 χρόνια. Ο Sentinel-1A βρίσκεται ήδη στο διάστημα για 8 χρόνια και είναι έτοιμος να συμπληρώσει τον 9^ο χρόνο ενώ ο Sentinel-1B βρέθηκε για 6 χρόνια στο διάστημα και στις 3 Αυγούστου του 2022 αφού παρουσίασε βλάβη στον αισθητήρα του ραντάρ SAR, η οποία παρά τις προσπάθειες που έγιναν δεν κατέστη εφικτό να διορθωθεί, αφέθηκε να καταστραφεί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη μείωση στις λειτουργίες της αποστολής για αυτό και στο 3^ο τρίμηνο του 2023 είναι προγραμματισμένη η εκτόξευση του Sentinel-1C ώστε να αποκατασταθεί το πρόβλημα που άφησε η απώλεια του Sentinel-1B.

Operational Modes (Acquisition Modes):

- Interferometric wide-swath (IW) με 'swath' στα 250km και με ανάλυση 2x50m, χρησιμοποιώντας TOPSAR.
- Wave Images (WV) με παράθυρο στα 20x20km και με ανάλυση 5x5m (με διαστήματα στα 100km).
- Stripmap (SM) με 'swath' στα 80km και με ανάλυση 5x5m.
- Extra Wide Swath (EW) με 'swath' στα 400km και με ανάλυση 20x40m, χρησιμοποιώντας TOPSAR.

Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε καλύτερα και με έναν πιο εποπτικό τρόπο τα παραπάνω operational modes που συζητάμε και το 'swath' που καλύπτουν. Επίσης βλέπουμε ότι το swath ανά operational mode χωρίζεται σε 'υπο-swath', που ουσιαστικά είναι το μήκος της δέσμης του ραντάρ που ανάλογα το mode έχουμε την υπέρθεση διαφορετικού αριθμού 'υπο-swath' προς την δημιουργία του τελικού 'swath'. Η υπέρθεση των παραπάνω beams δημιουργεί τα 'raw data' μιας εικόνας ανά 'band' πόλωσης όπως θα δούμε και σε παρακάτω παράγραφο.



3.2.1: Acquisition Modes (Πηγή: ESA)

Πόλωση (Polarization):

- Υποστηρίζει είτε απλή πόλωση (HH ή VV) είτε διπλή (HH+HV ή VV+VH).
- Η πόλωση γίνεται διαμέσου μιας αλυσίδας μετάδοσης (η οποία μπορεί να αλλάξει από H σε V) και 2 παράλληλων αλυσίδων λήψης μια για την H και μια για την V πόλωση.
- Τα modes SM, IW και EW είναι διαθέσιμα τόσο για απλή (HH ή VV) όσο και για διπλή πόλωση (HH+HV ή VV+VH), ενώ το WV έχει μόνο απλή πόλωση.

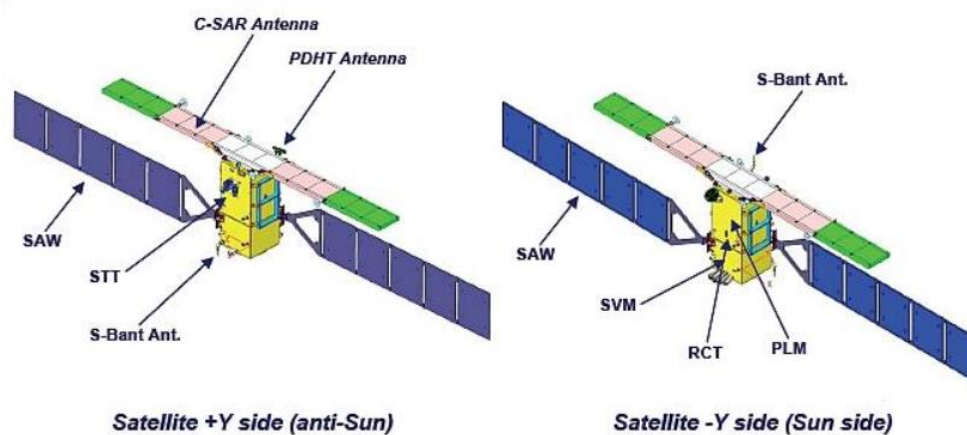
Διάφορα Άλλα Ενδιαφέροντα Στοιχεία για την Αποστολή:

