



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑΣ

**Μέτρηση μεγεθών φωτεινής πάλμωσης και στροβοσκοπικού
φαινομένου φωτεινών πηγών με την χρήση ψηφιακών οπτικών
αισθητήρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ηλία Πουντουκίδης

Επιβλέπων : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑΣ

**Μέτρηση μεγεθών φωτεινής πάλμωσης και στροβοσκοπικού
φαινομένου φωτεινών πηγών με την χρήση ψηφιακών οπτικών
αισθητήρων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ηλία Πουντουκίδης

Επιβλέπων : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Ιουλίου 2023

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Παύλος Σ. Γεωργιλάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2023

.....
ΠΟΥΝΤΟΥΚΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

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

Copyright © ΠΟΥΝΤΟΥΚΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, 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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο φωτισμός με σύγχρονες τεχνολογίες, όπως τα LED, συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του φωτισμού. Ωστόσο, οι λαμπτήρες LED μπορούν να παρουσιάσουν διακυμάνσεις στην παραγωγή φωτός, γνωστές ως χρονική διαμόρφωση φωτός (TLM), οι οποίες θα μπορούσαν, πάνω από ορισμένα όρια και υπό ορισμένες συνθήκες, να επηρεάσουν την υγεία, την ευημερία και την ασφάλεια των ανθρώπων. Ο νέος κανονισμός «EU Ecodesign 2019/2020 Single Lighting Regulation» της ΕΕ για τον οικολογικό σχεδιασμό 2019/2020 θέτει περιορισμούς για την χρονική διαμόρφωση φωτός. Ο γενικός στόχος του παρόντος έργου είναι η δημιουργία της υποδομής μετρολογίας για τη μέτρηση της χρονική διαμόρφωση φωτός στον φωτισμό LED και των οπτικών αποτελεσμάτων που προκαλούνται από αυτή, γνωστά ως “Temporal Light Artifacts” (TLA). Για τον σκοπό αυτό, έχει ιδρυθεί το ευρωπαϊκό πρόγραμμα “Metrology for Temporal Light Modulation –MetTLM”, που έχει ως στόχο την περαιτέρω μελέτη των φαινομένων TLM και TLA, όπου κύριος μέτοχος είναι ο Παγκόσμιος Οργανισμός Φωτισμού – CIE. Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, λαμβάνει μέρος στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα μέσω του ερευνητικού του Ινστιτούτου ΕΠΙΣΕΥ (ICCS). Μέρος στο πρόγραμμα, λαμβάνει και το Ινστιτούτου Μετρολογίας και Φυσικής της Γερμανίας – PTB, το οποίο ο συγγραφέας έχει επισκεφτεί για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Οι πραγματικές σκηνές και τα περιβάλλοντα ζωής, όπως τα γραφεία και οι σήραγγες, συχνά φωτίζονται με συνδυασμό πολλαπλών πηγών φωτός και το φως της ημέρας, παρουσιάζοντας ένα αποτελεσματικό μοτίβο φωτεινότητας υψηλής αντίθεσης και ανομοιογενή κατανομή των παραμέτρων TLM. Η χαρτογράφηση του TLM ενός τέτοιου περιβάλλοντος θα απαιτούσε πολλαπλές μετρήσεις με μια συσκευή μέτρησης TLM ενός σημείου. Τέτοιες διαδικασίες μέτρησης είναι αναποτελεσματικές και δεν παρέχουν πλήρη αξιολόγηση όσον αφορά την αντίληψη της TLM.

Οι αισθητήρες CMOS είναι αναπόσπαστο κομμάτι των σύγχρονων καμερών. Αποτελούν την δημοφιλέστερη μορφή τεχνολογίας για αισθητήρες κάμερας. Σκοπός της πτυχιακής είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων των αισθητήρων CMOS, για την καταμέτρηση των φαινομένων TLM και TLA.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Χρονική Διαμόρφωση Φωτός (TLM), Temporal Light Artifacts (TLA), Παγκόσμιος Οργανισμός Φωτισμού (CIE), Ινστιτούτου Μετρολογίας και Φυσικής της Γερμανίας (PTB), Συμπληρωματικός ημιαγωγός οξειδίου μετάλλου (CMOS), Φωτοδίοδος (LED), ΕΠΙΣΕΥ, Ecodesign, Metrology for Temporal Light Modulation (MetTLM), Μετρολογία

ABSTRACT

Lighting with modern technologies, such as LEDs, helps to save energy and reduce the environmental impact of lighting. However, LED lamps can exhibit fluctuations in light output, known as Temporal Light Modulation (TLM), which could, above certain thresholds and under certain conditions, affect the health, welfare and safety of people. The new “EU Ecodesign 2019/2020 Single Lighting Regulation” sets restrictions on light modulation. The overall objective of this project is to establish the metrology infrastructure to measure temporal light modulation in LED lighting and the visual effects caused by it, known as Temporal Light Artifacts (TLA).

Real-life scenes and environments, such as offices and tunnels, are often illuminated with a combination of multiple light sources and daylight, presenting an effective high-contrast luminance pattern and inhomogeneous distribution of TLM parameters. Mapping the TLM of such an environment would require multiple measurements with a single-point TLM measurement device. Such measurement procedures are inefficient and do not provide a complete assessment in terms of TLM perception. For this purpose, the European project "Metrology for Temporal Light Modulation -MetTLM" has been established, which aims to further study the TLM and TLA phenomena, with chief stakeholder being the International Commission on Illumination – CIE. The National Technical University of Athens is part of this project through its research institute ICCS. For the purpose of this work, the author has visited the National Metrology Institute of the Federal Republic of Germany – PTB, as part of their collaboration for the project.

CMOS sensors are an integral part of modern cameras. They are the most popular form of technology for camera sensors. The purpose of this thesis is to investigate the capabilities of CMOS sensors in the measurement of TLM and TLA phenomena.

KEYWORDS

Temporal Light Modulation (TLM), Temporal Light Artifacts (TLA), International Commission on Illumination (CIE), National Metrology Institute of the Federal Republic of Germany (PTB), Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS), Light-Emitting Diode (LED), ICCS, Ecodesign, Metrology for Temporal Light Modulation (MetTLM), Metrology

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Φωτοτεχνίας και του Ερευνητικού Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μέτρηση μεγεθών φωτεινής πάλμωσης και στροβοσκοπικού φαινομένου λαμπτήρων με την χρήση πολύχρωμων αισθητήρων.

Υπεύθυνος για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Φραγκίσκος Τοπαλής, στον οποίο θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για την αμέριστη υποστήριξή του και την ανεκτίμητη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια αυτής της έρευνας. Οι τεράστιες γνώσεις και η τεχνογνωσία του στον τομέα του φωτισμού αποτέλεσαν έμπνευση για μένα. Η συνεχής ενθάρρυνση, η εποικοδομητική κριτική του και η οξυδερκής ανατροφοδότηση του συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση των ιδεών μου και στη βελτίωση της έρευνάς μου. Παράλληλα, θέλω να ευχαριστήσω τον διδάκτορα ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση, για την ανεκτίμητη τεχνογνωσία του και τις συνδέσεις που μου παρείχε γενναϊόδωρα, οι οποίες έχουν βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα αυτής της έρευνας. Επιπλέον, δίνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ κ. Ευάγγελο Μαδιά, για την συμβολή και βοήθεια του κατά την διάρκεια των εργασιών στο εργαστήριο, που ήταν αναπόσπαστο μέρος για την επιτυχία της έρευνας. Επίσης, ευχαριστίες δίνω στην ομάδα του Ινστιτούτου Μετρολογίας και Φυσικής της Γερμανίας, για την φιλοξενία και συνεργασία τους κατά την μετακίνηση μου.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους στενούς μου φίλους, Ματθαίο, Μαρία και Αλέξανδρο, που βρίσκονταν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα. Τέλος, σημαντική στήριξη καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου, έλαβα από την οικογένεια μου, στην οποία αφιερώνω την διπλωματική αυτή.

Αθήνα, Ιούλιος 2023

Πουντουκίδης Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	5
ABSTRACT	7
KEYWORDS	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ – ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	15
1.2 ΦΑΣΕΙΣ	15
1.3 ΔΟΜΗ.....	16
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	19
2.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΦΩΤΟΣ - TLM	19
2.2 TEMPORAL LIGHT ARTIFACTS (ΠΡΟΣΩΡΙΝΑ ΦΩΤΕΙΝΑ ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΑ)	19
2.2.1 Φωτεινή πάλμωση - Flicker	19
2.2.2 Στροβοσκοπικό φαινόμενο – Stroboscopic Effect.....	20
2.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ «ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΦΩΤΟΣ» ΚΑΙ ΤΩΝ «ΠΡΟΣΩΡΙΝΩΝ ΦΩΤΕΙΝΩΝ ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΩΝ».....	21
2.3.1 Βάθος διαμόρφωσης – Modulation Depth	21
2.3.2 Δείκτης Φωτεινής πάλμωσης – Flicker Index	22
2.3.3 Ποσοστό Φωτεινής πάλμωσης – Percent Flicker	23
2.3.4 Βραχυπρόθεσμος δείκτης σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης - Short-term flicker severity index - PstLM	23
2.3.5 Μέτρηση στροβοσκοπικού φαινομένου – Stroboscopic Visibility Measure - SVM.....	24
2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΟΒΑΡΟΤΗΤΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΠΑΛΜΩΣΗΣ PstLM.....	25
2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ SVM.....	31
2.6 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ CMOS	36
2.7 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ – ΘΕΩΡΗΜΑ NYQUIST-SHANNON... 37	
2.7.1 Aliasing	37
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	41
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	41
3.1 ΕΡΓΑΛΕΙΟΘΗΚΕΣ MATLAB	42
3.1.1 Εργαλειοθήκη για καταμέτρηση PstLM - Light flicker assessment toolbox 42	
3.1.2 Εργαλειοθήκη καταμέτρησης SVM - Stroboscopic effect visibility measure toolbox	42

3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΜΠ	43
3.2.1 Εξοπλισμός.....	43
3.2.2 Μετρήσεις – Διατάξεις.....	47
3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΡΤΒ	49
3.3.1 Εξοπλισμός.....	49
3.3.2 Μετρήσεις – Διατάξεις.....	53
4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	65
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	65
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΜΠ	65
4.1.1 Αποτελέσματα πρώτου συνόλου.....	65
4.1.2 Αποτελέσματα δεύτερου συνόλου.....	70
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΡΤΒ	75
4.2.1 Αποτελέσματα πρώτου συνόλου.....	75
4.2.2 Αποτελέσματα δεύτερου συνόλου.....	83
4.2.3 Αποτελέσματα τρίτου συνόλου.....	89
4.2.4 Αποτελέσματα τετάρτου συνόλου.....	93
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ	109
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
5.1.1 Διερεύνηση σκηής.....	109
5.1.2 Διερεύνηση φωτιστικού.....	109
5.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ	110
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ – ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Το έργο της παρούσας διπλωματικής αποτελεί μέρος των δραστηριοτήτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Ερευνητικού Πανεπιστημιακού Ινστιτούτου Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών, όσον αφορά τη συμμετοχή τους στο ευρωπαϊκό έργο "Metrology for Temporal Light Modulation 20NRM01-MetTLM". Αποτελεί μέρος του προγράμματος "European Metrology Programme for Innovation and Research - EMPIR".

Ο γενικός στόχος αυτού του έργου είναι να δημιουργηθεί η υποδομή μετρολογίας για τη μέτρηση της φωτεινής πάλμωσης – Temporal Light Modulation TLM που προκαλείται από φωτεινές πηγές (κυρίως πηγών LED) και των οπτικών αποτελεσμάτων που προκαλούνται από την TLM, γνωστά ως προσωρινά φωτεινά τεχνουργήματα (TLA). Το έργο αυτό θα αναπτύξει και θα επικυρώσει μεθόδους μέτρησης για την ποσοτική μέτρηση των TLA, όπως την φωτεινή πάλμωση και το στροβοσκοπικό φαινόμενο, και θα προωθήσει την ανάπτυξη μιας μετρικής για το φαινόμενο phantom array effect.

Τα αποτελέσματα του έργου θα στηρίζουν την ανάπτυξη της τυποποίησης σχετικά με το TLM και θα παράσχουν στη βιομηχανία φωτισμού, στους κατασκευαστές οργάνων και στις αρχές εποπτείας της αγοράς αδιαμφισβήτητα αποτελέσματα των μετρήσεών τους για το TLM. Κανονισμοί και περιορισμοί για τα TLM και TLA, έχουν τεθεί σε ισχύ με τον κανονισμό «EU Ecodesign 2019/2020 Single Lighting Regulation».

1.2 ΦΑΣΕΙΣ

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε κατά το διάστημα μεταξύ Μαρτίου 2022 και Μάϊου 2023. Για την ολοκλήρωσή της ακολουθήθηκε η πορεία που παρουσιάζεται στη συνέχεια και συνίσταται από 3 φάσεις.

1η φάση

Ο σκοπός της πρώτης φάσης, ήταν να επικυρωθεί η δυνατότητα καταγραφής της πληροφορίας συμπεριφοράς των φωτιστικών σωμάτων χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα CMOS στο Εργαστήριο Φωτισμού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

2η φάση

Η δεύτερη φάση αποτελείται από κοινές μετρήσεις στο Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Μετρολογίας της Γερμανίας (Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB), στην ομάδα εργασίας 4.12. Το PTB αποτελεί συνεταιίρος στο MetTLM. Η μετακίνηση πραγματοποιήθηκε μεταξύ Νοεμβρίου 2022 και Δεκεμβρίου 2022. Για την μετακίνηση αξιοποιήθηκε το πρόγραμμα «ERASMUS - Βραχυχρόνια Κινητικότητα για Σπουδές και Πρακτική Άσκηση».

3η φάση

Η τρίτη φάση αποτελεί μετρήσεις με την χρήση φωτοδίοδου-παλμογράφου και του αισθητήρα CMOS, του Εργαστηρίου Φωτοτεχνίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους

1.3 ΔΟΜΗ

Κεφάλαιο 1

Πρόκειται για το παρόν κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζεται συνοπτικά το αντικείμενο και ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας, οι φάσεις εκπόνησής της και η δομή της.

Κεφάλαιο 2

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι εισαγωγικές έννοιες της χρονικής διαμόρφωσης του φωτός, των προσωρινών φωτεινών τεχνουργημάτων και των υπόλοιπων αναγκαίων εννοιών. Επιπλέον περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού των διαφόρων μεγεθών.

Κεφάλαιο 3

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διάφορες πειραματικές διατάξεις που υλοποιήθηκαν καθώς και οι μετρήσεις που λήφθηκαν μαζί τους. Περιγράφει μετρήσεις στο Εργαστήριο Φωτοτεχνίας του ΕΜΠ καθώς και στο PTB Γερμανίας.

Κεφάλαιο 4

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης, γίνονται σχολιασμοί των εκάστοτε μετρήσεων.

Κεφάλαιο 5

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής αυτής αρχίζει με τη παρουσίαση των κύριων ευρημάτων της έρευνας, τονίζοντας τις βασικές γνώσεις που αποκτήθηκαν και τους περιορισμούς που παρουσιάστηκαν. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με πιθανές προοπτικές διεύρυνσης της έρευνας που πραγματοποιήθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΦΩΤΟΣ - TLM

Ως χρονική διαμόρφωση του φωτός, «Temporal Light Modulation – TLM», ορίζεται η μεταβολή των φωτεινών μεγεθών ή της φασματικής απόκρισης μιας φωτεινής πηγής, σε σχέση με τον χρόνο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκληθεί από μια πληθώρα αιτιών, όπως μεταβολές στην είσοδο της φωτεινής πηγής, σκόπιμη και επιθυμητή, ή ακούσια και ανεπιθύμητη. Κάποια επιθυμητά παραδείγματα από την καθημερινότητα είναι οι οδικές ενδείξεις προσοχής, καθώς και τα φλάς των αυτοκινήτων. Παραδείγματα ακούσιας διαμόρφωσης φωτός είναι οι διαταραχές στην φωτεινή έξοδο ενός φωτιστικού, αποτέλεσμα κακού σχεδιασμού του φωτιστικού ή διαταραχής στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ανεπιθύμητες μεταβολές στα φωτεινά μεγέθη και την φασματική απόκριση μιας φωτεινής πηγής, μπορούν να έχουν επιβλαβής και ανεπιθύμητες συνέπειες στην όραση, την υγεία και την ασφάλεια. Το σύνολο των φαινομένων αυτών που είναι αντιληπτά στην ανθρώπινη όραση, έχουν ονομασθεί ως προσωρινά φωτεινά τεχνουργήματα, ή αλλιώς ως «Temporal Light Artefacts – TLA»

2.2 TEMPORAL LIGHT ARTIFACTS (ΠΡΟΣΩΡΙΝΑ ΦΩΤΕΙΝΑ ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΑ)

Το σύνολο των ανεπιθύμητων φαινομένων που προκαλούνται από τις μεταβολές στα φωτεινά μεγέθη και την φασματική απόκριση μιας φωτεινής πηγής, έχουν ονομασθεί ως Temporal Light Artifacts - TLA. Είναι γνωστό ότι έχουν πλήθος επιζήμιων επιπτώσεων στην υγεία, την άνεση και την ασφάλεια του ανθρώπου. Η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού - CIE έχει ορίσει τρία μεγέθη για τα φαινόμενα αυτά:

- την φωτεινή πάλμωση - Flickering,
- το στροβοσκοπικό φαινόμενο – Stroboscopic Effect
- Fantom Array Effect.

Τα τρία αυτά μεγέθη, βρίσκονται στο επίκεντρο της έρευνας στον τομέα του φωτισμού.

2.2.1 Φωτεινή πάλμωση - Flicker

Σύμφωνα με την CIE, ως φωτεινή πάλμωση ορίζεται η αντίληψη της οπτικής αστάθειας που προκαλείται από ένα φωτεινό ερέθισμα του οποίου η φωτεινότητα ή η φασματική κατανομή αυξομειώνεται με το χρόνο, για έναν στατικό παρατηρητή σε στατικό περιβάλλον (τρεμόσβημα κατά ΕΛΟΤ EN 61547). Είναι γνωστό πως το φαινόμενο αυτό προκαλεί διάφορες επιβλαβείς επιπτώσεις στον άνθρωπο, όπως επιληπτικές κρίσεις, ημικρανία, επιδείνωση αυτιστικών συμπεριφορών, κόπωση των ματιών, ζάλη, κρίσεις πανικού [1].

Η φωτεινή πάλμωση είναι κυρίως ορατή στις συχνότητες μεταξύ 0.1Hz και 80Hz. Η μεγαλύτερη ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού βρίσκεται γύρω από τα 8,8Hz, αλλά επιπλέον μελέτες έχουν διαπιστώσει ότι το πιο ορατό εύρος συχνοτήτων είναι γύρω στα 5-20 Hz [2] [3]. Η δυνατότητα αντίληψης της φωτεινής πάλμωσης εξαρτάται επιπλέον και από το σχήμα της διαμόρφωσης, με την ορθογώνια διαμόρφωση - τετραγωνικό παλμό, να είναι η πιο αντιληπτή. Η ανώτατη τιμή των 80Hz, οφείλεται στον ορισμό της CIE, όπου ονομάζεται και συχνότητα σύντηξης της φωτεινής πάλμωσης $C_{ff}=80\text{Hz}$ [4]. Σε συχνότητες υψηλότερες από αυτή, η φωτεινή πάλμωση δεν είναι εμφανής από τον άνθρωπο, καθώς συγχωνεύονται στο ανθρώπινο σύστημα αισθήσεων και η οποιαδήποτε διαμόρφωση γίνεται αντιληπτή ως σταθερή.

2.2.2 Στροβοσκοπικό φαινόμενο – Stroboscopic Effect

Το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι ένα φαινόμενο, που παρατηρείται από στατικό παρατηρητή σε ένα κινούμενο περιβάλλον. Η αντίληψη της αλλαγής στην κίνηση ενός αντικειμένου, επηρεάζεται από την χρονική διαμόρφωση της φωτεινής πηγής που το φωτίζει [4]. Ως παράδειγμα του φαινομένου, είναι η αντίληψη της φαινομενικής κατεύθυνσης ή ταχύτητας της περιστροφής ενός αντικειμένου, που αποτελεί εμφανή κίνδυνο για την ασφάλεια του ανθρώπου καθώς περιστρεφόμενα αντικείμενα μπορεί να φαίνονται ακίνητα. Το συγκεκριμένο παράδειγμα έχει επίσης ονομαστεί ως «φαινόμενο του τροχού άμαξας», όπου στην καθημερινότητα μπορεί να παρατηρηθεί κοιτώντας τις ρόδες ενός κινούμενου αυτοκινήτου.

Το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι ορατό μέχρι τα 2.5kHz, αλλά έχει οριστεί μαθηματικά μέχρι τα 2kHz. Είναι επίσης αντιληπτό σε συχνότητες κάτω από την σύντηξη της φωτεινής πάλμωσης $C_{ff}=80\text{Hz}$, αλλά σε τόσο χαμηλές συχνότητες η φωτεινή πάλμωση είναι το κυρίαρχο φαινόμενο. Όπως και με την φωτεινή πάλμωση, το σχήμα της διαμόρφωσης επηρεάζει τον βαθμό αντίληψης του φαινομένου, με την ορθογώνια διαμόρφωση - τετραγωνικό παλμό να είναι και εδώ η πιο αντιληπτή. Στο στροβοσκοπικό φαινόμενο δεν έχουν γίνει όσες έρευνες έχουν γίνει για την φωτεινή πάλμωση. Έως το 2015 ήταν καταγεγραμμένο ως παρενέργεια της φωτεινής πάλμωσης. Από τότε η CIE έχει ορίσει τα δύο φαινόμενα ξεχωριστά.