- Οι σταθμοί λήψης για τα δεδομένα SAR είναι: στο Σβάλμπαρντ της Νορβηγίας, στην Ματέρα της Ιταλίας, στο Μασπαλόμας της Ισπανίας και μέσω συνδέσμου laser (laser link) στο EDRS (European Data Relay System)
- Η τηλεμετρία, το tracking και οι εντολές δίνονται από την Κιρούνα της Σουηδίας (βορειότερη πόλη της χώρας).

- Οι βασικές εφαρμογές στις οποίες αποσκοπεί είναι: χαρτογράφηση των πάγων της θάλασσας, των πετρελαιοκηλίδων, του αέρα και των κυμάτων της ναυσιπλοΐας, παραμόρφωση εδάφους αλλά και να ενημερώνει σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπως σεισμοί και πλημμύρες. [1, 3]

3.3 Περιγραφή του Δορυφόρου

Ο δορυφόρος έχει δημιουργηθεί από μια βιομηχανική κοινοπραξία στην οποία ο κύριος κατασκευαστής ήταν η Thales Alenia Space Italy, με την Astrium Germany να είναι υπεύθυνη για την κατασκευή το C-band SAR και για την ενσωμάτωση των κύριων ηλεκτρονικών υποσυστημάτων του ραντάρ, τα οποία αναπτύχθηκαν από την Astrium UK.



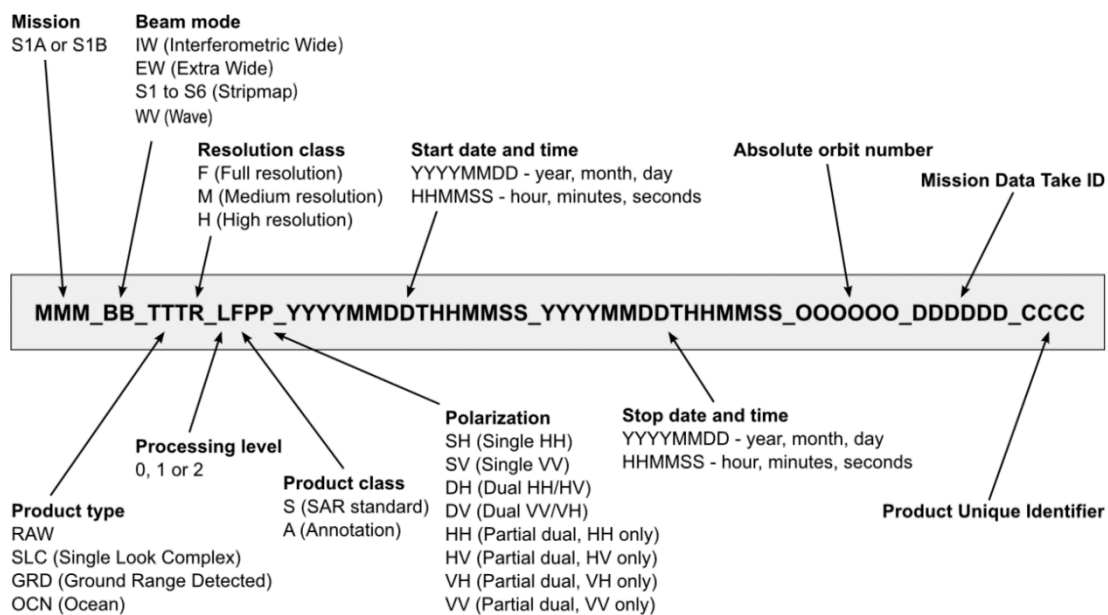
3.3.1: Απεικόνιση Sentinel-1

Το διαστημόπλοιο είναι ένας τριαξονικός, σταθεροποιημένος δορυφόρος που διαθέτει πάνω του ηλιακούς, αστρικούς και μαγνητικού πεδίου αισθητήρες καθώς και γυροσκόπιο. Επιπλέον διαθέτει ένα σετ 4 τροχών αντίδρασης επιφορτισμένοι για τον έλεγχο της τροχιάς και της θέσης (attitude) καθώς και 3 ράβδους ροπής (torque rods) ώστε να χρησιμοποιούνται ως ενεργοποιητές για την παροχή δυνατότητας ελέγχου της κατεύθυνσης (steering capabilities) στον κάθε άξονα. Οι 2 ηλιακοί πίνακες που έχει πάνω του το διαστημόπλοιο είναι στην μορφή «φτερών», όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, και μπορούν να παράγουν ισχύ 5,900W μέχρι το τέλος της ζωής τους τα οποία αποθηκεύονται σε μια αρθρωτή (modular) μπαταρία. Ο δορυφόρος βρίσκεται πάνω στο διαστημικό λεωφορείο PRIMA (Piattaforma Italiana Multi Applicative). Το διαστημικό λεωφορείο παρέχει υψηλής ακρίβειας pointing knowledge (καλύτερη από 0.004°) σε κάθε άξονα, υψηλή pointing accuracy (περίπου 0.01° σε κάθε άξονα) και real-time προσδιορισμό τροχιάς μαζί με ένα ειδικό σύστημα προώθησης (propulsion) για εξαιρετικά ακριβή έλεγχο τροχιάς. Τέλος η πλατφόρμα του δορυφόρου παρέχει λειτουργίες για την διαχείριση της θέσης (attitude), συστήματα ελέγχου τροχιάς, συστήματα διαχείρισης δεδομένων, προώθησης, ισχύος, θερμικού

ελέγχου, αυτονομίας του διαστημοπλοίου, ανιχνευτές λαθών και επιδιορθώσεις καθώς και σύστημα επικοινωνίας με την Γη. [1]

3.4 Ονοματολογία των δεδομένων του Sentinel-1

Το όνομα ενός αρχείου της Sentinel-1 αποστολής καταχωρείται όπως φαίνεται παρακάτω. Αυτό είναι το λεγόμενο naming convention δηλαδή η σύμβαση ονομασίας που γίνεται έτσι ώστε να γίνεται πιο εύκολη η εύρεση ενός συγκεκριμένου αρχείου που θέλουμε. Παρατηρώντας την εικόνα μπορούμε να δούμε ακριβώς ποια είναι η δομή ωστόσο θεωρώ δεν χρειάζεται να εμβαθύνουμε περισσότερο σε αυτό. [1]



3.4.1: Τρόπος Ονομασίας Δεδομένων Sentinel-1

3.5 Διαχωριστική Ικανότητα (Resolutions) ανά Operational Mode

Όλα σχετικά με τις αναλύσεις και το κενό ανάμεσα στα pixel που μπορεί να καταφέρει καθένα από τα 4 operational mode της αποστολής φαίνονται συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα. Ωστόσο, όπως έχουμε πει, εμείς θα αναλύσουμε και θα επιμείνουμε μόνο στο SM και όχι στα άλλα για την παρούσα διπλωματική.

Acq. Mode	Product Type	Resolution Class	Resolution Rng x Azi [m]	Pixel Spacing Rng x Azi [m]	Num Looks Rng x Azi	ENL
SM	SLC	-	1.7x4.3 to 3.6x4.9	1.5x3.6 to 3.1x4.1	1x1	1
	GRD	FR	9x9	3.5x3.5	2x2	3.7
		HR	23x23	10x10	6x6	29.7
		MR	84x84	40x40	22x22	398.4
IW	SLC	-	2.7x22 to 3.5x22	2.3x14.1	1x1	1
	GRD	HR	20x22	10x10	5x1	4.4
		MR	88x87	40x40	22x5	81.8
EW	SLC	-	7.9x43 to 15x43	5.9x19.9	1x1	1
	GRD	HR	50x50	25x25	3x1	2.8
		MR	93x87	40x40	6x2	10.7
WV	SLC	-	2.0x4.8 3.1x4.8	1.7x4.1 2.7x4.1	1x1	1
	GRD	MR	52x51	25x25	13x13	123.7

Πίνακας 3.5.1: Διαχωριστική Ικανότητα (Resolutions) ανά 'Operational Mode'.