2.2.3 Phantom Array Effect

Το φαινόμενο συστοιχίας φαντασμάτων, είναι ένα φαινόμενο, όπου είναι ορατό κατά την σακκαδική κίνηση των οφθαλμών στην θέα χρονικών μεταβαλλόμενων πηγών φωτός, μικρών σε μέγεθος και με υψηλή αντίθεση. Ένας κινούμενος παρατηρητής σε ένα στατικό περιβάλλον, θα αντιληφθεί πως η θέση μιας φωτεινής πηγής αλλάζει, λόγω του χρονικά μεταβαλλόμενου φωτισμού. Αυτό οδηγεί στην αντίληψη του φαινομένου συστοιχίας φαντασμάτων, όπου η ακίνητη φωτεινή πηγή εμφανίζεται σε πολλαπλά σημεία στο οπτικού πεδίου του ανθρώπου. Είναι εμφανίσιμο σε συχνότητες έως τα 2.5kHz, πολύ υψηλότερα από την συχνότητα σύντηξης της αναλαμπής $C_{ff}=80\text{Hz}$ [4] [5].

Το συγκεκριμένο είναι το λιγότερα μελετημένο φαινόμενο. Ακόμα δεν υπάρχει διαδικασία για την μέτρηση του. Αποτελεί όμως στόχο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος MetTLM, η δημιουργία μιας τυποποιημένης διαδικασίας για την μέτρηση του.

Βάση των αποτελεσμάτων που βρέθηκαν στο [5], η CIE έχει προτείνει ένα μέτρο στο παρόμοιο με αυτό του στροβοσκοπικού φαινομένου [4], που βασίζεται στο άθροισμα των συνιστωσών συχνότητας του σήματος του χρονικά διαμορφωμένου φωτός.

2.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ «ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΦΩΤΟΣ» ΚΑΙ ΤΩΝ «ΠΡΟΣΩΡΙΝΩΝ ΦΩΤΕΙΝΩΝ ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΩΝ»

Για την περιγραφή της χρονικής διαμόρφωσης φωτός και την πρόβλεψη πιθανών προσωρινών φωτεινών τεχνουργημάτων υπάρχουν διάφορες τυποποιημένες μέθοδοι. Οι κυρίαρχες δύο, είναι το PstLM και το SVM. Το πρώτο υπολογίζει την φωτεινή πάλμωση και το δεύτερο το στροβοσκοπικό φαινόμενο. Βάση του νέου κανονισμού της ευρωπαϊκής ένωσης για οικολογικούς σχεδιασμούς, τίθενται όρια στα δύο αυτά μεγέθη [6].

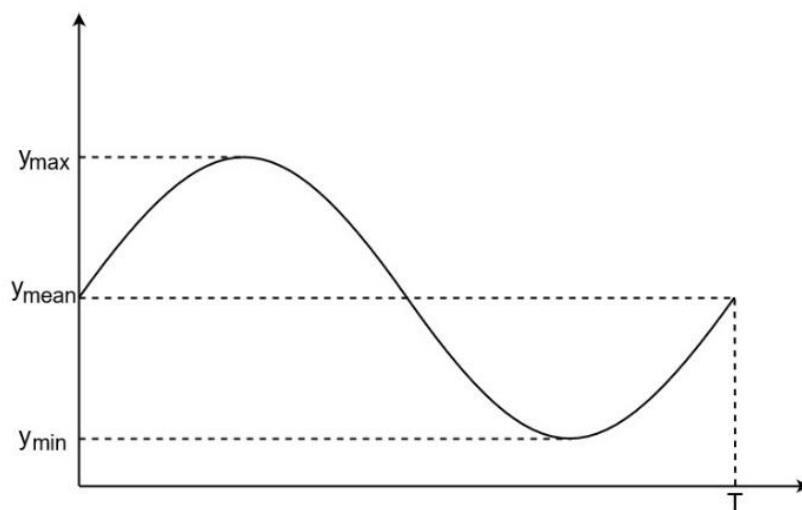
Παλαιότερα γίνονταν χρήση δύο άλλων μεγεθών, του “Percent Flicker”, γνωστό και ως βάθος διαμόρφωσης D_M , και του δείκτη φωτεινής πάλμωσης “Flicker Index”. Τα δύο αυτά μεγέθη περιγράφουν την χρονική διαμόρφωση φωτός και έχουν οριστεί από την «Illuminating Engineering Society» [4]. Τα δύο αυτά μεγέθη όμως δεν λαμβάνουν υπόψη την συχνότητα διαμόρφωσης του φωτός, με συνέπεια να μην μπορούν να προβλέψουν την πιθανότητα να γίνονται ορατά τα προσωρινά φωτεινά τεχνουργήματα, για τα οποία έχει αποδειχθεί πως είναι εξαρτημένα από την συχνότητα [7] [2]. Το βάθος διαμόρφωσης D_M και κατά συνέπεια το “Percent Flicker”, είναι ωστόσο χρήσιμα μέτρα, καθώς η ορατότητα των προσωρινά φωτεινών τεχνουργημάτων εξαρτάται επίσης από αυτά.

2.3.1 Βάθος διαμόρφωσης – Modulation Depth

Το βάθος διαμόρφωσης D_M , γνωστό και ως ποσοστό φωτεινής πάλμωσης – “Flicker Percent” είναι ένα μέγεθος που έχει οριστεί από την Illuminating Engineering Society. Το βάθος διαμόρφωσης ορίζεται ως:

$$D_M = \frac{y_{max} - y_{min}}{y_{max} + y_{min}}$$

Εξίσωση 1. Υπολογισμός βάθους διαμόρφωσης D_M



Εικόνα 1. Υπολογισμός βάθους διαμόρφωσης D_M

όπου y_{\max} η μέγιστη και y_{\min} η ελάχιστη τιμή του σήματος. Με αυτό τον τρόπο υπολογισμού, λαμβάνεται υπόψη και η σχέση των AC και DC συνιστωσών του σήματος. Ένα σήμα με κυμάτωση όπου το πλάτος της είναι ίσο με το DC offset, θα δώσει $D_M=1$, καθώς το y_{\min} ταυτίζεται με το μηδέν. Ένα σήμα DC χωρίς οποιαδήποτε κυμάτωση, θα δώσει αποτέλεσμα $D_M=0$. Ένα σήμα μιας φωτεινής πηγής $y(t)$, θα ικανοποιεί την συνθήκη $y(t)>0$, καθώς αρνητικό φως δεν υπάρχει, και η τιμή του D_M θα έχει όρια $0 \leq D_M \leq 1$.

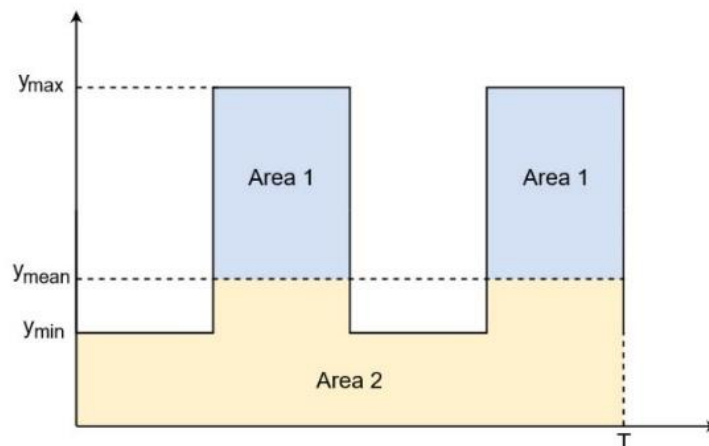
Ο υπολογισμός του D_M όμως δεν λαμβάνει υπόψη του την συχνότητα, ούτε το σχήμα του σήματος του φωτός [4]. Έτσι πλέον αποτελεί μέγεθος για την μέτρηση της χρονικής διαμόρφωσης του φωτός αλλά όχι των προσωρινών φωτεινών τεχνουργημάτων. Ωστόσο, αποτελεί ένα σημαντικό μέγεθος καθώς η πιθανότητα ορατότητας των προσωρινών φωτεινών τεχνουργημάτων εξαρτάται από αυτό, σε συνδυασμό με την συχνότητα και το σχήμα του σήματος.

2.3.2 Δείκτης Φωτεινής πάλμωσης – Flicker Index

Ο δείκτης φωτεινής πάλμωσης ορίζεται ως το ηλίκο της άνω του μέσου όρου φωτεινής ενέργειας προς τη συνολική φωτεινή ενέργεια κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Ορίζεται ως:

$$I_F = \frac{Area1}{Area1 + Area2}$$

Εξίσωση 2. Υπολογισμός δείκτη φωτεινής πάλμωσης



Εικόνα 2. Υπολογισμός δείκτη αναλαμπής

όπου “Area 1” η περιοχή πάνω από τον μέσο επίπεδο y_{mean} της κυματομορφής φωτισμού, και “Area2” η περιοχή κάτω από το μέσο επίπεδο της κυματομορφής φωτισμού [4]. Από τον ορισμό της, δίνει βαρύτητα στο σχήμα της κυματομορφής, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη την συχνότητα του σήματος. Έχει όμως χρησιμοποιηθεί ευρέως για την πρόβλεψη της ορατότητας της φωτεινής πάλμωσης.

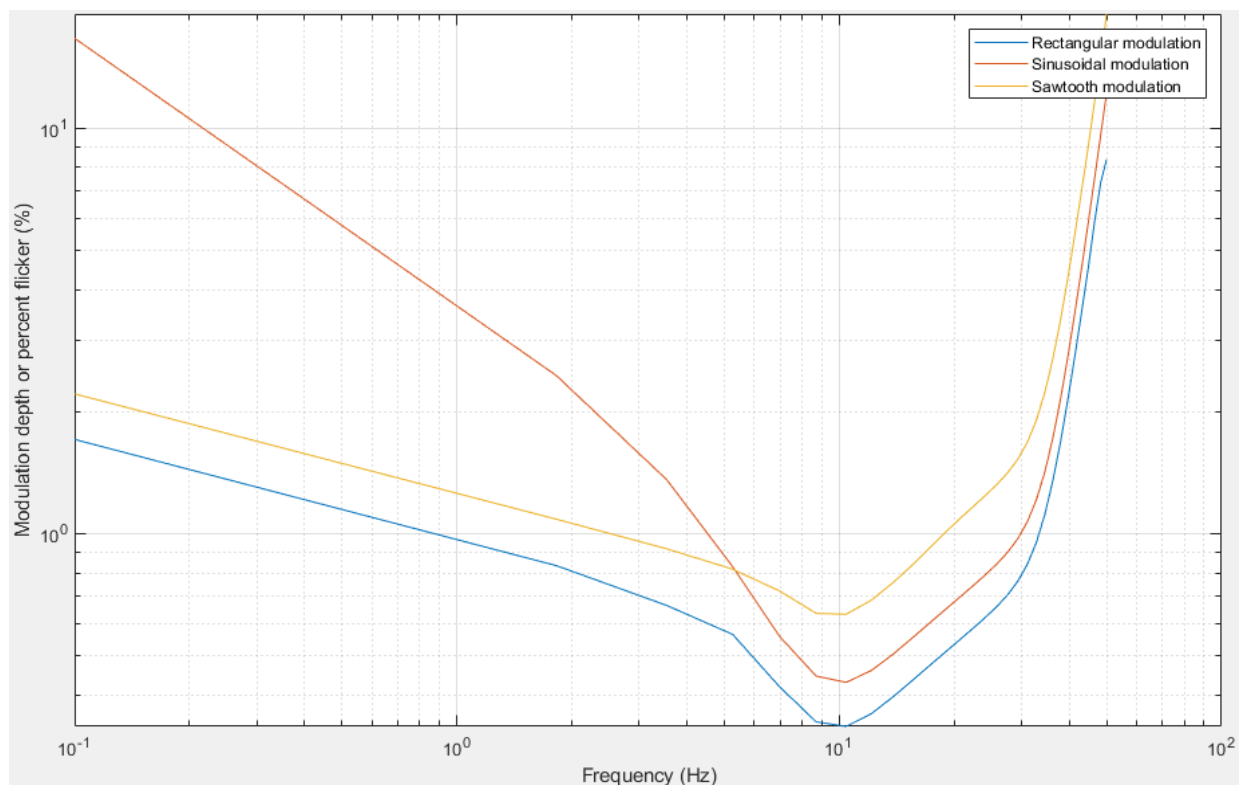
2.3.3 Ποσοστό Φωτεινής πάλμωσης – Percent Flicker

Ως “Percent Flicker” είναι ένα σχετικό μέτρο της μέγιστης τιμής μιας κυματομορφής σε σύγκριση με την ελάχιστη τιμή. Ο υπολογισμός είναι ο ίδιος με το βάθος διαμόρφωσης, αλλά παρουσιάζεται ως ποσοστό. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται συχνά ως συνώνυμο του βάθους διαμόρφωσης. Ορίζεται στο CIE TN 012 [8]. Όπως και στον «Δείκτης Φωτεινής πάλμωσης – Flicker Index», η μορφή της κυματομορφής δεν λαμβάνεται υπόψη. Με απλά λόγια, μια κυματομορφή με Flicker Percent=100%, σημαίνει πως το φωτιστικό ανάβει στο μέγιστο της δυνατότητας του και σβήνει πλήρως, εντός μιας περιόδου.

2.3.4 Βραχυπρόθεσμος δείκτης σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης - Short-term flicker severity index - PstLM

Ο βραχυπρόθεσμος δείκτης σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης PstLM, είναι το μέγεθος το οποίο προβλέπει την ορατότητα της φωτεινής πάλμωσης σε έναν μέσο άνθρωπο, από μια μετρούμενη κυματομορφή φωτός. Με τιμή PstLM=1, υπάρχει 50% πιθανότητα ο ανθρώπινος παρατηρητής να αντιληφθεί την φωτεινή πάλμωση. Με τιμές PstLM>1, οι πιθανότητες ο ανθρώπινος παρατηρητής να αντιληφθεί την φωτεινή πάλμωση αυξάνονται, ενώ με τιμές PstLM<1 οι πιθανότητες ο ανθρώπινος παρατηρητής να αντιληφθεί την φωτεινή πάλμωση μειώνονται. Βάση του νέου οικολογικού σχεδιασμού της ΕΕ, το PstLM πρέπει να περιορίζεται σε τιμές μικρότερες του 1 [6].

Για τον υπολογισμό του PstLM, λαμβάνονται υπόψη, η ευαισθησία του ανθρώπου στις διάφορες συχνότητες και κυματομορφές, το οπτικό και νευρικό σύστημα του μέσου ανθρώπου και η απόκριση τους στην φωτεινή πάλμωση. Όπως έχει ειπωθεί και στο 2.2.1, η φωτεινή πάλμωση είναι ορατή μέχρι την περιοχή των 80Hz. Συγκεκριμένα, στην περιοχή των 70Hz, είναι αναγκαίο το βάθος διαμόρφωσης να ξεπεράσει την τιμή του 1, δηλαδή $D_M > 1$ για ημιτονοειδής, τριγωνικές και τετραγωνικές κυματομορφές. Βάση του ορισμού του βάθους



Εικόνα 3. Γραφική παράσταση, αποτέλεσμα της εργαλειοθήκης MatLAB, συχνότητα δειγματοληψίας 4kHz, διάρκεια 180 δευτερολέπτων. Αναγκαία διαμόρφωση βάθους για PstLM=1

διαμόρφωσης, η μέγιστη δυνατή τιμή του είναι $D_M=1$, έτσι καθιστά την φωτεινή πάλμωση μη ανιληπτή για συχνότητες πέραν των 70Hz, για οποιαδήποτε τιμή D_M .

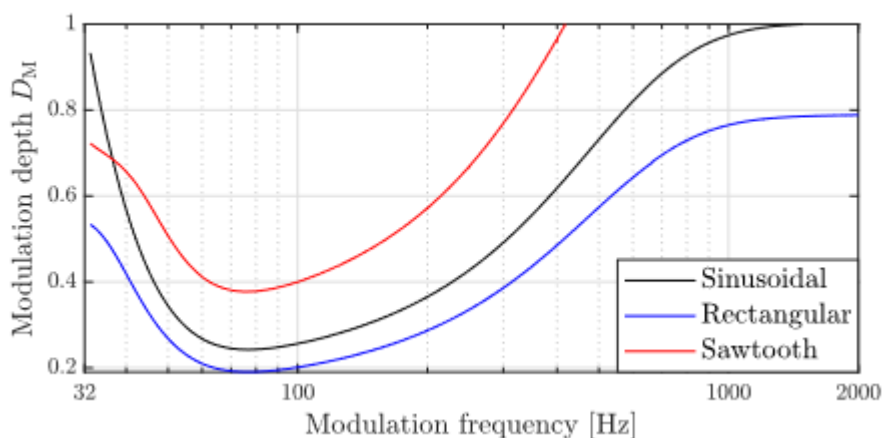
Ο βραχυπρόθεσμος δείκτης σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης PstLM είναι πιο ανιληπτός στις συχνότητες κάτω των 35Hz, με μέγιστη ευαισθησία στην συχνότητα των 10Hz. Στην **Εικόνα 3** φαίνεται η απαραίτητη διαμόρφωση βάθους για ημιτονοειδή, τετραγωνική και τριγωνική διαμόρφωση, σε σχέση με την συχνότητα του σήματος, ώστε να ληφθεί $PstLM=1$.

2.3.5 Μέτρηση στροβοσκοπικού φαινομένου – Stroboscopic Visibility Measure - SVM

Με το συγκεκριμένο μέγεθος, περιγράφεται η ορατότητα του στροβοσκοπικού φαινομένου. Με τιμή $SVM=1$, σημαίνει πως ένας μέσος παρατηρητής έχει 50% πιθανότητα να παρατηρήσει το στροβοσκοπικό φαινόμενο. Με τιμές $SVM>1$, οι πιθανότητες ο ανθρώπινος παρατηρητής να ανιληφθεί το στροβοσκοπικό φαινόμενο αυξάνονται, ενώ με τιμές $SVM<1$ οι πιθανότητες να παρατηρήσει το στροβοσκοπικό φαινόμενο μειώνονται [9]. Βάση του νέου οικολογικού σχεδιασμού της ΕΕ, το SVM πρέπει να περιορίζεται σε τιμές μικρότερες του 0.9 για πλήρες φορτίο, και από την 1^η Σεπτεμβρίου 2024 για τιμές μικρότερες του 0.4 σε πλήρες φορτίο [6].

Το συγκεκριμένο μέγεθος εισήχθη το 2013, και από τότε αποτελεί το τυποποιημένο μέγεθος για την μέτρηση της ορατότητας του στροβοσκοπικού φαινομένου. Προέκυψε από την διεξαγωγή τριών πειραμάτων, που πραγματοποιήθηκαν σε ένα τυπικό περιβάλλον γραφείου, με ημιτονοειδείς, τετραγωνικές και πιο σύνθετες κυματομορφές φωτός, χρησιμοποιώντας διαφορετικές συχνότητες [7]. Επίσης πειραματικά έχει υπολογισθεί το όριο του βάθους διαμόρφωσης σε σχέση με την συχνότητα. Οι συνιστώσες συχνότητας κανονικοποιούνται διαιρώντας τις με την DC συνιστώσα, σταθμίζονται με το όριο του βάθους διαμόρφωσης και αθροίζονται, ώστε να προβλεφθεί η ορατότητα του στροβοσκοπικού φαινομένου [7]. Αυτό προνοεί την μετατροπή του σήματος φωτός, από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, με την χρήση μετασχηματισμού Φουριέ [4] [9].

Στην **Εικόνα 4** φαίνεται η απαραίτητη διαμόρφωση βάθους σε σχέση με την απαραίτητη συχνότητα, ώστε να ληφθεί $SVM=1$



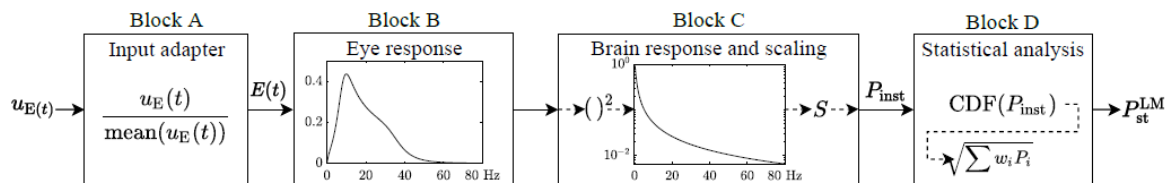
Εικόνα 4. Σχέση διαμόρφωσης βάθους με συχνότητα, για $SVM=1$

2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΟΒΑΡΟΤΗΤΑΣ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΠΑΛΜΩΣΗΣ P_{stLM}

Στην συγκεκριμένη παράγραφο, θα αναλυθεί η μεθοδολογία υπολογισμού του P_{stLM}, όπως έχει αυτή οριστεί από το πρότυπο IEC TR 61547-1:2020 [10] και το IEC 61000-4-15 [11]. Η διαδικασία μετατρέπει μια κυματομορφή φωτός από την είσοδο της, στον βραχυπρόθεσμο δείκτη σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης P_{stLM} στην έξοδό της.