*ENL= Equivalent Number of independent looks

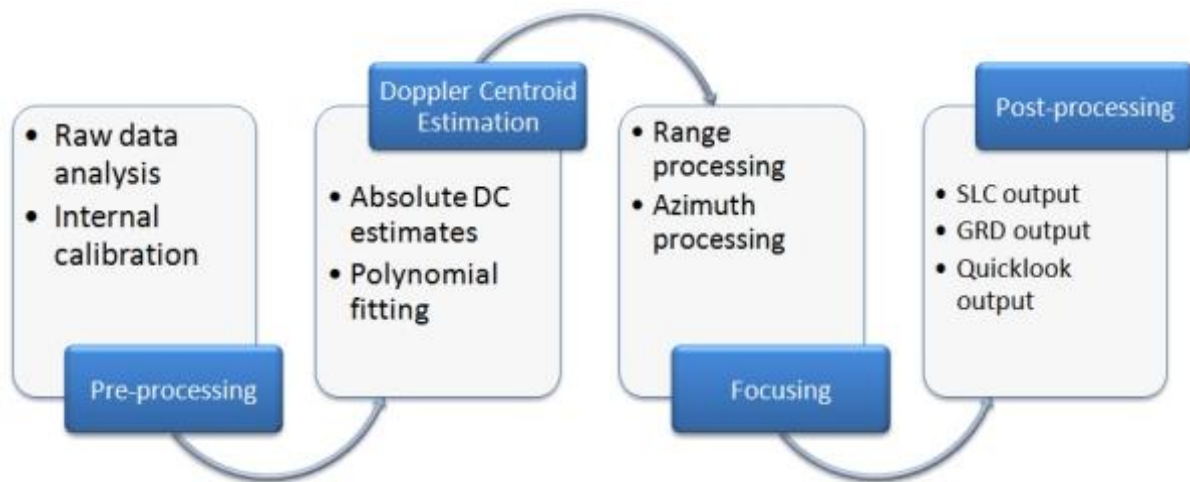
Όπως βλέπουμε για όλα τα Level-1 προϊόντα το κάθε Acquisition Mode δίνει διαφορετική ανάλυση καθώς και διάστημα ανάμεσα στα pixel (υποδηλώνει το πόσο θολή είναι μια εικόνα). Συγκεκριμένα όμως για τα Ground Range Detected (GRD) προϊόντα βλέπουμε ότι διαφέρει και η κλάση ανάλυσης ανάλογα το 'Acquisition Mode', με το SM να είναι το μοναδικό που υποστηρίζει 'Full Resolution' (FM) ενώ αντίστοιχα το WV είναι μπορεί να προσφέρει μόνο 'Medium Resolution' (MR). Τέλος στις SLC εικόνες όπως είναι φυσικό το ENL είναι 1 ενώ στις GRD το ENL ποικίλει ανάλογα την κλάση ανάλυσης με όσο καλύτερη την κλάση τόσο μικρότερο το ENL. [1]

3.6 Δημιουργία SLC Εικόνας από τον Sentinel-1

Ο Sentinel-1 μπορεί να δημιουργήσει SLC εικόνες και από τα 4 acquisition modes που διαθέτει. Εμείς όμως στην εν λόγω διπλωματική μας ενδιαφέρει η δημιουργία SLC εικόνας (Level-1) μόνο από το Stripmap Mode (SM) οπότε και αυτό θα αναλύσουμε παρακάτω. Το SM περιέχει μια image για κάθε band πόλωσης. Κάθε band πόλωσης αποτελείται από 6 δέσμες (beams) του ραντάρ, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι οποίες όμως επικαλύπτονται μεταξύ τους. Κάθε δέσμη καλύπτει χωρικά στην γη ένα Swath 80.1km, όμως λόγω της προαναφερθείσας επικάλυψης το συνολικό Swath που καλύπτεται είναι 375km. Το κενό ανάμεσα στα pixel καθορίζεται,

στην αζιμουθιακή διεύθυνση, από το Pulse Repetition Frequency (PRF) ενώ στην 'range' διεύθυνση, από την συχνότητα κατά range δειγματοληψίας του ραντάρ.