Η διαδικασία περιγράφεται στο IEC TR 61547-1:2020 [10] και βασίζεται στο IEC 61000-4-15 [11], με τροποποιήσεις οι οποίες αντικαθιστούν την λάμπα πυρακτώσεως. Το IEC 61000-4-15 δημιουργήθηκε με βάση τη μέτρηση της τάσης εισόδου, και την πρόβλεψη της ορατότητας του «flicker» με βάση ένα ενσωματωμένο μετρητή τάσης πάνω στην μέση λάμπα πυρακτώσεως. Ωστόσο, η διαδικασία έχει εκσυγχρονιστεί και πλέον μπορεί η μετρούμενη κυματομορφή φωτός να μετريέται απευθείας και είναι συνεπώς ανεξάρτητη από τον τύπο του λαμπτήρα [10] [12].

Η διαδικασία αποτελείται από τέσσερα μπλοκ, τα οποία αναγράφονται ως μπλοκ Α έως Δ, το καθένα με τον δικό του σκοπό. Το διάγραμμα των μπλοκ παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5**.



Εικόνα 5. Διάγραμμα των μπλοκ υπολογισμού P_{stLM}

Το περιεχόμενο και η λειτουργικότητα των μπλοκ περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες. Τα μπλοκ Α-Δ της μεθοδολογίας αποτελούνται κυρίως από φίλτρα. Όλες οι συναρτήσεις μεταφοράς των διαφόρων φίλτρων δίνονται στο IEC TR 61547-1:2020 [10] ως αναλογικά φίλτρα, στο πεδίο συχνοτήτων Laplace. Ωστόσο, εάν ο υπολογισμός του P_{stLM} γίνεται ψηφιακά σε διακριτά δειγματοληπτικά δεδομένα, τα αναλογικά φίλτρα πρέπει να μετατραπούν σε ψηφιακά ισοδύναμα στο επίπεδο Z [13]. Σε όλες τις συναρτήσεις μεταφοράς φίλτρων που εξετάζονται στις ενότητες παρακάτω ενότητες, το s είναι η μιγαδική μεταβλητή Laplace.

Μπλοκ Α - Προσαρμογέας εισόδου – Input adapter

Το πρώτο μπλοκ Α, είναι ο προσαρμογέας εισόδου, αλλά παρόλο που το IEC αναφέρεται σε φωτισμό, η είσοδος μπορεί να είναι οποιαδήποτε φωτεινή ποσότητα [8]. Ως είσοδο, το μπλοκ Α λαμβάνει την κυματομορφή φωτός $U_e(t)$. Η λειτουργία του μπλοκ Α είναι η κλιμάκωση της φωτεινής κυματομορφής εισόδου στη μέση τιμή της ή στην τιμή DC, διαιρώντας την με τη μέση τιμή της τιμή, όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 3**, κανονικοποιώντας ουσιαστικά το σήμα εισόδου:

$$E(t) = \frac{U_e(t)}{\text{mean}(U_e(t))} \quad (3)$$

όπου $U_e(t)$ είναι η κυματομορφή του φωτός [10]. Αυτή η κανονικοποίηση επιτρέπει τη μέτρηση του flicker ανεξάρτητα από το απόλυτο επίπεδο φωτός ή την γραμμική ενίσχυση κατά τη φάση απόκτησης της κυματομορφής. Το IEC TR 61547 [10] προτείνει, αλλά δεν απαιτεί, την απόκτηση της τιμής DC με φιλτράρισμα του σήματος με χαμηλοπερατό φίλτρο

1ης τάξης, όπως γίνεται στο [12]. Η συνάρτηση μεταφοράς του χαμηλοπερατού παρουσιάζεται στην **Εξίσωση 4**:

$$F_{LPSC} = \frac{1}{\tau_{LPSC} \cdot s + 1} \quad (4)$$

όπου s είναι η μεταβλητή Laplace και $\tau_{LPSC} = 10$ δευτερόλεπτα, είναι η σταθερά χρόνου του φίλτρου [10]. Αυτό το χαμηλοπερατό φίλτρο έχει συχνότητα αποκοπής 0,016Hz, άρα πρακτικά περνάει μόνο τη συνιστώσα DC. Αφού το φιλτραρισμένο σήμα εγκατασταθεί σε μια σταθερή τιμή, μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή DC. Η σταθερά χρόνου των 10 δευτερολέπτων επιλέχθηκε για να περιοριστεί ο χρόνος μετάβασης της απόκρισης [12], και συνεπώς να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για την απόκτηση του μέσου όρου του σήματος. Η έξοδος του μπλοκ A είναι η κανονικοποιημένη φωτεινή κυματομορφή $E(t)$.

Μπλοκ B – Ανταπόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού – Eye response

Το μπλοκ B περιέχει τρία φίλτρα, τα οποία έχουν ως σκοπό την αποδιαμόρφωση του σήματος και προσομοιώνουν την απόκριση του ανθρώπινου ματιού [12] [14]. Στην αρχή υπάρχει ένα υψιπερατό φίλτρο 1ης τάξης με συνάρτηση μεταφοράς που δίνεται στην **Εξίσωση 5**:

$$F_{HP}(s) = \frac{T_{HP} \cdot s}{T_{HP} \cdot s + 1} \quad (5)$$

όπου $T_{HP} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{HP}} = 3.18s$, είναι η σταθερά χρόνου του φίλτρου και $f_{HP} = 0.05$ Hz είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου [10]. Η λειτουργία αυτού του φίλτρου είναι η αποδιαμόρφωση του σήματος με την εξάλειψη της DC συνιστώσας, αφήνοντας μόνο την κανονικοποιημένη AC συνιστώσα, η οποία αντιπροσωπεύει τις μεταβολές της φωτεινής ποσότητας [12] [8].

Στη συνέχεια, στο Block B ακολουθεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο Butterworth 6ης τάξης, με συχνότητα αποκοπής $f_{LPBW} = 35Hz$ για συστήματα ηλεκτροδότησης 50 Hz και $f_{LPBW} = 42Hz$ για συστήματα ηλεκτροδότησης 60 Hz. Ο σκοπός αυτού του φίλτρου είναι η περαιτέρω αποδιαμόρφωση του σήματος με την εξάλειψη της θεμελιώδους συχνότητας του φέροντος κύματος, δηλαδή της συνιστώσας συχνότητας του δικτύου, καθώς και των αρμονικών της, και τυχόν διαρμονικές που προκαλούνται από το σήμα διαμόρφωσης. Επιλέχθηκε το φίλτρο Butterworth, καθώς έχει την πιο επίπεδη απόκριση στη ζώνη διέλευσης, και η τάξη καθορίστηκε από την ανάγκη της να έχει περίπου -50 dB απόσβεση στο διπλάσιο της συχνότητας του δικτύου [14]. Οι παράγοντες του κανονικοποιημένου πολυωνύμου Butterworth 6ης τάξης με τρία δεκαδικά ψηφία [15] παρουσιάζονται στην **Εξίσωση 6**.

$$B_6(s) = (s^2 + 0.518s + 1)(s^2 + 1.414s + 1)(s^2 + 1.932s + 1) \quad (6)$$

Για την υλοποίηση του χαμηλοπερατού Φίλτρου Butterworth 6^{ης} τάξης, θα εφαρμοσθούν τρία φίλτρα 2^{ης} τάξης, το κάθε ένα με συνάρτηση μεταφοράς όπως φαίνεται παρακάτω στην **Εξίσωση 7**:

$$F_{BW2}(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (7)$$

όπου $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_{LPBW}$ είναι η συχνότητα αποκοπής σε rad/s και ζ είναι ο συντελεστής απόσβεσης, που ορίζεται ως το ήμισυ του συντελεστή s σε κάθε τετραγωνικό παράγοντα του πολυωνύμου Butterworth στην **Εξίσωση 6**.

Με την σειριακή εφαρμογή των τριών φίλτρων 2ης τάξης και την αντικατάσταση των συντελεστών του s στην **Εξίσωση 7**, προκύπτει πως η τελική συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου Butterworth 6ης τάξης δίνεται στην **Εξίσωση 8**.

$$F_{LPBW}(s) = \prod_{i=1}^3 \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2 \cdot \zeta_i \cdot \left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (8)$$

όπου $\zeta_1 = 0.259$, $\zeta_2 = 0.707$, $\zeta_3 = 0.966$ και $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_{LPBW} = 70\pi$ rad/s. Μετά την εφαρμογή του χαμηλοπερατού φίλτρου Butterworth, παραμένει ουσιαστικά μόνο η ζώνη συχνοτήτων 0,05 - 35 Hz στο σήμα. Όπως περιγράφεται στην ενότητα **2.2.1**, η φωτεινή πάλμωση γίνεται πιο εύκολα αντιληπτή σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων.

Το τρίτο φίλτρο στο μπλοκ B είναι ένα εξειδικευμένο ζωνοπερατό φίλτρο, με κορυφή της ζώνης διέλευσης στα 10 Hz, που μιμείται την απόκριση συχνότητας του οφθαλμού-εγκεφάλου ενός μέσου παρατηρητή [12]. Η συνάρτηση μεταφοράς του φαίνεται στην **Εξίσωση 9**:

$$F_{WF}^{LM}(s) = \frac{F_{WF}^V(s)}{F_{RL}(s)} \quad (9)$$

Το $F_{WF}^V(s)$ είναι η τυπική στάθμιση του φίλτρου της μέτρησης της φωτεινής πάλμωσης με την μέτρηση τάσης που ορίζεται στο IEC 61000-4-15, το οποίο μοντελοποιεί το σύστημα λαμπτήρας-μάτι. Στην **Εξίσωση 10** παρουσιάζεται η συνάρτηση του:

$$F_{WF}^V(s) = \frac{k \cdot \omega_1 \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \lambda \cdot s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)} \quad (10)$$

Όπου οι παράμετροι για το σύστημα 230V/50Hz είναι: $k = 1.74802$, $\omega_2 = 2\pi \cdot 9.15494 \cdot s^{-1}$, $\omega_3 = 2\pi \cdot 2.27979 \cdot s^{-1}$, $\omega_4 = 2\pi \cdot 1.22535 \cdot s^{-1}$, $\lambda = 2\pi \cdot 21.9 \cdot s^{-1}$, $\lambda = 2\pi \cdot 4.5981 \cdot s^{-1}$

Παράλληλα, το $F_{RL}(s)$ αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά ενός μέσου λαμπτήρα πυρακτώσεως ο οποίος όρος βρέθηκε με την παρατήρηση της μέσης απόκρισης δέκα λαμπτήρων πυρακτώσεως 60W από διαφορετικούς κατασκευαστές [12]. Η συνάρτηση του παρουσιάζεται στην **Εξίσωση 11**:

$$F_{RL}(s) = \frac{K}{\tau_{L1} \cdot s^2 + \tau_{L2} \cdot s + 1} \quad (11)$$

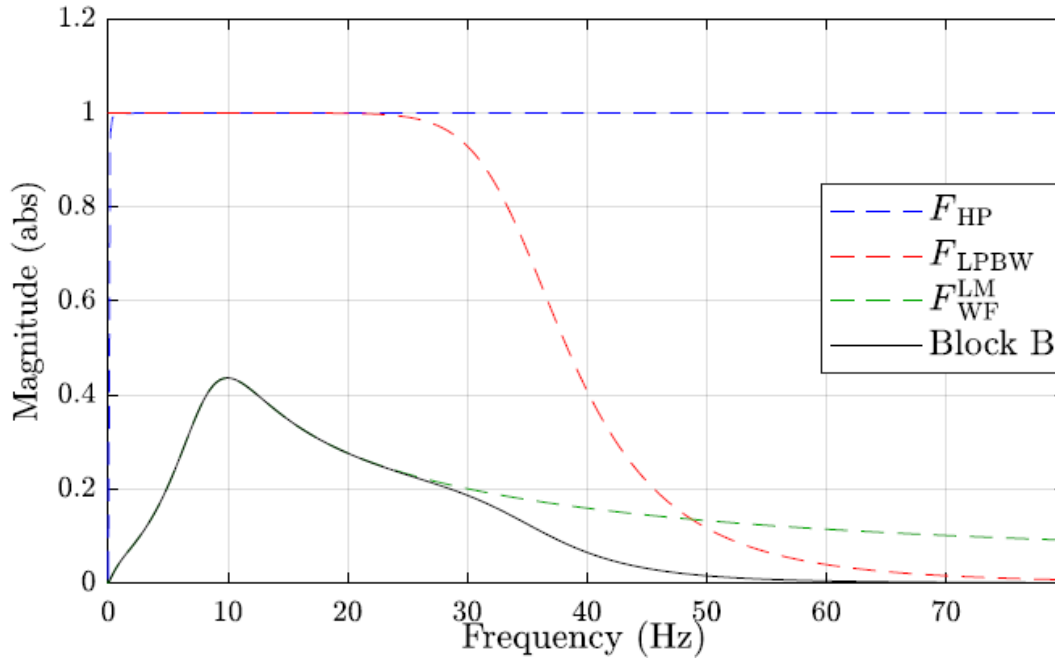
Όπου $K=3.57$, $\tau_{L1} = 0.02ms$, $\tau_{L2} = 21.2ms$, βάση του IEC TR 61547 [10].

Με τη αντικατάσταση των εξισώσεων **11** και **10** στην εξίσωση **Εξίσωση 9**, η τελική συνάρτηση του τρίτου φίλτρου καταλήγει να είναι όπως παρουσιάζεται στην **Εξίσωση 12**:

$$F_{WF}^{LM}(s) = \frac{0.041661 \cdot s^4 + 44.758 \cdot s^3 + 2715.6 \cdot s^2 + 29839 \cdot s}{s^4 + 196.32 \cdot s^3 + 11781 \cdot s^2 + 534820 \cdot s + 3505380} \quad (12)$$

Αυτή είναι η μορφή που δίνεται στο IEC TR 61547 [10] και αντιπροσωπεύει την απόκριση συχνότητας ενός μέσου ανθρώπινου ματιού στο σήμα φωτεινής πάλμωσης [10] [12] [14]. Κατ' αρχήν το $F_{WF}^V(s)$ προσομοιώνει την απόκριση του ανθρώπινου ματιού σε έναν μέσο λαμπτήρα πυρακτώσεως 60W, ο οποίος μοντελοποιείται από την $F_{RL}(s)$, όταν εφαρμόζεται στον λαμπτήρα αποδιαμορφωμένο μετρούμενο σήμα τάσης τροφοδοσίας. Στην διαδικασία μέτρησης της φωτεινής πάλμωσης που ορίζεται στο [10], η κυματομορφή του φωτός μετράτε απευθείας, αντί να προσομοιώνεται με βάση το μοντέλο του λαμπτήρα και τη μέτρηση της τάσης τροφοδοσίας. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να αφαιρεθεί η εξάρτηση του λαμπτήρα πυρακτώσεως 60W, η οποία γίνεται με την εφαρμογή του αντίστροφου του μοντέλου λαμπτήρα $F_{RL}(s)$ στο φίλτρο στάθμισης $F_{WF}^V(s)$. Έτσι, το $F_{WF}^{LM}(s)$ μοντελοποιεί αποτελεσματικά την απόκριση του ανθρώπινου ματιού στο σήμα φωτεινής πάλμωσης, το οποίο σε αυτό το σημείο έχει περάσει από κανονικοποίηση και φιλτράρισμα υψηλής και χαμηλής διέλευσης.

Αρχικά η κορυφή της ζώνης διέλευσης στο φίλτρο στάθμισης της διαδικασίας μέτρησης της φωτεινής πάλμωσης με την μέτρηση τάσης ήταν στα 8,8 Hz, αλλά λόγω της αφαίρεσης της εξάρτησης από τον λαμπτήρα πυρακτώσεως, η κορυφή έχει μετατοπιστεί στα 10 Hz. Όπως φαίνεται στη **Εικόνα 6** παρακάτω, το μπλοκ Β της διαδικασίας εξασθενεί σε μεγάλο βαθμό όλες τις συχνότητες εκτός της πιο ορατής ζώνης 5-20 Hz, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα **2.2.1**.



Εικόνα 6. Αποκρίσεις πλάτους γραμμικής κλίμακας των διαφόρων φίλτρων στο μπλοκ Β. Η μαύρη καμπύλη με την ένδειξη μπλοκ Β αντιπροσωπεύει τη συνολική απόκριση πλάτους όλων των φίλτρων στο μπλοκ Β

Μπλοκ C – Ανταπόκριση του εγκεφάλου – Brain response and scaling

Το μπλοκ C μοντελοποιεί τη μη γραμμική απόκριση του οφθαλμού-εγκεφάλου στη φωτεινή πάλμωση. Αρχικά στο μπλοκ C υπάρχει ένας τετραγωνικός πολλαπλασιαστής, ο οποίος με τον τετραγωνισμό του σήματος αναπαριστά τη μη γραμμική αντίληψη της φωτεινής πάλμωσης κατά τη διαδικασία μεταφοράς από το μάτι στον εγκέφαλο [12]. Ο τετραγωνικός πολλαπλασιαστής ακολουθείται από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο 1ης τάξης, με χρονική σταθερά 300 ms. Αυτό προσομοιώνει το φαινόμενο αποθήκευσης στην μνήμη του εγκεφάλου. Το χαμηλοπερατό φίλτρο χρησιμεύει ως φίλτρο ολισθαίνοντος μέσου όρου, συγχωνεύοντας τις ταχείες μεταβολές της φωτεινής πάλμωσης, όπως κάνει ο ανθρώπινος εγκέφαλος [14]. Η συνάρτηση μεταφοράς του χαμηλοπερατού φίλτρου με ολισθαίνοντα μέσο όρο παρουσιάζεται στην **Εξίσωση 13**

$$F_{LP}(s) = \frac{1}{\tau_{LP} \cdot s + 1} \quad (13)$$

Όπου $\tau_{LP} = 300ms$. Το σήμα είναι σε αυτό το σημείο είναι η μη κλιμακωτή στιγμιαία αίσθηση φωτεινής πάλμωσης [10]. Επόμενος, το σήμα κλιμακώνεται με έναν συντελεστή κλιμάκωσης S, κατά τρόπο ώστε το μέγεθος του παραγόμενου δείκτη σοβαρότητας στιγμιαίας φωτεινής πάλμωσης P_{inst} να παίρνει την τιμή 1, όταν η ακόλουθη σχετική κυματομορφή φωτισμού αναφοράς τροφοδοτείται στην διαδικασία μέτρησης της φωτεινής πάλμωσης:

$$E(t) = 1 + \frac{d_E}{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t) \quad (14)$$

όπου $E(t)$ είναι η σχετική κυματομορφή φωτισμού αναφοράς που παράγει το μέγιστο $P_{inst} = 1$, με συχνότητα διαμόρφωσης $f_m = 8,8 \text{ Hz}$, σχετική μεταβολή της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης της έντασης φωτισμού $d_E = 0,630\%$, ίση με το διπλάσιο του D_M της κυματομορφής αναφοράς [10]. Η συχνότητα διαμόρφωσης $f_m = 8,8 \text{ Hz}$ είναι η συχνότητα με την μεγαλύτερη ευαισθησία στην φωτεινή πάλμωση. Αυτό σημαίνει ότι είναι η συχνότητα στην οποία το απαιτούμενο βάθος διαμόρφωσης D_M για ορατή φωτεινή πάλμωση είναι η μικρότερη. Αυτό επιτρέπει τον ακριβέστερο υπολογισμό του S , δεδομένου ότι η σχέση του απόλυτου σφάλματος στο P_{inst} και του απόλυτου σφάλματος στο S είναι η μεγαλύτερη σε αυτή την συχνότητα. Η έξοδος του μπλοκ C είναι η στιγμιαία αίσθηση φωτεινής πάλμωσης P_{inst} . Το πρότυπο IEC TR 61547 [10] δεν δίνει σαφείς οδηγίες για τον υπολογισμό του S . Όπως αναφέρεται σε εργασία του Aalto University στα πλαίσια του MetTLM [16], θεωρητικά, ο συντελεστής κλιμάκωσης S μπορεί να υπολογιστεί από τις αποκρίσεις πλάτους των διαφόρων φίλτρων στην συχνότητα f_m , ως εξής:

$$S = \frac{2}{\left(\frac{d_E}{2} \cdot |F_{HP}(j\omega_m)| \cdot |F_{LPBW}(j\omega_m)| \cdot |F_{WF}^{LM}(j\omega_m)|\right)^2 \cdot (1 + |F_{LP}(2j\omega_m)|)} \quad (15)$$

Όπου $d_E = 0.630\%$ είναι η σχετική μεταβολή στην **Εξίσωση 14**, $\omega_m = 2\pi f_m$, $f_m = 8.8 \text{ Hz}$ είναι η συχνότητα διαμόρφωσης στην **Εξίσωση 14**, $j = \sqrt{-1}$ είναι η φανταστική μονάδα, F_{HP} είναι η συνάρτηση μεταφοράς στην **Εξίσωση 5**, F_{LPBW} είναι η συνάρτηση μεταφοράς στην **Εξίσωση 8**, F_{WF}^{LM} είναι η συνάρτηση μεταφοράς στην **Εξίσωση 12** και F_{LP} είναι η συνάρτηση μεταφοράς στην **Εξίσωση 13**.

Στα ιδανικά αναλογικά φίλτρα, **Εξίσωση 15** θα οδηγούσε σε $S = 1101910,946$. Ωστόσο, ο παράγοντας κλιμάκωσης εξαρτάται από την πραγματική υλοποίηση των φίλτρων, οπότε διαφορετικοί παράγοντες κλιμάκωσης έχουν βρεθεί πειραματικά και εφαρμόζονται στο [17]. Η έξοδος του μπλοκ C είναι στιγμιαία αίσθηση φωτεινής πάλμωσης P_{inst} .