Όπως έχουμε πει αρκετές φορές η δημιουργία της SLC εικόνας παρά που επιδέχεται και μεγαλύτερης επεξεργασίας, είναι από μόνη της μια πολύ δύσκολη διαδικασία που αναλύσαμε ενδελεχώς στο Κεφάλαιο 2 της εν λόγω διπλωματικής. Ωστόσο στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε τον τρόπο που το Sentinel-1 δημιουργεί την εικόνα όταν κάνει την επεξεργασία αυτό.



3.6.1: Βήματα Επεξεργασίας των Raw Data προς την SLC Εικόνα (πηγή: ESA)

Οι βασικές διαδικασίες που βλέπουμε στα μπλε κουτάκια (δηλαδή: pre-processing, Doppler centroid estimation, focusing και post-processing) τις έχουμε ήδη αναφέρει στο Κεφάλαιο 2 και στην ανάλυση της πορείας των 'raw data' προς την SLC εικόνα, ή αλλιώς των Level-0 προϊόντων προς τα Level-1 όμως στο παραπάνω σχήμα ουσιαστικά βλέπουμε και τις ενδιάμεσες διαδικασίες καθεμιάς εκ των κύριων. Φυσικά και για τις σημαντικότερες ενδιάμεσες διαδικασίες έχουμε μιλήσει στο Κεφάλαιο 2 και στην ανάλυση και επεξεργασία των 'raw data'. Τέλος να τονίσουμε ξανά ότι η διαδικασία του GRD output που βλέπουμε στο διάγραμμα γίνεται αφού δημιουργηθεί η SLC και υπερθέσουμε 2 οι περισσότερες από αυτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν εκτενώς πολλές διαδικασίες που γίνονται σε ένα ραντάρ SAR ώστε να σχηματίσει την εικόνα SAR από τα απλά δεδομένα που συλλέγονται. Όπως είδαμε, η διαδικασία επεξεργασίας των 'raw data' αποτελείται από πολλά και εξαιρετικά απαιτητικά βήματα τα οποία με την σειρά τους μπορούν να αναλυθούν σε περαιτέρω διαδικασίες. Υπάρχουν πάρα πολλοί παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και να αξιολογήσουμε ώστε τελικώς η εικόνα που θα δημιουργηθεί να είναι ποιοτική τόσο σε ανάλυση (resolution) όσο και σε πληροφορία. Από την άλλη ακόμα και η γεωμετρία ενός ραντάρ SAR που παρουσιάστηκε, είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Μάλιστα στην πραγματικότητα τα πράγματα γίνονται ακόμα πιο περίπλοκα αν συνυπολογίσουμε την καμπυλότητα της γης, το ανάγλυφο του εδάφους, την πορεία του αεροπλάνου που δεν είναι απόλυτα ευθύγραμμη καθώς και τους πολλούς άλλους παράγοντες που εξετάσαμε στα παραπάνω κεφάλαια.

Επιπλέον αναλύθηκαν αρκετά οι διάφορες μορφές παραμορφώσεων που μπορεί να υπάρξουν μετά την δημιουργία της εικόνας (foreshortening, layover, shadowing, slant range scale distortion, speckles) καθώς επίσης και το πώς αυτές στην συνέχεια με την κατάλληλη επεξεργασία διορθώνονται.

Ειδική αναφορά έγινε στις εικόνες SAR που απεικονίζουν την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτές οι εικόνες είναι αρκετά διαφορετικές από τις χερσαίες εικόνες SAR μιας και η θάλασσα παρουσιάζει διαφορετική σύσταση και ανάγλυφο από την στεριά. Όπως είδαμε και από την κατηγοριοποίηση των προϊόντων ενός ραντάρ SAR οι level-2 εικόνες αφορούν σχεδόν αποκλειστικά τις θάλασσες και τους ωκεανούς και χρειάζονται ακόμα ένα βήμα επεξεργασίας από τις απλές SLC Images (level-1).