Μπολ D – Στατιστική ανάλυση – Statistical analysis

Το μπλοκ D διεξάγει μια στατιστική ανάλυση στην τιμή του δείκτη σοβαρότητας της στιγμιαίας φωτεινής πάλμωσης P_{inst} , με αποτέλεσμα τον βραχυπρόθεσμο δείκτη σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης P_{stLM} . Πρώτα το P_{inst} διαιρείται σε αριθμό κατακόρυφων διαστημάτων και σχηματίζεται μια αθροιστική συνάρτηση κατανομής - CDF. Το P_{stLM} στη συνέχεια υπολογίζεται ως:

$$P_{st}^{LM} = \sqrt{0.0314 \cdot P_{0.1} + 0.0525 \cdot P_{1s} + 0.0657 \cdot P_{3s} + 0.28 \cdot P_{10s} + 0.08 \cdot P_{50s}} \quad (16)$$

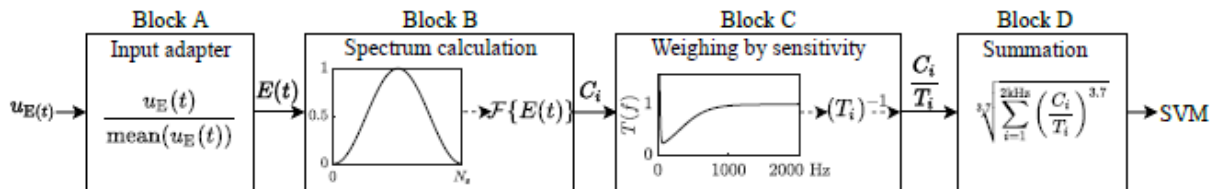
Όπου οι όροι P_i είναι οι τιμές του P_{inst} που υπερβαίνονται με πιθανότητα $i\%$ κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης, δηλαδή οι τιμές P_{inst} πάνω από τις οποίες βρίσκεται το $i\%$ του P_{inst} [12]. Οι συντελεστές στάθμισης προσδιορίζονται έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη μια μεγάλη ποικιλία διαφορετικών κυματομορφών και διαμορφώσεων [18]. Για να ληφθούν υπόψη οι ξαφνικές αλλαγές στην αθροιστική πιθανότητα, χρησιμοποιούνται εξομαλύνσεις που συμβολίζονται με το επίθημα s και η εφαρμόζονται ως εξής [10]:

$$\begin{aligned}
P_{1s} &= \frac{P_{0.7} + P_1 + P_{1.5}}{3} \\
P_{3s} &= \frac{P_{2.2} + P_3 + P_4}{3} \\
P_{10s} &= \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \\
P_{50s} &= \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{53}
\end{aligned}
\tag{17}$$

Το P0.1 δεν εξομαλύνεται, καθώς δεν απαιτεί περαιτέρω εξομάλυνση, δεδομένου ότι το φίλτρο ολισθαίνοντος μέσου στο μπλοκ C εξομαλύνει ήδη τις πιο απότομες κορυφές. Το IEC TR 61547 συνιστά την απόρριψη των πρώτων 60 δευτερολέπτων του Pinst, για να εξασφαλιστεί ότι το PstLM υπολογίζεται σε σταθερή κατάσταση του φωτιστικού αφού τα διάφορα φίλτρα του μετρητή φωτεινής πάλμωσης έχουν κατασταλάξει [19].

2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΡΟΒΟΣΚΟΠΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ SVM

Στην παρούσα παράγραφο, θα αναλυθεί η μεθοδολογία υπολογισμού του μέτρου ορατότητας στροβοσκοπικού φαινομένου – SVM. Η διαδικασία μετατρέπει μια είσοδο κυματομορφής φωτός, στο μέτρο ορατότητας στροβοσκοπικού φαινομένου SVM στην έξοδό της. Όπως και στην μέτρηση του PstLM, ο υπολογισμός του SVM αποτελείται από τέσσερα μπλοκ, A έως D, που φαίνονται στην παρακάτω **Εικόνα 7**, το καθένα με τη δική του λειτουργικότητα.



Εικόνα 7. Διάγραμμα των μπλοκ υπολογισμού SVM

Block A – Προσαρμογές εισόδου – Input adapter

Το μπλοκ A της διαδικασίας ονομάζεται προσαρμογές φωτεινότητας εισόδου στο [9], αλλά οποιαδήποτε φωτεινή ποσότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί [8]. Η είσοδος του μπλοκ A είναι η ψηφιοποιημένη μετρούμενη κυματομορφή φωτός $U_E(t)$. Στη συνέχεια κανονικοποιείται διαιρώντας την με τη μέση τιμή της, τη συνιστώσα DC, ως εξής:

$$E(t) = \frac{U_E(t)}{\text{mean}(U_E(t))}
\tag{18}$$

Η κανονικοποίηση επιτρέπει τον υπολογισμό του SVM ανεξάρτητα από το απόλυτο επίπεδο φωτισμού. Η έξοδος του μπλοκ A είναι η κανονικοποιημένη κυματομορφή φωτός $E(t)$ [9].

Block B – Υπολογισμός φάσματος – Spectrum calculation

Το μπλοκ Β υπολογίζει το φάσμα συχνοτήτων $C(f)$ (που αναφέρεται ως Power Spectral Density (PSD) στο [8]) της κανονικοποιημένης φωτεινής κυματομορφής $E(t)$ μέσω μετασχηματισμού Fourier. Δεδομένου ότι το κυματομορφή φωτός είναι διακριτή και πρακτικά περιοδική, τουλάχιστον όταν η μετρούμενη φωτεινή πηγή που τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα βρίσκεται στη μόνιμη κατάστασή της, ο μετασχηματισμός Fourier πρέπει να είναι ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier - DFT. Τόσο ο IEC όσο και ο CIE υπονοούν, αλλά δεν απαιτούν ούτε συνιστούν αυστηρά, τη χρήση του αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT) για τον DFT και την απόκτηση του $C(f)$ [8] [9]. Στο πράξη, οι αλγόριθμοι FFT είναι οι πιο αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό μετασχηματισμών Fourier [13]. Λεπτομερέστερες οδηγίες για την απόκτηση του $C(f)$ ετοιμάζονται από την τεχνική επιτροπή της CIE TC 2-89 [8], αλλά μέχρι την στιγμή της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής, δεν έχουν δημοσιευθεί ακόμη.

Πριν από τη λήψη του μετασχηματισμού Fourier, η κυματομορφή του φωτός πρέπει να υποστεί επεξεργασία για να αποκτηθούν πιο αξιόπιστα τα δεδομένα του φάσματος συχνότητας. Τόσο το IEC όσο και το CIE συνιστούν την εφαρμογή παραθυροποίησης - windowing, κυρίως Hanning-windowing [4] [9]. Η παραθυροποίηση Hanning, επίσης γνωστή ως «Hann-windowing», λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα φασματικής διαρροής που προκαλούνται από μια πιθανή δειγματοληψία, με μη ακέραιο αριθμό περιόδων στα δεδομένα δειγματοληψίας της κυματομορφής του φωτός. Ο DFT αντιμετωπίζει το σήμα ως διακριτό περιοδικό σήμα, έτσι ώστε το τελευταίο σημείο δειγματοληψίας να ακολουθείται από το πρώτο. Εάν η δειγματοληπτούμενη φωτεινή κυματομορφή έχει μη ακέραιο αριθμό περιόδων, τα πρώτα και τα τελευταία δεδομένα σημεία θα βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις και αυτή η ασυνέχεια θεωρείται ως βήμα αύξησης στο όριο του τελικού σημείου, με αποτέλεσμα τη φασματική διαρροή [9] [20]. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να μειωθεί με την εφαρμογή κατάλληλων παραθύρων, όπως το Hanning-window, το οποίο μειώνει την πλάτος των τελικών σημείων του σήματος, επιτρέποντας μια ομαλή μετάβαση στο τελικό σημείο [13] [20]. Το παράθυρο Hanning δίνεται ως εξής:

$$w_{Hanning} = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N_s} \right) \right) = \sin^2 \left(\frac{\pi n}{N_s} \right), \quad 0 \leq n \leq N_s \quad (19)$$

όπου n είναι ένας ακέραιος αριθμός και N_s είναι ο αριθμός των δειγμάτων [13]. Εφαρμογή παραθυροποίησης στο πεδίο του χρόνου οδηγεί σε συνεκτικό κέρδος ισχύος, το οποίο στην πράξη εξασθενεί το σήμα. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη πολλαπλασιάζοντας το σήμα με έναν συντελεστή διόρθωσης πλάτους μετά το παράθυρο. Για το παράθυρο Hanning-window που δίνεται στην **Εξίσωση 19** παραπάνω, ο συντελεστής διόρθωσης είναι 2 [20], δεδομένου ότι το Hanning-window μειώνει κατά μέσο όρο το πλάτος του σήματος στο μισό του αρχικού σήματος.

Η φασματική διαρροή μπορεί θεωρητικά να αποφευχθεί με τον αριθμό των δειγμάτων να είναι τέτοιος ώστε να υπάρχει ακέραιος αριθμός περιόδων στην κυματομορφή του φωτός. Αυτό για να είναι εφικτό, πρέπει να γνωρίζουμε την συχνότητα διαμόρφωσης του σήματος, και να ικανοποιούμε το θεώρημα Nyquist για διπλάσια συχνότητα δειγματοληψίας από την συχνότητα του σήματος προς διερεύνηση.

Η IEC συνιστά επίσης μηδενισμό-nulling, για να αυξηθεί η ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων [9]. Η τεχνική μηδενισμού-nulling, προσθέτει μηδενικά στο τέλος της κυματομορφής του φωτός, στο πεδίο του χρόνου. Αυτό χρησιμεύει ως προσθήκη περισσότερων διαχωριστικών πεδίων συχνότητας στο φάσμα συχνοτήτων. Δεν αυξάνει την πραγματική ανάλυση συχνότητας, αλλά οδηγεί σε παρεμβολή μεταξύ των σημείων συχνότητας, επιτρέποντας μια ομαλότερη καμπύλη φάσματος. Η τεχνική μηδενισμού-nulling μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επιμήκυνση του σήματος σε μήκος που είναι δύναμη του δύο, το οποίο απαιτείται για αλγόριθμους FFT. Μετά την παραθυροποίηση ή τη λογιστική αντιμετώπιση της φασματικής διαρροής, και τον πιθανό μηδενισμό, υπολογίζεται το φάσμα συχνοτήτων $S(f)$ της φωτεινής κυματομορφής με μετασχηματισμό Fourier ως εξής:

$$S(f) = \mathcal{F}\{E(t)\} \quad (20)$$

Δεδομένου ότι το IEC TR 63158 [9] προβλέπει την εφαρμογή του αλγορίθμου FFT, το $S(f)$ που προκύπτει είναι το αμφίπλευρο φάσμα συχνοτήτων της φωτεινής κυματομορφής, όπου το μισό φάσμα βρίσκεται στην αρνητική πλευρά της συχνότητας. Το αμφίπλευρο φάσμα εκτείνεται περίπου στην περιοχή συχνοτήτων $[-f_s/2, f_s/2]$, καθώς η μέγιστη συχνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$f_{max} = \frac{(N_s - 1)}{2 \left(\frac{N_s}{f_s}\right)} \approx \frac{f_s}{2} \quad (21)$$

όπου N_s είναι ο αριθμός των δειγμάτων, f_s είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας.

Για την απόκτηση του φάσματος συχνοτήτων $C(f)$ από το αμφίπλευρο φάσμα, το IEC TR 63158 δίνει οδηγίες για την απόρριψη της αρνητικής πλευράς συχνοτήτων, και στη συνέχεια την αντιστάθμιση με πολλαπλασιασμό της θετικής πλευράς με συντελεστή δύο. Η συνιστώσα των 0 Hz δεν πολλαπλασιάζεται. Το IEC TR 63158 δίνει επίσης οδηγίες για την κανονικοποίηση του φάσματος διαιρώντας το με το πλάτος της συνιστώσας DC $S(0)$, όπως φαίνεται στην **Εξίσωση 22**

$$C(f) = 2 \cdot \frac{S(f)}{S(0)}, \quad f \in \left(0, \frac{f_s}{2}\right] \quad (22)$$

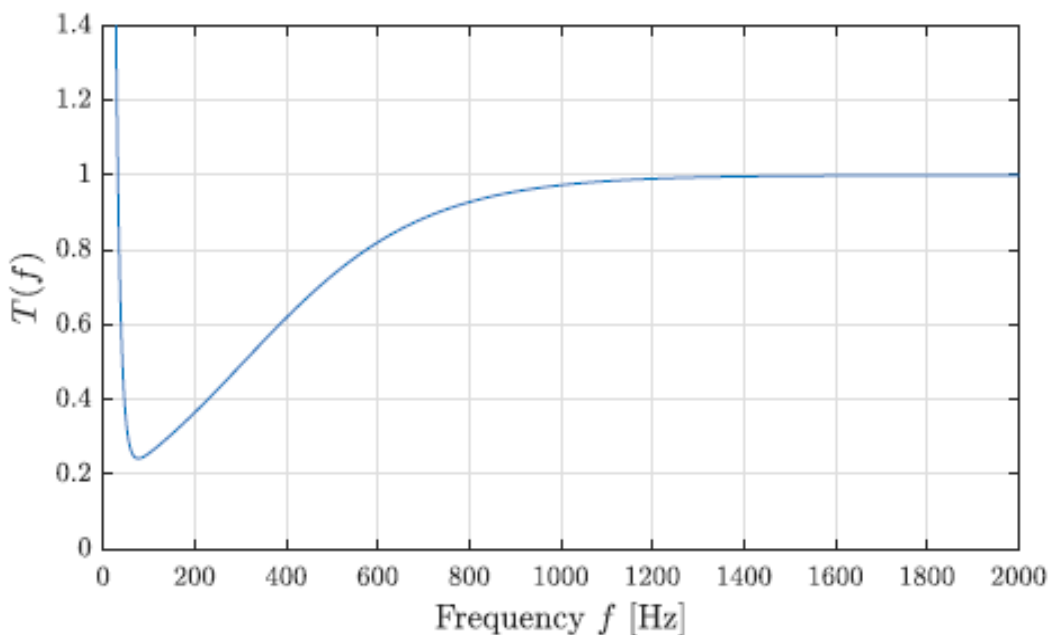
όπου $S(f)$ είναι το αμφίπλευρο φάσμα και $S(0)$ είναι η συνιστώσα DC. Ωστόσο, καθώς η κυματομορφή φωτός είχε ήδη κανονικοποιηθεί στο μπλοκ A, η κανονικοποίηση αυτή είναι περιττή, καθώς $S(0) = 1$, για οποιαδήποτε σωστά κανονικοποιημένη κυματομορφή με σωστά υλοποιημένο DFT. Η έξοδος του Μπλοκ B είναι το κανονικοποιημένο φάσμα συχνοτήτων $C(f)$.

Block C – Σταθμισμός με την ευαισθησία – Weighing by sensitivity

Το μπλοκ C αναλαμβάνει την στάθμιση του φάσματος συχνοτήτων $C(f)$, διαιρώντας με το κατώφλι ευαισθησίας της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης $T(f)$, το οποίο βρέθηκε πειραματικά όπως περιγράφεται στην **Ενότητα 2.3.4**, και δίνεται από τη σχέση:

$$T(f) = \frac{1}{1 + e^{-a(f-b)}} + 20e\left(-\frac{f}{10}\right) \quad (23)$$

όπου f είναι η συχνότητα σε Hz, $a = 0,00518$ s, $b = 306,6$ Hz [9]. Η $T(f)$ ορίζεται μόνο μέχρι 2000 Hz, και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 8. Κατώφλι ευαισθησίας διαμόρφωσης πλάτους για ημιτονοειδής κυματομορφή με ορατό στροβοσκοπικό φαινόμενο

Δεδομένου ότι το κατώφλι ευαισθησίας $T(f)$ αντιστοιχεί στο D_M της **Εξίσωσης 1** για ημιτονοειδούς διαμόρφωση, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι η ευαισθησία κορυφώνεται ≈ 77 Hz, όπου $D_M < 0,25$ για ημιτονοειδή διαμόρφωση που παράγει ορατό στροβοσκοπικό φαινόμενο. Άλλα σχήματα διαμόρφωσης παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4**. Κάτω από τα 32 Hz, το $T(f)$ γίνεται μεγαλύτερο από τη μονάδα, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν ημιτονοειδείς διαμορφώσεις που μπορούν να προκαλέσουν ορατό στροβοσκοπικό φαινόμενο. Επίσης, κάτω από 32 Hz, το $T(f)$ χάνει τη φυσική του σημασία δεδομένου ότι $D_M > 1$ αντιστοιχεί σε μια κατάσταση όπου το ελάχιστο της φωτεινής κυματομορφής θα ήταν αρνητικό, δηλαδή το φωτόμετρο θα εκπέμπει φωτόνια αντί να τα απορροφά, πράγμα αδύνατο. Κατά την προσέγγιση της μηδενικής συχνότητας, η $T(f)$ αυξάνεται πλησιάζοντας

την τιμή περίπου 20 και συνεπώς αγνοώντας ως επί το πλείστον τις συνιστώσες στις χαμηλές συχνότητες της φωτεινής κυματομορφής. Αυτό συνάδει με το γεγονός ότι στην πράξη το flicker είναι το κυρίαρχο TLA κάτω από τα 60 Hz [4]. Παρά το γεγονός ότι η συνιστώσα DC έχει πεπερασμένη τιμή στο T(0), απορρίπτεται πλήρως, όπως εξηγείται αργότερα στην ανάλυση του μπλοκ D. Μετά το 1 kHz η τιμή του κατώφλιου εγκαθίσταται περίπου στο 1. Η έξοδος του μπλοκ C είναι το σταθμισμένο φάσμα C(f)/T(f).

Block D – Πρόσθεση των συνιστωσών – Summation

Το μπλοκ D περιέχει μόνο το άθροισμα του σταθμισμένου φάσματος με την χρήση της απόστασης Minkowski. Το μέτρο που προκύπτει είναι το μέτρο στροβοσκοπικής ορατότητας, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$SVM = \sqrt[3.7]{\sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{C_i}{T_i}\right)^{3.7}} \quad (24)$$

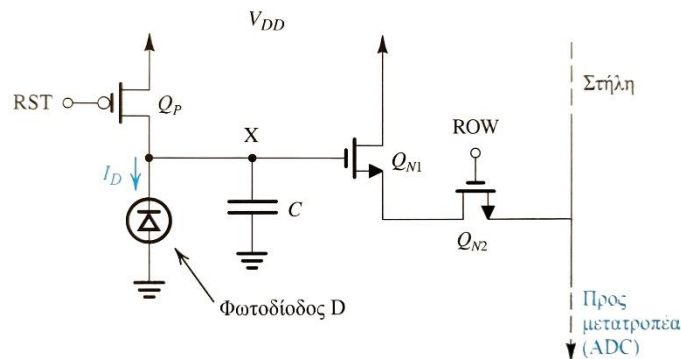
όπου C_i είναι το σχετικό πλάτος της i-οστής συνιστώσας του μονόπλευρου φάσματος συχνοτήτων και T_i είναι το αντίστοιχο κατώφλι ορατότητας για ημιτονοειδή διαμόρφωση [9] [7].

Στο IEC TR 63158 [9] ο δείκτης του αθροίσματος φτάνει μέχρι το άπειρο, αλλά η συχνότητα της υψηλότερης συνιστώσας δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2000 Hz, ανεξάρτητα από την τιμή του δείκτη. Ως εκ τούτου, το μέγιστο του δείκτη i πρέπει να αντιστοιχεί στα 2000 Hz, ενώ i = 0 αντιστοιχεί στην συνιστώσα DC με 0 Hz, η οποία απορρίπτεται συνεπώς στην άθροιση, καθώς το άθροισμα αρχίζει από i = 1. Στην πράξη, ο δείκτης καθορίζεται από την ανάλυση συχνότητας Δf του FFT, με μια αύξηση στο i να αντιστοιχεί σε μια αύξηση της συχνότητας κατά ένα Δf. Τόσο η IEC όσο και η CIE συνιστούν τη χρήση αλγορίθμων εύρεσης κορυφών αντί της άθροισης όλων συνιστωσών, με ελάχιστη απόσταση 1 Hz μεταξύ των κορυφών [4] [9].

2.6 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ CMOS

Ο αισθητήρας εικόνας CMOS είναι το βασικό στοιχείο ψηφιοποίησης διαστάσεων οπτικής πληροφορίας και χρησιμοποιείται στις σύγχρονες φωτογραφικές μηχανές και σε πολλές επιστημονικές εφαρμογές.

Μία εικόνα συντίθεται από μία δισδιάστατη διάταξη εικονοστοιχείων, ευρέως γνωστών ως pixels, όπου το κάθε pixel υποδεικνύει την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στη θέση που αυτό καταλαμβάνει στη διάταξη. Ένας αισθητήρας εικόνας CMOS αποτελείται από μία δισδιάστατη διάταξη κυκλωμάτων pixel, όπου το κύκλωμα κάθε pixel μετρά την ένταση φωτός και έχει συνήθως μέγεθος λίγα τετραγωνικά μικρόμετρα (micron). Τα κυκλώματα των pixel προσπελάζονται μέσω ενός συνόλου οριζόντιων γραμμών προσπέλασης σειράς (της διάταξης), ανάλογων με τις γραμμές λέξης στις διατάξεις μνήμης, οι τιμές έντασης του φωτός διαβάζονται μέσω ενός συνόλου κατακόρυφων γραμμών, ανάλογων με τις γραμμές bit μιας διάταξης μνήμης. Ωστόσο, στην περίπτωση των αισθητήρων CMOS, οι κατακόρυφες γραμμές μεταφέρουν αναλογικά σήματα.