Μέσα από την λεπτομερή αναφορά που έγινε στο πώς λειτουργεί ένα κοινό ραντάρ SAR είδαμε τον τρόπο που αυτό ουσιαστικά δημιουργεί ακόμα και τα 'raw data' μέσω πολλών διαδικασιών από παλμούς οπισθοσκέδασης μετά την διάδοση του σήματος σε μορφή δέσμης (beam) στην γη. Σε αυτό το πλαίσιο εξετάστηκαν εκτενώς και οι διάφορες γωνίες που μπορούν να απαντηθούν σε μια γεωμετρία SAR και έγινε μια πλήρη διασαφήνιση του πότε πρέπει να χρησιμοποιούμε την εκάστοτε γωνία στους υπολογισμούς χωρίς να τις συγχέουμε και γιατί όλες αυτές οι διαφορετικές γωνίες, παρά τις σχέσεις που τις διέπουν, είναι σημαντικές καθεμιά ξεχωριστά σε διαφορετικές διαδικασίες επεξεργασίας.

Τέλος δόθηκε αρκετή βάση στην αποστολή της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (ESA) Sentinel-1 η οποία ταξίδευσε και ταξιδεύει ακόμα και σήμερα, σε διαφορετική μορφή από το παρελθόν και μας δίνει πραγματικά δορυφορικά δεδομένα προς επεξεργασία και δημιουργία SLC εικόνας αλλά και παραπάνω επιπέδων από την SLC επεξεργασία. Αναλύθηκε εκτενώς ο δορυφόρος με όλες τις κατασκευαστικές του λεπτομέρειες και όλους τους διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας με τους οποίους μπορεί να συλλέξει δεδομένα και να εφοδιάσει την βάση δεδομένων Copernicus, από την οποία εμείς ως μελετητές με την σειρά μας μπορούμε να τα αντλήσουμε και να τα

θέσουμε προς επεξεργασία για την δημιουργία μιας εικόνας SAR που απεικονίζει συγκεκριμένη περιοχή ανά τον κόσμο που θέλουμε να απεικονίσουμε.

Εν κατακλείδι, η επιστήμη των ραντάρ είναι χαοτική και στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε εμβάθυνση μόνο στην λειτουργία των ραντάρ SAR προς την δημιουργία εικόνας και απεικόνισης της γήινης επιφάνειας. Όμως φάνηκε ότι ακόμα και για μόνο μια λειτουργία του ραντάρ SAR τα βήματα και οι διαδικασίες που ακολουθούνται είναι δαιδαλώδεις κάτι που καθιστά την επιστήμη των ραντάρ εξαιρετικά δύσκολη. Ωστόσο η ενασχόληση με αυτό τον τομέα της επιστήμης των ραντάρ είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσα και σίγουρο ότι στο άμεσο μέλλον θα γνωρίσει ακόμα μεγαλύτερη ανάπτυξη που θα βοηθήσει και αυτή την τεχνολογία και την επιστήμη γενικά να προχωρήσουν περισσότερο.

Λεξιλόγιο

A

acquisition modes: μέθοδοι απόκτησης δεδομένων

airborne: αερομεταφερόμενο

along track: κατά μήκος του φορέα

ambiguities: αμφισημίες

ambiguity conditions: συνθήκες αμφισημίας

ambiguous: ασαφής

annotation: σχόλιο

antenna: αντέννα

antenna footprint: επιφάνεια φωτισμού

attitude: θέση

auto-focusing: αυτόματη εστίαση

azimuth: αζιμούθιο

azimuth beam steering range: εύρος καθοδήγησης δέσμης κατά αζιμούθιο

azimuth beamwidth: εύρος δέσμης κατά αζιμούθιο

azimuth bi-static delay: διστατική καθυστέρηση κατά αζιμούθιο

azimuth compression: συμπίεση κατά αζιμούθιο

azimuth direction: κατεύθυνση αζιμουθίου

B

backscattered signals: σήματα οπισθοσκέδασης

backscattering: οπισθοσκέδαση

bandwidth: εύρος ζώνης

beam: δέσμη

beamwidth: εύρος δέσμης

burst: ριπή

C

calibration: βαθμονόμηση

compression: συμπίεση

coherent summation: συνεκτική άθροιση

collection pattern: μοτίβο συλλογής

conflict-free: χωρίς επικάλυψη

converters: μετατροπείς

coverage: κάλυψη

cross range direction: κατεύθυνση κάθετη στην *range* (αζιμουθιακή)

cross range resolution: διαχωριστική ικανότητα κατά *cross range* (αζιμούθιο)

D

data interlace: μείξη δεδομένων

data rate: ρυθμός συλλογής δεδομένων

delay: καθυστέρηση

depression angle: γωνία κατάπτωσης

differential range: διαφορά μεταξύ R_f και R_n

diffraction-limited beam: δέσμη ορίου περίθλασης

Doppler centroid estimation: υπολογισμός κεντροειδούς Doppler

double bounce: διπλή αναπήδηση

downlink: σύνδεσμος δορυφόρου εδάφους

dynamic range: αριθμός χρήσιμων επιπέδων ενός σήματος

dwel time: χρόνος διανύσματος συνθετικού μήκους

E

Earth Observation: Παρατήρηση της γης

echo: ηχώ

effective: ουσιαστικό

elevation antenna pattern: μοτίβο ανύψωσης κεραίας

elevation beam steering range: εύρος καθοδήγησης δέσμης ανύψωσης

elevation beam width: εύρος δέσμης ανύψωσης

ellipsoid model: ελλειψοειδές μοντέλο

European Commission: Ευρωπαϊκή Επιτροπή

European Space Agency: Ευρωπαϊκή Διαστημική Μονάδα

F

fast coherence decay: γρήγορη αποσύνθεση συνοχής

feature identification: αναγνώριση αντικειμένων

frequency: συχνότητα

frequency bands: ζώνες συχνότητας

focal plane: εστιακό επίπεδο

fully polarized: ολικά πολωμένο

G

geo-located: γεω-τοποθετημένα

geo-referenced: που αντιστοιχούν στην γη

grazing angle: γωνία πρόσπτωσης

ground based: βασισμένο στο έδαφος

ground range: εδαφική απόσταση

H

horizontal: οριζόντιο

I

illustration: απεικόνιση

image distortion: παραμόρφωση εικόνας

image frame: πλαίσιο εικόνας

imaging radar: ραντάρ απεικόνισης

imaging sensor: αισθητήρας παραγωγής εικόνας

incidence angle: γωνία πρόσπτωσης

integration time: χρόνος διανύσματος συνθετικού μήκους

input: είσοδος

Inverse Synthetic Aperture Radar: Αντίστροφο Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης

Interferometry: Συμβολομετρία

J

K

L

line of sight: άλλη λέξη για το slant range

Linear Frequency Modulation: Γραμμική Διαμόρφωση Συχνότητας

look: θέαση

look angle: γωνία θέασης

low pass filter: φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων

low-flying aircraft: αεροσκάφος χαμηλής τροχιάς

M

military usage: στρατιωτική χρήση

modular: αρθρωτός

N

near infrared: κοντά στο υπέρυθρο

noise: θόρυβος

O

observation: παρατήρηση

ocean: ωκεανός

operational modes: τρόποι λειτουργίας

orbit: τροχιά

orbital plane: τροχιακό επίπεδο

P

phase shifting: μεταβολή φάσης

pixel: εικονοστοιχείο

pointing accuracy: ακρίβεια θέσης στόχου

pointing knowledge: γνώση θέσης στόχου

Polarization: Πόλωση

post-processing: μετά την επεξεργασία

pre-programmed: προ-προγραμματισμένο

products: προϊόντα

propulsion: προώθηση

Pulse Repetition Interval: Διάστημα Επανάληψης Παλμών

Pulse Repetition Frequency: Συχνότητα Επανάληψης Παλμών

pulse width: εύρος παλμού

Q

quantisation rate: ρυθμός κβαντισμού

R

range: κατεύθυνση κάθετη στην κίνηση του φορέα (χρησιμοποιείται διεθνώς *range*)

range compression: συμπίεση κατά *range*

range direction: κατεύθυνση *range*

range resolution: διαχωριστική ικανότητα κατά *range*

range spreading loss: απώλειες κατά *range*

range-to-target: άλλη λέξη για το *slant range*

raw data: ακατέργαστα δεδομένα (μη επεξεργασμένα)