Εικόνα 9. Κύκλωμα ενός pixel σε αισθητήρα εικόνας CMOS

Το κύκλωμα για ένα pixel, το οποίο αποκαλείται αισθητήρας ενεργού pixel (active pixel sensor, APS), απεικονίζεται στην **Εικόνα 9**. Κύκλωμα ενός pixel σε αισθητήρα εικόνας CMOS Πριν από την καταγραφή μιας εικόνας, το τρανζίστορ Q_p επαναφέρει τον κόμβο X σε υψηλή στάθμη τάσης. Έτσι, η φωτοδιόδος D πολώνεται ανάστροφα και το ρεύμα της, I_D , γίνεται ουσιαστικά ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος ανίχνευσης σήματος T , η εκφόρτιση της παρασιτικής χωρητικότητας του πυκνωτή C από το ρεύμα I_D επιφέρει πτώση τάσης κατά ΔV στον κόμβο X . Αυτή η μεταβολή τάσης διαβάζεται στη συνέχεια και στέλνεται στη γραμμή στήλης, μέσω της ενεργοποίησης του τρανζίστορ-ακόλουθου πηγής Q_{N1} και μιας πηγής ρεύματος (συνδεδεμένης στη γραμμή στήλης, δεν παρουσιάζεται στο σχήμα) και ενός τρανζίστορ-διακόπτη Q_{N2} . Το προκύπτον αναλογικό σήμα στη γραμμή στήλης τροφοδοτείται κατόπιν σε έναν μετατροπέα αναλογικού-σε-ψηφιακό (ADC), προκειμένου να παρέχει μία ψηφιακή τιμή η οποία αντιστοιχεί στην ένταση φωτός του συγκεκριμένου pixel. Τα ψηφιακά δεδομένα που παράγονται κατ' αυτό τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ψηφιακή επεξεργασία της καταγραφόμενης εικόνας [21].

2.7 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ – ΘΕΩΡΗΜΑ NYQUIST-SHANNON

Το θεώρημα της δειγματοληψίας για σήματα πεπερασμένης ενέργειας μπορεί να ερμηνευθεί με δύο τρόπους, που συνδέονται με τα ονόματα Nyquist και Shannon [22].

1. Κάθε σήμα πεπερασμένης ενέργειας και εύρους ζώνης «W Hz» μπορεί να ανακτηθεί πλήρως, με απλό τρόπο, από τη γνώση των δειγμάτων του που λαμβάνονται με συχνότητα δειγματοληψίας τουλάχιστον $2W$ ανά δευτερόλεπτο (ρυθμός Nyquist). Επιπλέον, η ανάκτηση είναι σταθερή, με την έννοια ότι ένα μικρό σφάλμα στην ανάγνωση των τιμών των δειγμάτων παράγει ένα αντίστοιχα μικρό σφάλμα στο ανακτημένο σήμα.
2. Κάθε ακολουθία αριθμών με τετραγωνική άθροιση μπορεί να μεταδοθεί με ρυθμό $2W$ ανά δευτερόλεπτο σε ένα ιδανικό κανάλι εύρους ζώνης «W Hz», με την αναπαράσταση των δειγμάτων ενός εύκολα κατασκευάσιμου ζωνο-περιορισμένου σήματος πεπερασμένης ενέργειας.

Παράλληλα, έχει αποδειχθεί στο [22] ότι:

1. η σταθερή δειγματοληψία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με ρυθμό μικρότερο από τον Nyquist
2. τα δεδομένα δεν μπορούν να μεταδοθούν ως δείγματα με ρυθμό υψηλότερο από το Nyquist

ανεξάρτητα από τη θέση των στιγμών δειγματοληψίας, τη φύση του συνόλου των συχνοτήτων που καταλαμβάνουν τα σήματα ή τη μέθοδο κατασκευής. Τα συμπεράσματα αυτά ισχύουν όχι μόνο για σήματα πεπερασμένης ενέργειας, αλλά και για περιορισμένα σήματα. Με γνώμονα τα παραπάνω, και σε συνδυασμό με τον την **Ενότητα 2.3.4**, πως το SVM έχει οριστεί μέχρι τα 2000Hz, είναι αναγκαία η δειγματοληψία σε ρυθμό τουλάχιστον 4000Hz, ή στην περίπτωση μας 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο, ώστε να ληφθεί η απαραίτητη πληροφορία σε συχνότητες έως 2000Hz, όπου υπολογίζεται το SVM. Βάση της **Ενότητας 2.3.3**, η φωτεινή πάλμωση είναι ορατή μέχρι την περιοχή των 80Hz, οπότε ο ρυθμός δειγματοληψίας 4000Hz, υπερκαλύπτει την ανάγκη για πλήρη καταγραφή του.

2.7.1 Aliasing

Το aliasing είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται στην επεξεργασία σήματος και την ψηφιακή απεικόνιση. Αναφέρεται στην παραμόρφωση που προκύπτει όταν ένα συνεχές σήμα ή εικόνα δειγματοληπτείται ή ψηφιοποιείται σε πολύ χαμηλή ανάλυση ή συχνότητα, με αποτέλεσμα παραπλανητικές ή εσφαλμένες αναπαραστάσεις.

Στην περίπτωση μας, το φαινόμενο είναι αρκετά πιθανό, καθώς ο ρυθμός λήψης εικόνων από τους ψηφιακούς αισθητήρες, είναι αρκετά μικρότερος από τους διαδεδομένους και συμβατικούς αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία φωτισμού, όπως αισθητήρες με φωτοδίοδο και τα φασματομέτρα. Για παράδειγμα, οι ψηφιακοί αισθητήρες CMOS της παρούσας εργασίας, έχουν την δυνατότητα λήψης χιλιάδων εικόνων ανά δευτερόλεπτο, που μεταφράζεται σε συχνότητα δειγματοληψίας μερικών kHz, σε αντίθεση με τους συμβατικούς αισθητήρες που έχουν δυνατότητες δειγματοληψίας στο εύρος των MHz.

Για την αντιμετώπιση του, μετρήθηκαν σήματα φωτός με συχνότητες μικρότερες από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας και παράλληλη ικανοποίηση του θεωρήματος Nyquist-Shannon.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουν οι διαδικασίες, οι πειραματικές διατάξεις, και οι τρόποι επεξεργασίας και υπολογισμού των διαφόρων μεγεθών που αφορούν τα προσωρινά φωτεινά τεχνουργήματα (TLA).

Αρχικά, αναπτύχθηκε μια πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Φωτοτεχνίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μέσα από αυτές τις μετρήσεις βρέθηκαν τα όρια του ψηφιακού αισθητήρα CMOS. Παράλληλα αναπτύχθηκε λογισμικό για την επεξεργασία των δεδομένων και υπολογισμό των φαινομένων. Η διάταξη και τα αποτελέσματα της θα παρουσιαστούν στην παρούσα διπλωματική.

Σε δεύτερο στάδιο, στα πλαίσια της κοινής συνεργασίας στο κονσόρτσιουμ «Metrology for Temporal Light Modulation (MetTLM) EMPIR 20NRM01», πραγματοποιήθηκαν κοινές μετρήσεις στο «Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Φυσικής και Μετρήσεων Γερμανίας - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)» στην πόλη Μπράουνσβαϊγκ, στην Κάτω Σαξονία της Γερμανίας. Οι διατάξεις, διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων, τα αποτελέσματα και τα τελικά συμπεράσματα από το την συνεργασία βοήθησαν στα τελικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής αλλά και το παραδοτέο έργο προς το κονσόρτσιουμ.

Καινοτομία στην χρήση ψηφιακών αισθητήρων για την καταμέτρηση της φωτεινής πάλμωσης
Οι πραγματικές σκηνές και οι χώροι της καθημερινής ζωής, όπως τα γραφεία και οι σήραγγες, συχνά φωτίζονται με συνδυασμό πολλαπλών πηγών φωτός και το φως της ημέρας, παρουσιάζοντας ένα πολύπλοκο μοτίβο φωτεινότητας υψηλής αντίθεσης και ανομοιογενή κατανομή των παραμέτρων της χρονικής διαμόρφωσης-TLM των πηγών. Η χαρτογράφηση του TLM ενός τέτοιου περιβάλλοντος θα απαιτούσε πολλαπλές μετρήσεις με μια συσκευή μέτρησης της εκάστοτε πηγής φωτισμού. Τέτοιες διαδικασίες μέτρησης είναι αναποτελεσματικές και δεν παρέχουν πλήρη αξιολόγηση όσον αφορά την αντίληψη της επαλληλίας της χρονικής διαμόρφωσης πηγών φωτισμού σε ένα χώρο. Οι πολυφασματικές κάμερες θα μπορούσαν να χαρτογραφήσουν τη χωρικά κατανομημένη χρονική διαμόρφωση όπως φαίνεται από τη θέση ενός παρατηρητή. Αυτό παρέχει μια πολύ υποσχόμενη προσέγγιση για τη χαρτογράφηση χρονικής διαμόρφωσης στον χώρο και, ως εκ τούτου, την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα προσωρινά φωτεινά τεχνουργήματα – TLA, για πολύπλοκα φωτισμένες σκηνές. Αν και οι εμπορικοί αισθητήρες εικόνας τελευταίας τεχνολογίας, που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές κάμερες και συσκευές μέτρησης και απεικόνισης φωτεινότητας (Imaging Luminance Measurement Devices - ILMD), περιέχουν ήδη γρήγορες λειτουργίες που παρέχουν την απαιτούμενη χρονική ανάλυση, δεν υπάρχουν ακόμη μέθοδοι για την αξιολόγηση της χωρικά διαχωρισμένης TLM.

Μέσα από το πρόγραμμα του MetTLM, το Εργαστήριο Φωτοτεχνίας του ΕΜΠ σε συνεργασία με το Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Φυσικής και Μετρήσεων της Γερμανίας, πρωτοπορούν στην έρευνα του συγκεκριμένου πεδίου για ανάπτυξη μεθόδων αξιολόγησης της χρονικής διαμόρφωσης σε πολύπλοκα φωτισμένους χώρους.

3.1 ΕΡΓΑΛΕΙΟΘΗΚΕΣ MATLAB

Στην παρούσα παράγραφο, θα περιγράψουν τα διαθέσιμα toolbox για τον υπολογισμό του PstLM και του SVM, τα οποία έχουν συνταχθεί βάση των προτύπων για τα συγκεκριμένα μεγέθη.

3.1.1 Εργαλειοθήκη για καταμέτρηση PstLM - Light flicker assessment toolbox

Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη [17] έχει συνταχθεί βάση του προτύπου IEC TR 61547-1 [10]. Έχει ως σκοπό την αξιολόγηση της σοβαρότητας της φωτεινής πάλμωσης των κυματομορφών φωτός με βάση το μέγεθος PstLM.

Η κύρια συνάρτηση δέχεται δύο εισόδους: ένα διάνυσμα που περιέχει δεδομένα της φωτεινής κυματομορφής και τη συχνότητα δειγματοληψίας της κυματομορφής σε Hz. Η συνάρτηση επιστρέφει δύο εξόδους: τη μετρική βραχυπρόθεσμου δείκτη σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης PstLM και το μέγιστο του στιγμιαίου βαθμού φωτεινής πάλμωσης Pst.

Η συνάρτηση ξεκινά με την κανονικοποίηση της έντασης φωτισμού της κυματομορφής εισόδου χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή της. Στη συνέχεια, η κυματομορφή φιλτράρεται χρησιμοποιώντας ένα ζωνοπερατό φίλτρο και ένα φίλτρο στάθμισης (Block 3), ώστε να μιμηθεί την απόκριση του ανθρώπινου ματιού. Το φιλτραρισμένο σήμα τετραγωνίζεται και εξομαλύνεται (μπλοκ C) χρησιμοποιώντας ένα χαμηλοπερατό φίλτρο πρώτης τάξης και υπολογίζεται ο στιγμιαίος δείκτης φωτεινής πάλμωσης Pinst.

Η μέγιστη τιμή του Pinst προσδιορίζεται στη συνέχεια μετά από έναν μεταβατικό χρόνο και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μιας στατιστικής αξιολόγησης. Η τελική έξοδος της συνάρτησης είναι το ο βραχυπρόθεσμος δείκτης σοβαρότητας φωτεινής πάλμωσης PstLM, ο οποίος υπολογίζεται με τη χρήση ενός τύπου που περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της στατιστικής αξιολόγησης.

Η εργαλειοθήκη περιλαμβάνει ακόμα δύο συναρτήσεις. Η μια χρησιμοποιείται για τη δοκιμή του συντελεστή κλιμάκωσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC TR 61547-1 [16]. Η άλλη καθορίζει το επίπεδο βάθους διαμόρφωσης των ημιτονοειδών, ορθογώνιων και τριγωνικών κυματομορφών που δίνουν τιμή PstLM ίση με το 1. Αυτό το σενάριο είναι χρήσιμο για την κατανόηση των ορίων του μεγέθους PstLM και μπορεί να βοηθήσει στο σχεδιασμό φωτεινών κυματομορφών για συγκεκριμένη φωτεινή πάλμωση.

3.1.2 Εργαλειοθήκη καταμέτρησης SVM - Stroboscopic effect visibility measure toolbox

Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη [23] έχει συνταχθεί βάση του τεχνικού σημειώματος CIE TN 006 [4]. Έχει ως σκοπό τον υπολογισμό του μέτρου ορατότητας του στροβοσκοπικού φαινομένου SVM μιας κυματομορφής φωτός.

Η συνάρτηση λαμβάνει δύο παραμέτρους εισόδου, τη φωτεινή κυματομορφή και τη διάρκειά της σε δευτερόλεπτα, και επιστρέφει την τιμή του SVM ως έξοδο. Η συνάρτηση εκτελεί πρώτα ορισμένους ελέγχους στις παραμέτρους εισόδου για να διασφαλίσει ότι πληρούν ορισμένες απαιτήσεις. Στη συνέχεια υπολογίζει το φάσμα της κυματομορφής εισόδου χρησιμοποιώντας FFT, παραθυροποίηση - windowing και μηδενισμού - nulling. Η συνάρτηση προσδιορίζει τις μέγιστες τιμές του φάσματος και τις σταθμίζει με το κατώφλι ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού για τον υπολογισμό της τιμής SVM.

Η συγκεκριμένη εργαλειοθήκη παρέχει και άλλες δυνατότητες. Μία είναι ο σχεδιασμός της καμπύλης κατωφλίου ορατότητας του SVM. Επίσης μπορεί να υπολογίσει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές μιας παλμοδιαμορφωμένης κυματομορφής, για δεδομένο βάθος διαμόρφωσης, κύκλο λειτουργίας – duty cycle και μέσο επίπεδο.

3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΜΠ

Στις μετρήσεις του ΕΜΠ, έγινε χρήση του απαραίτητου εξοπλισμού, για την διαδικασία των μετρήσεων. Έγιναν δύο φάσεις μετρήσεων. Στην παρούσα ενότητα, θα αναλυθεί ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και η μεθοδολογία των μετρήσεων.

3.2.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που περιγράφεται με αυτό το μέρος, ανήκει στο εργαστήριο Φωτοτεχνίας του ΕΜΠ. Αξιοποιήθηκε ανάλογος των αναγκών των μετρήσεων κατά την διεξαγωγή μετρήσεων.

Αισθητήρας CMOS - Κάμερα Ximea MC050CG-SY

Είναι μια συμπαγής κάμερα σχεδιασμένη [24] για χρήση σε διάφορες βιομηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές. Διαθέτει αισθητήρα CMOS 5 megapixel με global shutter, ικανό να καταγράφει εικόνες με ανάλυση έως και 2560 x 2048 pixel με ρυθμό λήψης εικόνων έως και 76 εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Σε μικρότερες αναλύσεις είναι ικανή να αυξήσει τον ρυθμό λήψης φωτογραφίας έως και 4000 εικόνων το δευτερόλεπτο [25]. Η έγχρωμη έκδοση της διαθέτει δυναμικό εύρος από 8 bit έως και 12 bit ανά pixel. Διαθέτει το δικό της πρόγραμμα καταγραφής εικόνων, καθώς και δυνατότητα λήψης με εντολές από το πρόγραμμα της MatLab. Συνδέεται στον υπολογιστή με την χρήση «USB 3.1 Gen 1».

Παλμογράφος - Tektronix DPO 4034

Είναι ένας ψηφιακός παλμογράφος [26] φωσφόρου (DPO) της Tektronix, μιας εταιρείας που ειδικεύεται στον εξοπλισμό δοκιμών και μετρήσεων. Διαθέτει είσοδο 4 καναλιών και εύρος ζώνης 350 MHz Περιλαμβάνει επίσης χαρακτηριστικά όπως η καταγραφή κυματομορφών, οι αυτοματοποιημένες μετρήσεις και οι προηγμένες επιλογές σκανδαλισμού - triggering

Γεννήτρια κυματομορφών - AIM TTI TGA1241

Είναι μια γεννήτρια κυματομορφών [27] που παράγεται από την Thurlby Thandar Instruments (TTi). Πρόκειται για όργανο ενός καναλιού με μέγιστη συχνότητα εξόδου 240 MHz και μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 1,2 GS/s. Η TGA1241 μπορεί να παράγει ημιτονοειδείς, τετραγωνικές, ράμπες, παλμούς, θόρυβο και αυθαίρετες κυματομορφές και διαθέτει ενσωματωμένες δυνατότητες διαμόρφωσης, συμπεριλαμβανομένων των AM, FM, PM και FSK. Περιλαμβάνει επίσης μια σειρά προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως η αλληλουχία κυματομορφών, η λειτουργία ριπής και η επεξεργασία αυθαίρετων κυματομορφών. Το όργανο μπορεί να ελεγχθεί μέσω συνδέσεων USB, GPIB ή LAN.

Πηγή φωτισμού LED

Ένα γενικό τσιπ LED (δίοδος εκπομπής φωτός) αποτελείται συνήθως από ένα μικρό, λεπτό πλακίδιο ημιαγωγού κατασκευασμένο από υλικό όπως το αρσενίδιο του γαλλίου, το φωσφίδιο του γαλλίου ή το νιτρίδιο του ινδίου και του γαλλίου. Το πλακίδιο προστίθεται με προσμίξεις για να δημιουργηθεί μια ένωση p-n, η οποία είναι η περιοχή όπου συναντώνται τα θετικά και τα αρνητικά φορτία. Όταν εφαρμόζεται τάση στην επαφή p-n, τα ηλεκτρόνια και οι οπές συνδυάζονται, εκπέμποντας φως κατά τη διαδικασία. Το τσιπ συχνά επικαλύπτεται με ένα στρώμα φωσφόρου που μετατρέπει το μπλε ή υπεριώδες φως που εκπέμπεται από το τσιπ σε άλλα χρώματα, όπως κόκκινο, πράσινο ή λευκό. Στη συνέχεια, το

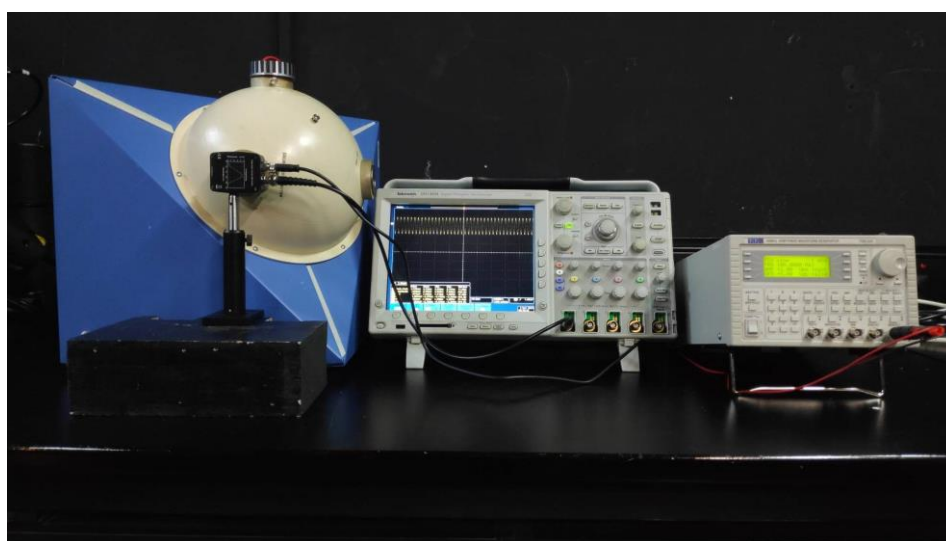
τσιπ LED τοποθετείται σε μια συσκευασία που παρέχει ηλεκτρικές επαφές και προστατεύει το τσιπ από ζημιές και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Φωτοδίοδος-PDA10A2

Ο PDA10A2 είναι ένας ενισχυμένος αισθητήρας πυριτίου σχεδιασμένος για την ανίχνευση φωτεινών σημάτων που κυμαίνονται από 200 έως 1100 nm. Μια ρυθμισμένη έξοδος οδηγεί αντιστάσεις φορτίου 50 Ω έως 5 V, με εύρος συχνοτήτων 0-150MHz. Κατασκευή της εταιρίας Thorlabs, επιτρέπει την άνετη τοποθέτηση εξωτερικών οπτικών, φίλτρων φωτός, διαφραγμάτων, καθώς και την παροχή ενός εύκολου μηχανισμού τοποθέτησης με τη χρήση των εξαρτημάτων συναρμολόγησης κλωβού της Thorlabs. Είναι ιδανική για τη μέτρηση τόσο παλμικών όσο και πηγών συνεχούς φωτός. Το PDA10A2 περιλαμβάνει μια φωτοδίοδο PIN με αντίστροφη πόλωση, η οποία συνδυάζεται με έναν ενισχυτή «transimpedance» (μετατροπέας ρεύματος σε τάση) σταθερού κέρδους.