real time: πραγματικός χρόνος

Real Aperture Radar: Radar Πραγματικής Απεικόνισης

receiver noise: θόρυβος δέκτη

recorder: μηχανήμα εγγραφής

relief displacement: μετατοπίσεις αναγλύφου

remote sensing: τηλεπισκόπηση
resolution: ανάλυση
resolution element: στοιχείο ανάλυσης
revisit time: χρόνος επανεπίσκεψης
rough surface: τραχεία επιφάνεια

S

sampling rate: ρυθμός δειγματοληψίας
SAR image: εικόνα SAR
satellite to ground link: σύνδεσμος δορυφόρου εδάφους
scanners: σαρωτές
scatterer: σκεδαστής
scattering: σκέδαση
shipping routes: ναυτιλιακές διαδρομές
short-wave infrared: ανάμεσα από μικροκύματα και υπέρυθρο
single look: απλή θέαση
single look complex focusing: εστίαση της SLC εικόνας
slant range: η απόσταση του ραντάρ από τον στόχο (χρησιμοποιείται διεθνώς *slant range*)
slant range scale distortion: παραμόρφωση κλίμακας *slant range*
slope down: μείωση στιγμιαίας συχνότητας (στην διαμόρφωση LFM)
slope up: αύξηση στιγμιαίας συχνότητας (στην διαμόρφωση LFM)
spaceborne: που βρίσκεται στο Διάστημα
spacecraft: διαστημόπλοιο
spatial resolution: χωρική ανάλυση
speckle: 'κηλίδα'
squint angle: 'γωνία στραβισμού'
standard: βασικό
steering capabilities: δυνατότητες καθοδήγησης
Stepped Frequency: Βηματική Συχνότητα

stretch processing: διαδικασία μείωσης του *data rate* (άλλη ονομασία του *time expansion buffering*)

summing: άθροιση

sun-synchronous: ηλιο-σύγχρονη

swath: 'ταινία απεικόνισης'

swath width time: ο λόγος του *differential range* προς την ταχύτητα του φωτός

synoptic variability: συνοπτική μεταβλητότητα

Synthetic Aperture Radar: Ραντάρ Συνθετικής Απεικόνισης

Synthetic Length: Συνθετικό Μήκος

T

target zone: ζώνη στόχου

temporal interlacing: χρονική μείξη (π.χ. δεδομένων)

time domain: πεδίο του χρόνου

time expansion buffering: διαδικασία μείωσης του *data rate* (άλλη ονομασία του *stretch processing*)

torque rods: ράβδοι ροπής

tracking: παρακολούθηση

trade-off: αντάλλαγμα

U

unambiguous: χωρίς αμφισημία

uncompressed: μη συμπιεσμένο

V

vertical: κάθετος

velocity bunching: συσσώρευση ταχύτητας

vignette: βινιέτα, σκαρίφημα

volume: όγκος

W

wavefronts: τα σημεία ενός κύματος που έχουν την ίδια φάση

weighting: διαδικασία ενσωμάτωσης μαθηματικού 'βάρους' σε στοιχεία

X

Y

yaw steering: διόρθωση κατά τον άξονα yaw

Z

Βιβλιογραφία

1. ESA, 'Sentinel Online', <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>
2. Σ. Πίντζος και Π. Φράγκος, 'Συστήματα Ραντάρ' (Διδακτικό Σύγγραμμα), Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Αθήνα, Ιούνιος 2022 (520 σελίδες).
3. 'Alaska Satellite Facility', <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/sentinel-1/>
4. S. W. McCandless Jr., C. R. Jackson, 'Principles of Synthetic Aperture Radar', NOASAR Manual, Chapter 1, pp. 1 – 24.
5. Descanso, 'Synthetic Aperture Radar (SAR) Imaging Basics', Chapter 1, JPL, NASA, 2010.
6. Earth Data, <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>
7. <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/microwave-remote-sensing/radar-image-distortions/9325> (ιστοσελίδα της Κυβέρνησης του Καναδά).