Σφαίρα ολοκλήρωσης Ulbricht

Η σφαίρα Ulbricht είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται στη φωτομετρία για τη μέτρηση της συνολικής ποσότητας φωτός που εκπέμπεται από μια πηγή, ανεξάρτητα από την κατεύθυνσή της. Πήρε το όνομά της από τον εφευρέτη της, τον Γερμανό φυσικό Johann Ulbricht. Η σφαίρα Ulbricht αποτελείται από μια κοίλη σφαίρα επικαλυμμένη με ένα διάχυτο, λευκό, ανακλαστικό υλικό στην εσωτερική της επιφάνεια. Το φως από την πηγή εισέρχεται στη σφαίρα μέσω ενός μικρού ανοίγματος και λόγω των ιδιοτήτων διάχυτης ανάκλασης της εσωτερικής επιφάνειας, το φως διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο εσωτερικό της σφαίρας. Ως αποτέλεσμα, το φως που φτάνει στον ανιχνευτή κατανέμεται ομοιόμορφα και η συνολική ποσότητα του φωτός που εκπέμπεται από την πηγή μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια. Η σφαίρα Ulbricht χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση της συνολικής ροής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από λαμπτήρες και άλλες πηγές φωτός. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν εργάζεται με πηγές που εκπέμπουν φως προς όλες τις κατευθύνσεις, όπως οι σφαιρικοί ή κυλινδρικοί λαμπτήρες, επειδή εξασφαλίζει ότι συλλαμβάνεται και μετράται όλο το εκπεμπόμενο φως.

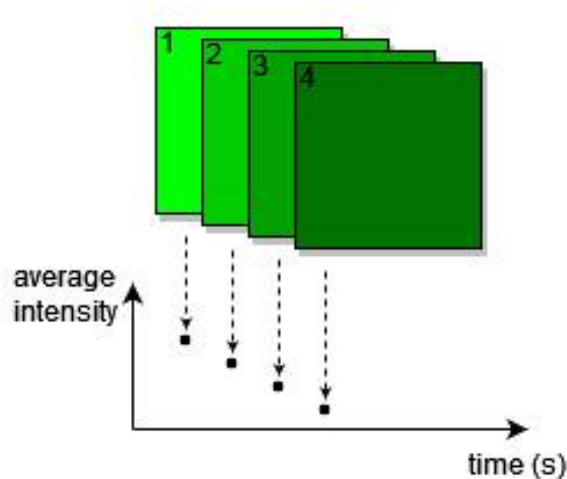


Εικόνα 10. Πάγκος εργασίας για μέτρηση στο Εργαστήριο Φωτοτεχνίας ΕΜΠ. Περιλαμβάνει: Σφαίρα ολοκλήρωσης Ulbricht, φωτοδίοδος, παλμογράφος και γεννήτρια κυματομορφών.

3.2.1.1 Λήψη φωτογραφιών με Ximea MC050CG-SY

Ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα λήψης δεδομένων, με την χρήση εργαλειοθηκών και εντολών στο περιβάλλον της MatLab. Αναγκαία είναι η εγκατάσταση του «Image Acquisition Toolbox» [28]. Αρχικά, με την χρήση του προγράμματος που παρέχεται από τον κατασκευαστή, βρίσκουμε τις διαστάσεις και την θέση της περιοχής ενδιαφέροντος και τον αναγκαίο χρόνο έκθεσης ώστε να πετύχουμε τα αναγκαία λήψη εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Περιοριστήκαμε σε διαστάσεις 144 pixel πλάτος και 8 pixel ύψος, με χρόνο έκθεσης 150 μικροδευτερόλεπτα, ώστε να πετύχουμε αξιόπιστα 4000 εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Έτσι ικανοποιούμε το θεώρημα Nyquist που αναλύθηκε στην **Ενότητα 2.7**.

Στην συνέχεια, στο περιβάλλον της MatLab, εισήχθησαν οι παραπάνω παράμετροι. Τότε η κάμερα ενεργοποιείται και λαμβάνει μια ακολουθία εικόνων για ένα χρονικό διάστημα. Βρέθηκε πως για διαστήματα πάνω των 5 δευτερολέπτων, τα αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα. Στη συνέχεια επεξεργάζεται τις εικόνες για να εξάγει τη μέση ένταση για κάθε εικόνα, χρησιμοποιώντας μόνο το πράσινο κανάλι (pixel τα οποία καλύπτονται από το πράσινο μέρος του φίλτρου Bayer). Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την δημιουργία της κυματομορφή:



Εικόνα 11. Διάγραμμα δημιουργίας κυματομορφής με Ximea

Η επιλογή του πράσινου καναλιού έγινε για δύο λόγους. Αρχικά η απόκριση του πράσινου φίλτρου είναι κοντά στο τυποποιημένο φωτοπικό φίλτρο πάνω στο οποίο έχουν οριστεί τα μεγέθη που διερευνούμε. Παράλληλα το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο στο πράσινο φως και η αντίληψη του πράσινου φωτός μπορεί να επηρεάσει διάφορες πτυχές της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Έτσι η μέση τιμή του πράσινου καναλιού ανά εικόνα, αποτελεί την κυματομορφή που θα εξετασθεί. Τέλος αυτή η κυματομορφή θα τροφοδοτηθεί στους κώδικες υπολογισμού PstLM και SVM, που έχουν αναλυθεί στις ενότητες **3.1.1** και **3.1.2**.

3.2.1.2 Υπολογισμός Συχνότητας – Διακριτή Αυτοσυσχέτιση

$$r_{xx}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-n-1} x(k) \cdot x(k+n) \quad (25)$$

Η αυτοσυσχέτιση είναι μια στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ομοιότητας μεταξύ ενός σήματος και μιας καθυστερημένης εκδοχής του σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τον πολλαπλασιασμό του σήματος με μια καθυστερημένη εκδοχή του σε διαφορετικές χρονικές υστερήσεις και το άθροισμα των προϊόντων σε ένα καθορισμένο εύρος υστερήσεων. Αυτό δημιουργεί μια συνάρτηση συσχέτισης που περιγράφει την ομοιότητα μεταξύ του σήματος και των καθυστερημένων εκδόσεών του. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της περιοδικότητας ενός σήματος, η οποία μπορεί να είναι χρήσιμη σε εφαρμογές όπως το φιλτράρισμα σημάτων, η μείωση του θορύβου και η εξαγωγή χαρακτηριστικών, όπως η συχνότητα στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε κώδικας ο οποίος υπολογίζει την συχνότητα του σήματος φωτός από τις φωτογραφίες των αισθητήρων CMOS. Αρχικά υπολογίζει την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `xcorr`) του σήματος φωτός, με τον ρυθμό λήψης εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Στη συνέχεια θέτει μια τιμή κατωφλίου για να αποκλείσει τις εξαιρετικά χαμηλές τιμές που προκαλούνται από το θόρυβο του σήματος.

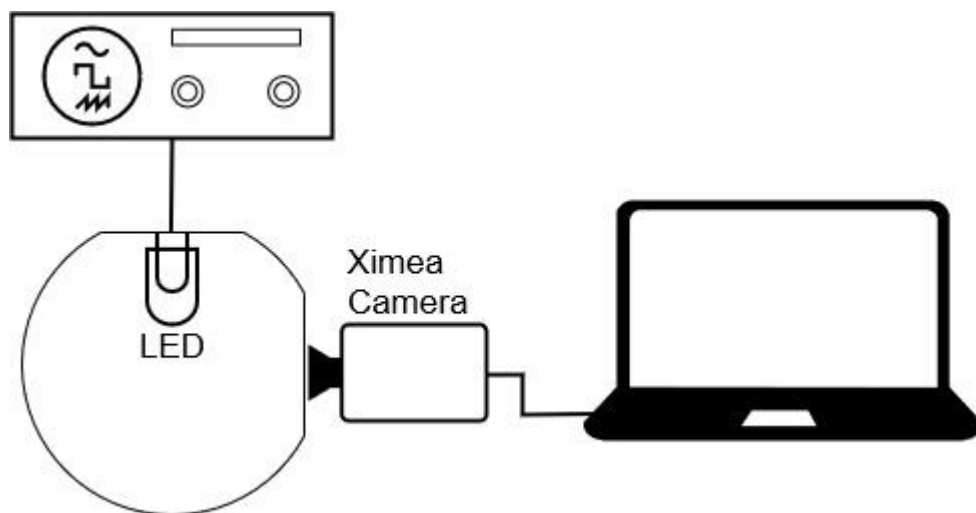
Στη συνέχεια σχεδιάζεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της χρονικής υστέρησης και αποκλείει τιμές κάτω από το κατώφλι. Έπειτα, βρίσκει τις κορυφές στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που βρίσκονται πάνω από το κατώφλι και υπολογίζει τη μέση διαφορά μεταξύ των θέσεων των κορυφών. Αυτή η τιμή διαιρείται με τον ρυθμό εικόνων ανά δευτερόλεπτο για να ληφθεί η περίοδος του σήματος, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της συχνότητας.

3.2.2 Μετρήσεις – Διατάξεις

Στο εργαστήριο Φωτοτεχνίας ΕΜΠ, πραγματοποιήθηκαν δύο σύνολα μετρήσεων, ένα πριν την επίσκεψη στο ΡΤΒ και ένα μετά. Το πρώτο είχε ως στόχο την διερεύνηση των δυνατοτήτων της κάμερας Ximea MC050CG-SY και το δεύτερο την σύγκριση των αποτελεσμάτων της κάμερας με την φωτοδίοδο συνδεδεμένη στον παλμογράφο του εργαστηρίου.

3.2.2.1 Σύνολο πρώτο ΕΜΠ

Για το πρώτο σύνολο, δημιουργήθηκε μια διάταξη στην οποία τροφοδοτήθηκε ένα φωτιστικό LED με κυματομορφές διαφόρων συχνοτήτων και μορφών, με την χρήση της γεννήτριας κυματομορφών, ώστε να εξακριβωθούν οι δυνατότητες της κάμερας Ximea MC050CG-SY. Το φωτιστικό LED, χρώματος άσπρου, τοποθετήθηκε εντός μιας σφαίρας Ulbricht και σε μία από τις οπές της τοποθετήθηκε ο φακός της κάμερας. Δόθηκαν στην συνέχεια εντολές για διάφορες κυματομορφές από την γεννήτρια κυματομορφών, όπου κάθε μία από αυτές καταγράφηκε από την κάμερα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η πειραματική διάταξη:



Εικόνα 12. Πρώτη διάταξη εργαστηρίου Φωτοτεχνίας ΕΜΠ

Για την συγκεκριμένη διαδικασία παράχθηκαν από την γεννήτρια κυματομορφών οι παρακάτω κυματομορφές:

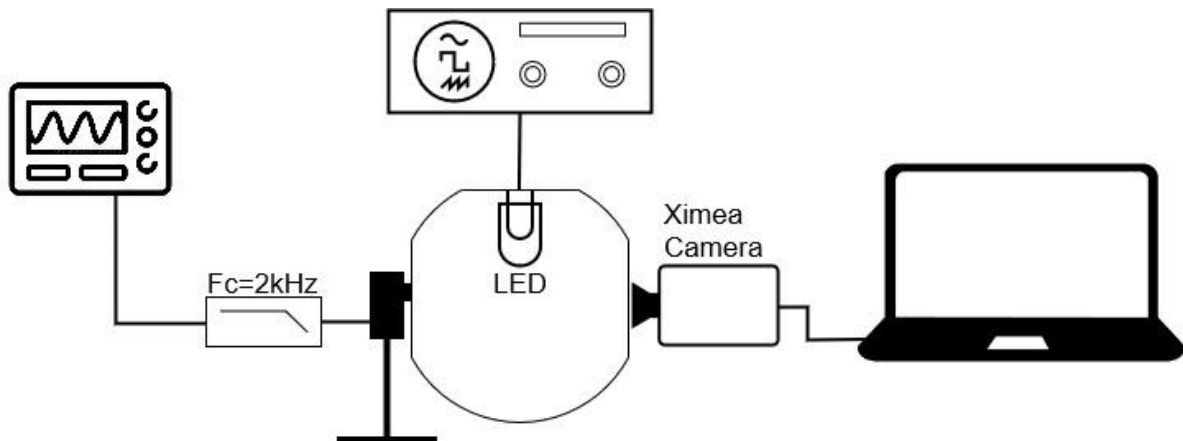
Συχνότητα (Hz)	Κυματομορφές		
5	Ημίτονο	Τριγωνική	Τετραγωνικός Παλμός
10	Ημίτονο	Τριγωνική	Τετραγωνικός Παλμός
15	Ημίτονο	Τριγωνική	Τετραγωνικός Παλμός
50	Ημίτονο	Τριγωνική	Τετραγωνικός Παλμός
100	Ημίτονο	Τριγωνική	Τετραγωνικός Παλμός
500	Ημίτονο	Τριγωνική	Τετραγωνικός Παλμός

Για την επεξεργασία τους και ανάλυση τους, ακολουθήθηκε η διαδικασία που έχει αναλυθεί στην **Ενότητα 3.2.1.1**.

3.2.2.2 Σύνολο δεύτερο ΕΜΠ

Για το δεύτερο σύνολο, δημιουργήθηκε μια διάταξη στην οποία τροφοδοτούσαμε ένα φωτιστικό LED με κυματομορφές διαφόρων συχνοτήτων και μορφών, με την χρήση της γεννήτριας κυματομορφών. Το φωτιστικό LED, το ίδιο με το πρώτο σύνολο στο ΕΜΠ, τοποθετήθηκε εντός μιας σφαίρας Ulbricht και σε μία από τις οπές της τοποθετήθηκε ο φακός της κάμερας, ενώ σε μια άλλη οπή τοποθετήθηκε η φωτοδίοδος. Στην συνέχεια η φωτοδίοδος συνδέθηκε με τον παλμογράφο και στο ενδιάμεσο τους ένα βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 2kHz. Δόθηκαν στην συνέχεια εντολές για διάφορες κυματομορφές από την γεννήτρια κυματομορφών, όπου κάθε μία από αυτές καταγράφηκε από την κάμερα και τον παλμογράφο.

Τα δεδομένα του παλμογράφου στην συνέχεια αποθηκεύτηκαν σε USB και μεταφέρθηκαν στον υπολογιστή, όπου θα χρησιμοποιηθούν στην MatLAB για τον υπολογισμό των μεγθών. Αφού εισαχθούν στην MatLAB, θα τροφοδοτηθούν στους κώδικες υπολογισμού PstLM και SVM, που έχουν αναλυθεί στις ενότητες 3.1.1 και 3.1.2. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η πειραματική διάταξη:



Εικόνα 13. Δεύτερη διάταξη εργαστηρίου Φωτοτεχνίας ΕΜΠ

Για την συγκεκριμένη διαδικασία παράχθηκαν από την γεννήτρια κυματομορφών οι παρακάτω κυματομορφές:

Συχνότητα (Hz)	Κυματομορφές	
50	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός
100	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός
200	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός
300	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός
400	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός
500	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός
1000	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός
2000	Ημίτονο	Τετραγωνικός Παλμός

Για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων από την κάμερα, ακολουθήθηκε η διαδικασία που έχει αναλυθεί στην **Ενότητα 3.2.1.1**.

3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ PTB

Στις μετρήσεις στο PTB, μεταφέρθηκε ο CMOS αισθητήρας του Εργαστηρίου Φωτοτεχνίας του ΕΜΠ, XIMEA MC050CG-SY, ώστε να συγκριθεί με τον αισθητήρα CMOS του PTB, IDT OS7. Κατά τις μετρήσεις στο PTB, έγιναν 4 σύνολα μετρήσεων, το κάθε ένα ξεχωριστό σε διάταξη και σκοπό.

Το πρώτο σύνολο επικεντρώθηκε στην εξακρίβωση πως οι δύο αισθητήρες CMOS έχουν την ικανότητα να υπολογίζουν την συχνότητα, σχήμα, βάθος διαμόρφωσης και τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) του φωτιστικού.

Το δεύτερο σύνολο επικεντρώθηκε στην διερεύνηση του ρυθμού δειγματοληψίας της κάμερας του PTB. Μετρήθηκαν δύο είδη κυματομορφών σε διάφορους ρυθμούς λήψης εικόνας. Στο συγκεκριμένο σύνολο η XIMEA MC050CG-SY δεν συμπεριλήφθηκε καθώς δεν είχε την δυνατότητα για πολύ ψηλούς ρυθμούς λήψης εικόνας.

Το τρίτο σύνολο είχε σκοπό την διερεύνηση κατά πόσο μπορούν οι δύο αισθητήρες CMOS να ξεχωρίσουν περισσότερες από μία κυματομορφές σε ένα πλάνο. Το σύνολο μοιράστηκε σε δύο μέρη. Το πρώτο επικεντρώθηκε στην διερεύνηση τριών κυματομορφών με την ίδια συχνότητα. Το δεύτερο μέρος επικεντρώθηκε στην διερεύνηση διαφορετικών συχνοτήτων σε ίδια και διαφορετική κυματομορφή.

Το τέταρτο και τελευταίο σύνολο είχε ως σκοπό αρχικά την προσομοίωση του πραγματικού κόσμου σε ελεγχόμενη σκηνή. Τέλος, μέρος του αποτελεί μετρήσεις από πραγματικές σκηνές στο περιβάλλον του κτηρίου «Einstein-Bau» καθώς και μετρήσεις από το ταμπλό δύο αυτοκινήτων. Στο συγκεκριμένο σύνολο η XIMEA MC050CG-SY συμπεριλήφθηκε σε ένα μέρος των μετρήσεων καθώς δεν είχε την δυνατότητα λήψης της αναγκαίας περιοχής για μέτρηση.

3.3.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που περιγράφεται σε αυτό το μέρος, ανήκει στο εργαστήριο «Φωτομετρίας και Φασματοραδιομετρίας» του PTB. Αξιοποιήθηκε ανάλογος των αναγκών των αναγκών των μετρήσεων κατά την κοινή διεξαγωγή μετρήσεων.

IDT OS7-S3

Η OS7-S3 [29] είναι μια κάμερα υψηλής ταχύτητας σχεδιασμένη για επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Διαθέτει αισθητήρα τεχνολογίας CMOS. Έχει δυνατότητα λήψης έως και 5000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο σε ανάλυση 1920 x 1080 pixels. Με χρήση μικρότερης ανάλυσης, μπορεί να αυξήσει τις εικόνες ανά δευτερόλεπτο. Διαθέτει global shutter και προηγμένες δυνατότητες ενεργοποίησης και συγχρονισμού, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές έρευνας, βιομηχανίας όσο και για χρήση πεδίου. Η συγκεκριμένη έχει εφοδιαστεί με 32GB DDR μνήμης. Οι εικόνες που καταγράφονται αποθηκεύονται στην μνήμη της κάμερας και στην συνέχεια μεταφέρονται στον υπολογιστή με την χρήση καλωδίου ethernet σε μορφή «.tiff».

Λήψη φωτογραφιών με IDT OS7-S3

Ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα λήψης δεδομένων, με την χρήση λογισμικού της κατασκευάστριας εταιρίας. Διαθέτει ρυθμίσεις για διαστάσεις και θέση περιοχής ενδιαφέροντος, χρόνο έκθεσης, διάρκεια, ρυθμό λήψης εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Για τους σκοπούς των μετρήσεων, θέταμε τη μεγαλύτερη δυνατή περιοχή ενδιαφέροντος, τον επιθυμητό ρυθμό λήψης εικόνων και το πρόγραμμα έθετε αυτόματα τον απαιτούμενο χρόνο έκθεσης. Έτσι ικανοποιούμε το θεώρημα Nyquist που αναλύθηκε στην **Ενότητα 2.7**. Αφού ληφθούν οι φωτογραφίες, με την χρήση σύνδεσης Ethernet, αποθηκεύαμε τις φωτογραφίες από την ενσωματωμένη μνήμη της κάμερας, στον χώρο αποθήκευσης του υπολογιστή.

Για την επεξεργασία των εικόνων, έχει αναπτυχθεί λογισμικό στο περιβάλλον της MatLab, το οποίο αρχικά μας επιτρέπει να επιλέξουμε από τις φωτογραφίες, την επιθυμητή περιοχή προς διερεύνηση. Στην συνέχεια προσπελάζει το σύνολο των φωτογραφιών, αποκόπτοντας την επιθυμητή περιοχή και υπολογίζοντας το μέσο επίπεδο φωτισμού των τριών τιμών RGB. Τότε ο μέσος όρος αυτός, αποτελεί την τιμή της κυματομορφής που θα εισαχθεί στους υπολογισμούς αργότερα. Όπως και στην **Ενότητα 3.2.1** με την κάμερα Ximea MC050CG-SY, έχει επιλεγεί το πράσινο κανάλι καθώς το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο στο πράσινο φως και η αντίληψη του πράσινου φωτός μπορεί να επηρεάσει διάφορες πτυχές της ανθρώπινης συμπεριφοράς.

Για τον υπολογισμό της συχνότητας, με την χρήση των φωτογραφιών από την συγκεκριμένη κάμερα, θα χρησιμοποιηθεί η ίδια τεχνική με την χρήση της Αυτοσυσχέτισης, όπως έχει αναλυθεί στην **Ενότητα 3.2.1**.

Gigahertz BTS256-EF

Το BTS256-EF [30] είναι ένα υψηλής ποιότητας και ευέλικτο εργαλείο για το χαρακτηρισμό των φασματικών και χρωματικών ιδιοτήτων των πηγών φωτός και των οθονών, καθιστώντας το κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στη βιομηχανία φωτισμού, την έρευνα και την ανάπτυξη και τον ποιοτικό έλεγχο. Έχει την δυνατότητα καταμέτρησης της ακτινοβολίας (σε W/m^2) και της έντασης φωτισμού (σε lux), καθώς και τη φασματική κατανομή ισχύος μιας φωτεινής πηγής. Παράλληλα μπορεί να μετρήσει τα δύο μεγέθη προς διερεύνηση, PstLM και SVM καθώς και συχνότητα, βάθος διακύμανσης και δείκτη φωτεινής πάλμωσης. Διαθέτει δυνατότητα σύνδεσης με υπολογιστή μέσω USB για αποθήκευση των μετρήσεων. Έχει συχνότητα δειγματοληψίας 1kHz – 100kHz για μετρήσεις έως 180 δευτερολέπτων. Έχει κατασκευαστεί ώστε να ικανοποιεί τις προδιαγραφές και οδηγίες των προτύπων CIE:TN-006 [4], CIE:TN-012 [8], IEC TR 61547 [10], IEC TR 63158 [9].

Viso systems LabFlicker

Το LabFlicker [31] είναι ένα ημι-φορητό εργαλείο μέτρησης φωτεινής πάλμωσης για όλες τις κοινές πηγές φωτός. Εμφανίζονται όλα τα σχετικά γραφικά και μετρήσεις φωτεινής πάλμωσης συμπεριλαμβανομένων και του SVM και PstLM, συχνότητας, βάθους διακύμανσης και δείκτη φωτεινής πάλμωσης. Έχει συχνότητα δειγματοληψίας έως και 10kHz, δεδομένου ότι καταμετρητέ και το PstLM.

Image Engineering Vega Illumination Device

Η πηγή φωτός Vega [32] αποτελεί μια λύση για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας με εξαιρετικά μικρούς χρόνους έκθεσης. Είναι σταθεροποιημένη σε θερμοκρασία, χρησιμοποιεί LED που οδηγούνται με τεχνολογία συνεχούς ρεύματος (DC) και η ένταση ρυθμίζεται από την ρύθμιση της ροής ρεύματος. Διαθέτουν το δικό τους κουτί διαχείρισης (control box) το οποίο είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία ρεύματος και σήματος στην συσκευή φωτός. Το κουτί

διαχείρισης συνδέεται στον υπολογιστή και με την χρήση λογισμικού δίνονται οι επιθυμητές εντολές για την έξοδο φωτός. Διαθέτει δυνατότητα εξόδου σε κυματομορφές ημιτόνου και τριγώνου σε συχνότητες 10Hz - 500Hz, και τετραγωνικού παλμού σε συχνότητες 1Hz - 1000Hz και duty cycle 1% - 99%.

Fairy Lights

Γνωστά ως χριστουγεννιάτικα φώτα, είναι ένας τύπος διακοσμητικού φωτισμού που αποτελείται από μικρούς λαμπτήρες συνδεδεμένους με ένα καλώδιο. Οι λαμπτήρες είναι συνήθως χαμηλής ισχύος και εκπέμπουν ένα ζεστό, απαλό φως, συχνά σε ποικιλία χρωμάτων και σχεδίων. Λειτουργούν μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε φωτεινή ενέργεια μέσω της χρήσης ενός νήματος ή ενός LED. Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται από τα φωτάκια καθορίζεται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον λαμπτήρα, όπως ο τύπος του νήματος ή του LED και οι φωσφορίζοντες που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη του λαμπτήρα.

Λαμπτήρες αγοράς

Phillips Hue

Η Philips Hue είναι μια σειρά έξυπνων προϊόντων φωτισμού που επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν το χρώμα, τη φωτεινότητα και τον προγραμματισμό των φώτων τους από ένα smartphone, ένα tablet ή μια φωνητικά ελεγχόμενη συσκευή. Ο λαμπτήρας του εργαστηρίου είναι το φωτιστικό «Philips Smart Λάμπα LED, ντουί E27 και σχήμα A67 με ρυθμιζόμενο λευκό, 1200 lumen Dimmable». Οι λαμπτήρες Philips Hue μπορούν να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Philips Hue, σε συσκευές smartphone ή tablet, η οποία επιτρέπει στους χρήστες να ρυθμίζουν χρονοδιακόπτες, ένταση και χρώμα του φωτιστικού.

Incandescent

Ο λαμπτήρας πυρακτώσεως είναι ένας τύπος ηλεκτρικού φωτός που παράγει φως θερμαίνοντας ένα σύρμα πυράκτωσης σε υψηλή θερμοκρασία μέχρι να λάμψει. Το νήμα είναι συνήθως κατασκευασμένο από βολφράμιο, το οποίο έχει υψηλό σημείο τήξης και μπορεί να αντέξει τη θερμότητα που παράγεται από το ηλεκτρικό ρεύμα που το διαρρέει. Όταν το νήμα θερμαίνεται από το ηλεκτρικό ρεύμα, εκπέμπει ορατό φως καθώς και υπέρυθη ακτινοβολία και άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το χρώμα του φωτός που εκπέμπει ένας λαμπτήρας πυράκτωσης καθορίζεται από τη θερμοκρασία του νήματος και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο λαμπτήρα.

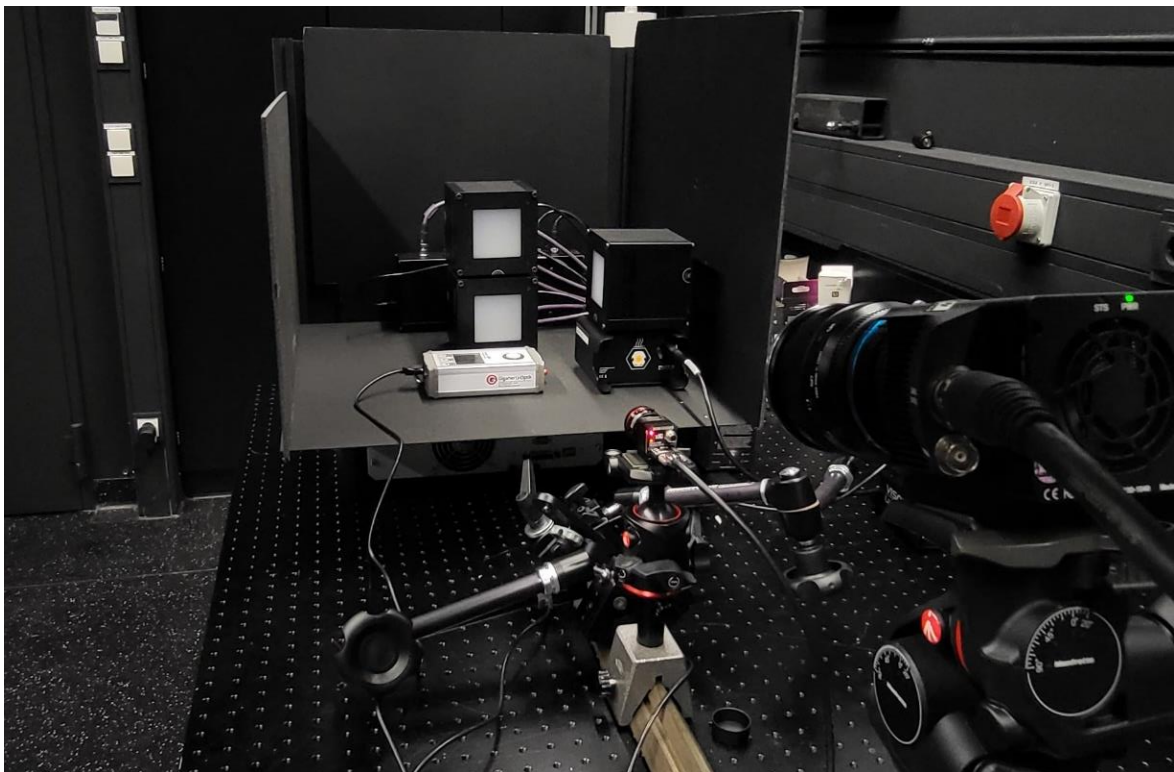
Οι λαμπτήρες πυράκτωσης είναι σχετικά απλοί και φθηνοί στην παραγωγή και χρησιμοποιούνται ευρέως για σκοπούς γενικού φωτισμού από τα τέλη του 19ου αιώνα. Ωστόσο, είναι σχετικά αναποτελεσματικοί σε σύγκριση με άλλους τύπους φωτισμού, καθώς μετατρέπουν μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας που καταναλώνουν σε ορατό φως. Ως αποτέλεσμα, έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από πιο ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες φωτισμού, όπως ο φωτισμός LED και ο φωτισμός φθορισμού.

LED Filament

Το συγκεκριμένο είδος LED λάμπες έχει σχεδιαστεί για να μιμείται την εμφάνιση και την αίσθηση των παραδοσιακών λαμπτήρων πυράκτωσης. Οι λαμπτήρες νήματος LED χρησιμοποιούν τσιπ LED τοποθετημένα σε σχήμα νήματος και επικαλυμμένα με κίτρινο φώσφορο για να παράγουν ένα ζεστό, απαλό φως που μοιάζει πολύ με τη ζεστή λάμψη των λαμπτήρων πυρακτώσεως.

LED Candles

Χρησιμοποιούν την τεχνολογία LED για να δημιουργήσουν ένα ρεαλιστικό, φωτεινό εφέ που μοιάζει με μια παραδοσιακή φλόγα κεριού. Τα LED Candles διατίθενται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη, συμπεριλαμβανομένων. Λειτουργούν συνήθως με μπαταρία και συνοδεύονται από τηλεχειριστήριο που επιτρέπει στους χρήστες να τα ενεργοποιούν και να τα απενεργοποιούν, να ρυθμίζουν τη φωτεινότητα και να θέτουν χρονοδιακόπτη. Ορισμένα κεριά LED διαθέτουν επίσης πρόσθετες λειτουργίες, όπως δυνατότητες αλλαγής χρώματος. Τα συγκεκριμένα έχουν αποκτηθεί από γνωστή ιστοσελίδα διαδικτυακών πωλήσεων και δεν φέρουν το όνομα κάποιας συγκεκριμένης μάρκ.

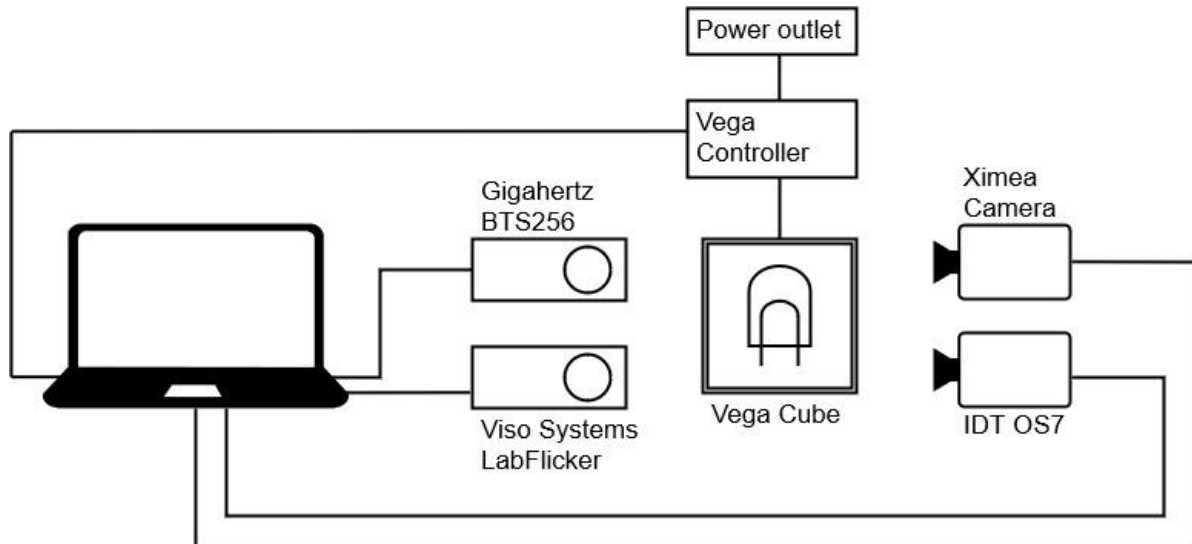


Εικόνα 14. Πάγκος εργασίας για μέτρηση στο PTB. Περιλαμβάνει: BTS256, Vega Cubes, Ximea Camera, IDT OS7 Camera

3.3.2 Μετρήσεις – Διατάξεις

3.3.2.1 Σύνολο πρώτο

Ο σκοπός αυτού του συνόλου αυτού είναι η επαλήθευση της ικανότητας των δύο αισθητήρων CMOS να υπολογίζουν τη συχνότητα, το σχήμα, το βάθος διαμόρφωσης και τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) του φωτιστικού. Το πρώτο σύνολο αποτελείται από τρία μέρη. Αρχικά, δημιουργήθηκε η παρακάτω διάταξη:



Εικόνα 15. Διάταξη πρώτου συνόλου, μέρος πρώτο - PTB

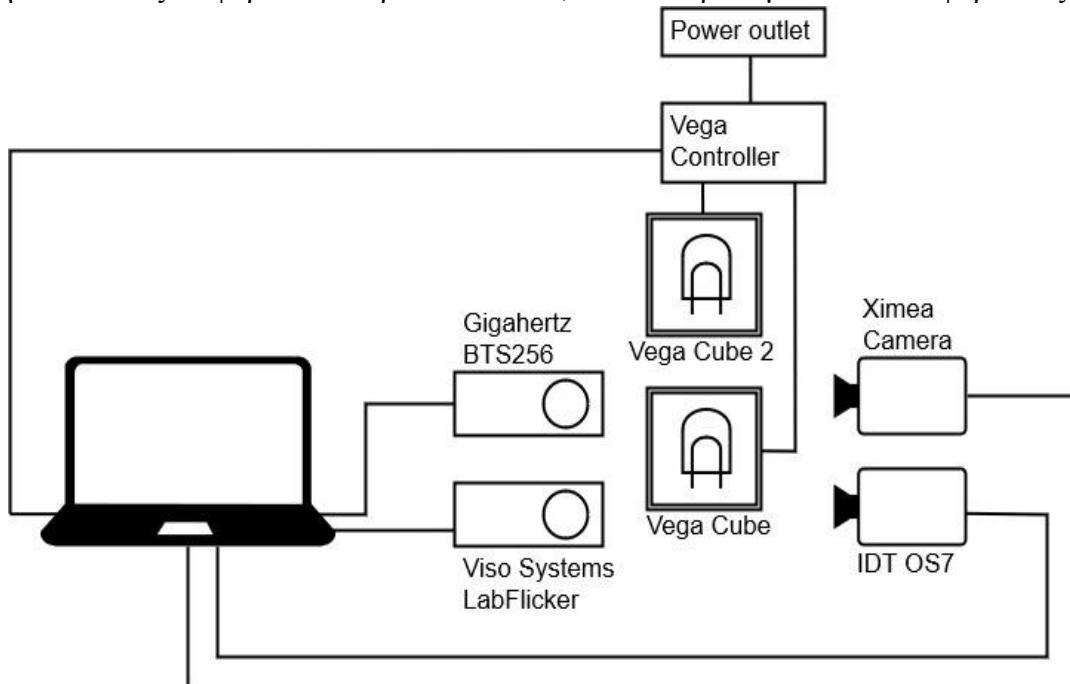
Η παραπάνω διάταξη είναι κοινή για το πρώτο και δεύτερο μέρος. Με την χρήση του υπολογιστή, δόθηκε η ανάλογη εντολή στο κουτί διαχείρισης του φωτιστικού «Vega Controller» ώστε να δώσει το φωτιστικό να δώσει την κατάλληλη έξοδο. Στην συνέχεια, οι δύο συσκευές μέτρησης “flickering” καταμέτρησαν την έξοδο του φωτιστικού, για χρόνο όσο απαιτείται η καταμέτρηση και των δύο μεγθών, PstLM και SVM και αποθηκεύτηκαν τα αποτελέσματα στον υπολογιστή. Ταυτόχρονα, δόθηκε εντολή ώστε οι δύο κάμερες να καταγράψουν τις εικόνες, οι οποίες επίσης αποθηκεύτηκαν στον υπολογιστή. Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τις κυματομορφές φωτός που δόθηκαν ως εντολή στον «Vega Controller»:

<u>Μέρος πρώτο</u>	
Αλλαγές συχνότητας	
Sin	Square (50%)
10 Hz	10 Hz
50 Hz	50 Hz
200 Hz	200 Hz
500 Hz	500 Hz
1000 Hz	1000 Hz

<u>Μέρος δεύτερο</u>
Αλλαγές “duty cycle”
Square - 100Hz
10% Duty Cycle
30% Duty Cycle
50% Duty Cycle
70% Duty Cycle
90% Duty Cycle

Η διαδικασία ξεκίνησε με έξοδο ημιτόνου, από 10Hz έως 1000Hz, με τα βήματα που αναγράφονται στον πίνακα. Στην συνέχεια, δόθηκε εντολή για έξοδο τετραγωνικού παλμού με duty cycle 50% από 10Hz έως 1000Hz με τα ίδια βήματα. Οι συχνότητες έχουν επιλεγεί με γνώμονα ότι το PstLM παρατηρείται έως περίπου τα 80Hz, και το SVM έχει παρατηρηθεί να σταθεροποιούνται οι τιμές του γύρο από τα 1000Hz. Στο μέρος δεύτερο, δόθηκε εντολή για έξοδο τετραγωνικού παλμού 100Hz, από 10% έως 90% duty cycle, με τα με τα βήματα που αναγράφονται στον πίνακα.

Για το τρίτο μέρος, προστέθηκε ακόμα μια φωτεινή πηγή στον “Vega Controller”, στην οποία δοθήκαν εντολές διαφόρων σταθερών εντάσεων, ώστε να προσομοιώσουν διαφορετικές τιμές



Εικόνα 16. Διάταξη πρώτου συνόλου, μέρος δεύτερο - PTB

βάθους διακύμανσης, καθώς το πρόγραμμα των φωτιστικών αυτών, δεν παρέχει αυτή την δυνατότητα. Η νέα διάταξη παρουσιάζεται στην **Εικόνα 16**:

Το φωτιστικό “Vega Cube” θα εκπέμπει την ίδια κυματομορφή σε όλη την διάρκεια του συγκεκριμένου μέρους. Το φωτιστικό “Vega Cube 2” θα εκπέμπει διάφορες στάθμες φωτεινής έντασης, ώστε να προσομοιώσει διάφορα στάδια βάθους διακύμανσης. Η διαδικασία μέτρησης παραμένει η ίδια, δηλαδή πρώτα θα δοθούν στον κουτί διαχείρισης οι ανάλογες εντολές για τις εξόδους των φωτιστικών, στην συνέχεια, οι δύο συσκευές μέτρησης “flickering” θα καταμετρήσουν την έξοδο του φωτιστικού και ταυτόχρονα θα δοθεί η εντολή ώστε οι δύο κάμερες να καταγράψουν τις εικόνες. Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τις κυματομορφές φωτός που δόθηκαν ως εντολή στον «Vega Controller»:

<i>Μέρος τρίτο</i>	
<i>Διακυμάνσεις βάθους διαμόρφωσης</i>	
<i>Vega Cube</i>	<i>Vega Cube 2</i>
Τετ. Παλμός 100Hz - 50% Duty Cycle	10% Ένταση
Τετ. Παλμός 100Hz - 50% Duty Cycle	30% Ένταση
Τετ. Παλμός 100Hz - 50% Duty Cycle	50% Ένταση
Τετ. Παλμός 100Hz - 50% Duty Cycle	70% Ένταση
Τετ. Παλμός 100Hz - 50% Duty Cycle	90% Ένταση

Δόθηκε εντολή στο φωτιστικό “Vega Cube” για έξοδο τετραγωνικού παλμού με συχνότητα 100Hz και duty cycle 50%. Στο φωτιστικό “Vega Cube 2” δόθηκε εντολή για σταθερή φωτεινή έξοδο 10% έως 90% με βήμα 20% κάθε φορά.

Και για τα τρία μέρη τηρήθηκαν οι εξής χρόνοι δειγματοληψίας:

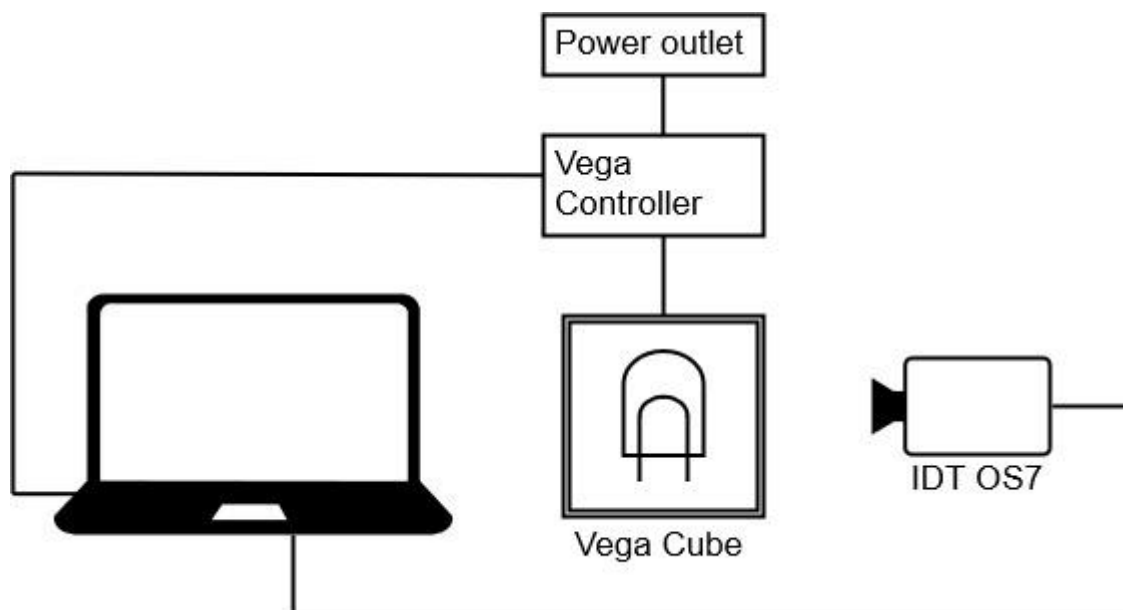
- Ximea Camera: 5 seconds
- IDT OS7: 0.5 second
- Gigahertz BTS256: 180 seconds
- Viso Systems Labflicker: 1 second

Να σημειωθεί, πως νωρίς παρατηρήθηκε η αδυναμία του οργάνου Viso Systems Labflicker να καταγράψει αξιόπιστα δεδομένα από το τρίτο μέρος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως χρειάζεται να τοποθετηθεί σχεδόν εξ επαφής στο φωτιστικό προς μέτρηση, πράγμα αδύνατο λόγω της διάταξης του τρίτου μέρους.

Επίσης, ο όγκος δεδομένων της κάμερας IDT OS7 είναι αρκετά μεγάλος, πράγμα που δυσχέραινε την δειγματοληψία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Δυσκολίες παρουσίασε και στην Ximea, η οποία παρουσίαζε έντονες διακυμάνσεις τιμών σε διάρκειες πέραν των 5 δευτερολέπτων για δειγματοληψίες πάνω από τα 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο, που δεν συνάδει με την κυματομορφή εξόδου που έχει δοθεί.

3.3.2.2 Σύνολο δεύτερο

Ο σκοπός αυτού του συνόλου αυτού είναι η διερεύνηση της επίδρασης του ρυθμού λήψης εικόνων της κάμερας. Δοκιμάστηκαν δύο κυματομορφές, ημίτονο και τετραγωνικός παλμός, συχνότητας 1kHz. Για τον σκοπό του παρόντος συνόλου, δημιουργήθηκε η εξής διάταξη:



Εικόνα 17. Διάταξη συνόλου δεύτερου - PTB

Στο συγκεκριμένο σύνολο, έγινε χρήση μόνο της OS7-S3, καθώς θα διερευνηθούν ρυθμοί πολύ μεγαλύτεροι από τα 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Παράλληλα, επιλέχθηκαν κυματομορφές για τις οποίες διαθέτουμε ήδη δεδομένα από το πρώτο σύνολο. Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για κάθε κυματομορφή:

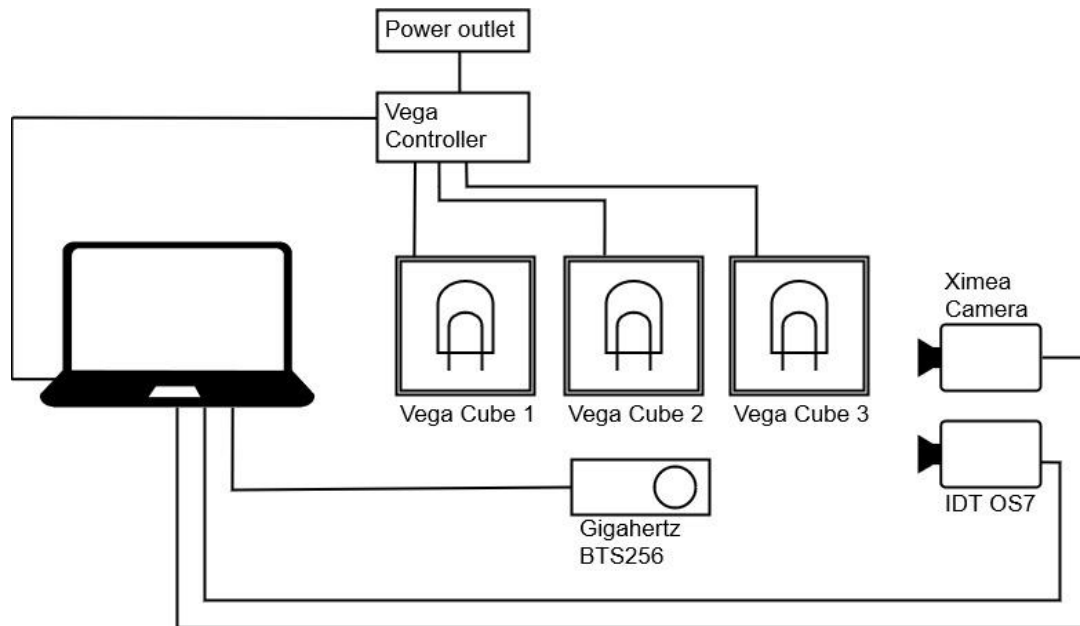
<i>Ημίτονο, 1kHz</i>
<i>Εικόνες ανά δευτερόλεπτο</i>
2000
4000
8000
16000
32000
64000
128000

<i>Τετραγωνικός παλμός, 50% duty cycle, 1kHz</i>
<i>Εικόνες ανά δευτερόλεπτο</i>
2000
4000
8000
16000
32000
64000
128000

Η διαδικασία ξεκίνησε με έξοδο ημιτόνου και συχνότητα 1kHz. Στην συνέχεια ξεκίνησε η καταγραφή από την κάμερα με 2000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Με την ολοκλήρωση τους, αποθηκευτήκαν τα δεδομένα και προχωρήσαμε στην επόμενη μέτρηση των 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι και τα 128000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο. Έπειτα, δόθηκε εντολή για έξοδο τετραγωνικού παλμού με duty cycle 50% και συχνότητα 1kHz. Η διαδικασία λήψης δεδομένων παρέμεινε η ίδια με πριν. Όλες οι λήψεις, είχαν διάρκεια 0.5 seconds.

3.3.2.3 Σύνολο τρίτο

Ο σκοπός αυτού του συνόλου αυτού είναι η διερεύνηση κατά πόσο οι κάμερες, έχουν την δυνατότητα να καταγράψουν με επιτυχία περισσότερες από μια πηγές φωτός με διαφορετικά χαρακτηριστικά κυμάτωσης του σήματος τους. Επιπλέον σκοπός ήταν η εξακρίβωση κατά πόσο οι κάμερες έχουν την δυνατότητα για επιτυχή καταγραφή της επαλληλίας του φωτός από τα τρία φωτιστικά στο ίδιο σημείο. Το συγκεκριμένο σημείο θα είναι η φωτοδίοδος του οργάνου BTS256, το οποίο επίσης θα καταγράψει την ίδια χρονική στιγμή το φως που προσπίπτει ταυτόχρονα από τις πηγές. Τοποθετήθηκαν μπροστά από τις δύο κάμερες, τρία φωτιστικά «Vega Cube», και λήφθηκαν μετρήσεις και με τα τρία φωτιστικά σε λειτουργία. Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα της διάταξης:



Εικόνα 18. Διάταξη συνόλου τρίτου - PTB

Το παρόν σύνολο, αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος και τα τρία φωτιστικά έχουν ως έξοδο κάποιου είδους κυματομορφής, συγχρονισμένες και ασυγχρονιστες, με την ίδια συχνότητα εξόδου 100Hz. Στο δεύτερο μέρος, ένα φωτιστικό λαμβάνει σταθερή έξοδο DC ενώ τα άλλα δύο διαφέρουν σε συχνότητα και σε μία περίπτωση διαφέρουν και σε κυματομορφή. Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τις μετρήσεις του συνόλου:

<i>Μέρος πρώτο</i>		
<i>Συγχρονισμένα 100Hz</i>		
<i>Vega cube 1</i>	<i>Vega cube 2</i>	<i>Vega cube 3</i>
Τετ. Παλμός, duty cycle 50%	Ημίτονο	Τριγωνικός
<i>Ασυγχρόνιστα 100Hz</i>		
<i>Vega cube 1</i>	<i>Vega cube 2</i>	<i>Vega cube 3</i>
Τετ. Παλμός, duty cycle 50%	Ημίτονο	Τριγωνικός

<i>Μέρος δεύτερο</i>		
<i>Vega cube 1, 95Hz</i>	<i>Vega cube 2</i>	<i>Vega cube 3, 105Hz</i>
Τετ. Παλμός, duty cycle 50%	Σταθερό, DC	Τετ. Παλμός, duty cycle 50%
Ημίτονο	Σταθερό, DC	Τετ. Παλμός, duty cycle 50%

Για το μέρος πρώτο, δόθηκε εντολή για τις τρεις εξόδους των φωτιστικών. Με την επιλογή συγχρονισμού, τα τρία φωτιστικά εκπέμπουν το κάθε ένα την δικιά του κυματομορφή, με συχνότητα 100Hz και καμία διαφορά φάσης. Η κάμερα «IDT OS7» θα κάνει δύο μετρήσεις, μια μέτρηση με τα τρία φωτιστικά στην ίδια σκηνή και μία μέτρηση με μόνο την φωτοδίοδο του «BTS256» στην σκηνή της. Η πρώτη έχει ως σκοπό την διερεύνηση πως η κάμερα μπορεί να λάβει δεδομένα από τρία φωτιστικά ταυτόχρονα σε μια σκηνή. Η δεύτερη έχει ως σκοπό να βρεθεί εάν υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής της επαλληλίας των φωτιστικών σε ένα κοινά φωτιζόμενο σημείο. Ταυτόχρονα το όργανο «BTS256» θα καταγράψει με την φωτοδίοδο την επαλληλία των τριών κυματομορφών. Η ίδια διαδικασία θα επαναληφθεί, με την αφαίρεση του συγχρονισμού και την τυχαία διαφορά φάσης των τριών φωτιστικών.

Για το μέρος δεύτερο, δόθηκε η εντολή ώστε μία έξοδος να έχει σήμα σταθερής φωτεινής έντασης, και τα άλλα δύο φωτιστικά τις κυματομορφές που φαίνονται στον πίνακα. Στην συνέχεια, η κάμερα «IDT OS7» θα κάνει δύο μετρήσεις, μια μέτρηση με τα τρία φωτιστικά στην ίδια σκηνή και μία μέτρηση με μόνο την φωτοδίοδο του «BTS256» στην σκηνή της. Ο σκοπός είναι ο ίδιος με πριν, δηλαδή η διερεύνηση πως η κάμερα μπορεί να λάβει δεδομένα από τρία φωτιστικά ταυτόχρονα σε μια σκηνή και πως υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής της επαλληλίας των φωτιστικών σε ένα κοινά φωτιζόμενο σημείο. Η όλη διαδικασία θα επαναληφθεί και δεύτερη φορά με διαφορετικές κυματομορφές.

Στα δύο μέρη τηρήθηκαν οι εξής χρόνοι δειγματοληψίας:

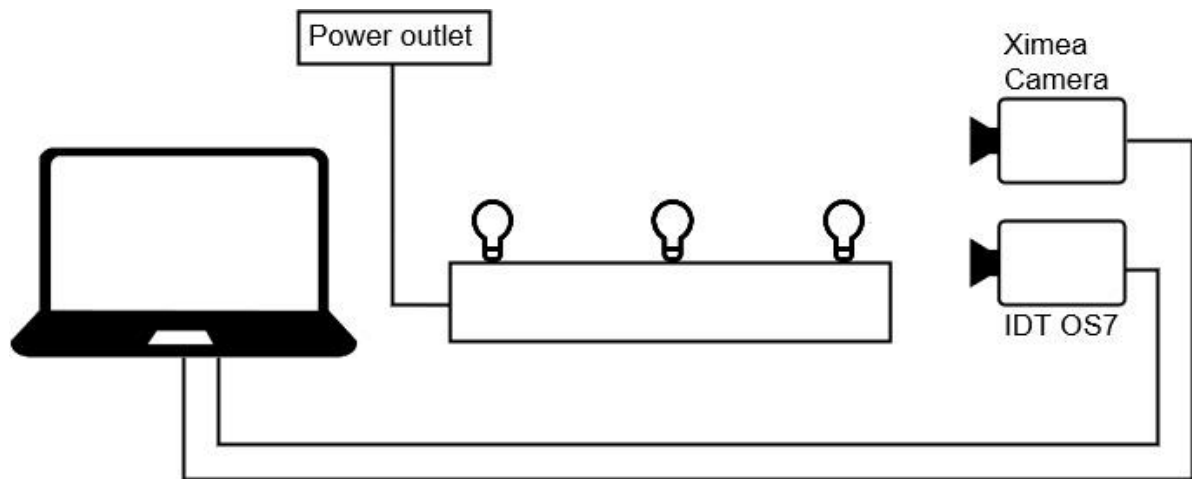
- Ximea Camera: 5 seconds
- IDT OS7: 0.5 second
- Gigahertz BTS256: 180 seconds

3.3.2.4 Σύνολο τέταρτο

Ο σκοπός του συγκεκριμένου συνόλου, αρχικά η αναπαράσταση στο εργαστήριο φαινομένων του πραγματικού κόσμου, και στην συνέχεια η μετάβαση στον πραγματικό κόσμο, με μετρήσεις στο πεδίο. Αποτελείται από 4 μέρη. Τρία μέρη στο εργαστήριο και ένα μέρος στο πεδίο.

Μέρος πρώτο

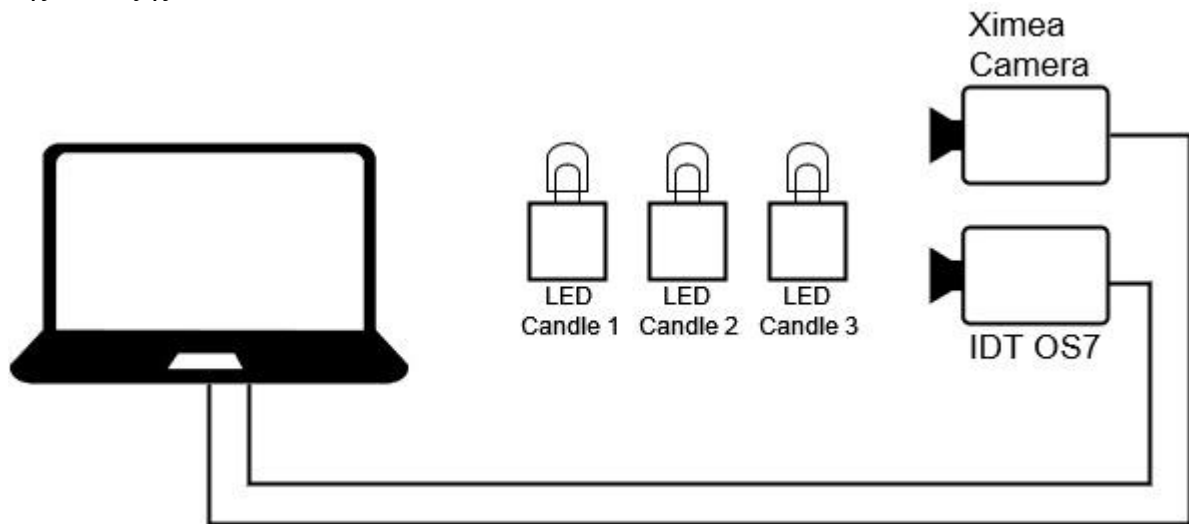
Σε μία ειδική βάση τροφοδοσίας, τοποθετήθηκαν οι τρεις λαμπτήρες της αγοράς. Μετά το πέρας ενός χρονικού διαστήματος για την σταθεροποίηση της λάμπας πυρακτώσεως, η κάμερα IDT OS7, έλαβε δύο λήψεις, μία με ρυθμό 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο για 0.5 δευτερόλεπτα και μία με ρυθμό 8000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο για 0.25 δευτερόλεπτα. Η κάμερα Ximea, έκανε τρεις δειγματοληψίας, μία για κάθε φωτιστικό, με ρυθμό 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο, διάρκειας 5 δευτερολέπτων. Στην συνέχεια, με την χρήση του BTS256, καταμετρήθηκε έκαστος μόνη της η κάθε λάμπα. Παρακάτω ακολουθεί σχεδιάγραμμα της διάταξης:



Εικόνα 19. Διάταξη τέταρτου συνόλου, μέρος πρώτο - PTB

Μέρος δεύτερο

Στο συγκεκριμένο μέρος, μετρήθηκαν τρεις λαμπτήρες τύπου «LED Candles», διαφορετικοί μεταξύ τους. Στον κάθε ένα δόθηκε διαφορετική ρύθμιση λειτουργίας. Η διαδικασία μέτρησης ήταν παρόμοια με το προηγούμενο μέρος. Η κάμερα IDT OS7 έλαβε μόνο μία μέτρηση με ρυθμό 8000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο για 0.25 δευτερόλεπτα. Η κάμερα Ximea, έκανε τρεις δειγματοληψίας, μία για κάθε φωτιστικό, με ρυθμό 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο, διάρκειας 5 δευτερολέπτων. Στην συνέχεια, με την χρήση του BTS256, καταμετρήθηκε έκαστος μόνος του ο κάθε λαμπτήρας. Παρακάτω ακολουθεί σχεδιάγραμμα της διάταξης:



Εικόνα 20. Διάταξη τέταρτου συνόλου, μέρος δεύτερο - PTB

Τέθηκαν οι εξής ρυθμίσεις:

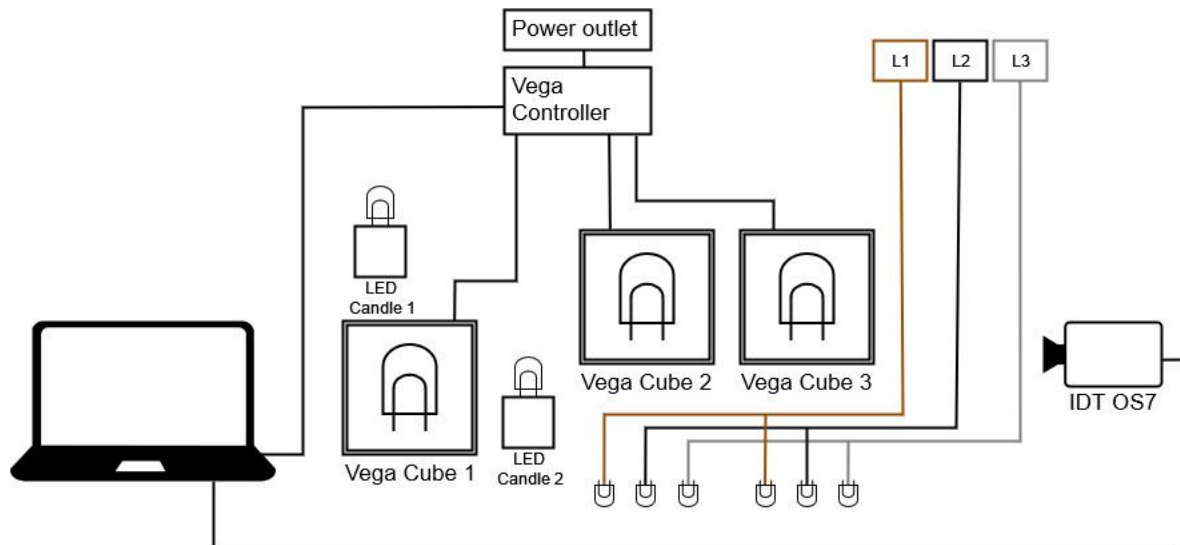
- LED Candle 1: «Warm white», χαμηλότερη φωτεινή ένταση
- LED Candle 2: Κίτρινο χρώμα, με το προστατευτικό
- LED Candle 3: Κίτρινο χρώμα, χωρίς το προστατευτικό

Μέρος τρίτο

Το συγκεκριμένο μέρος αποτελεί την πιο πολύπλοκη σκηνή εντός του εργαστηρίου. Δημιουργήθηκε μια σκηνή όπου συμπεριλάμβανε τα εξής:

- Fairy lights 1, στην φάση L1
- Fairy lights 2, στην φάση L2
- Fairy lights 3, στην φάση L3
- Vega Cube 1, τετραγωνικός παλμός με duty cycle 50%, 50Hz
- Vega Cube 2, ημίτονο 50Hz
- Vega Cube 3, τετραγωνικός παλμός με duty cycle 50%, 50Hz
- Δύο LED Candles

Τα «Fairy lights», τοποθετήθηκαν με τέτοιο σκοπό, ώστε να είναι εμφανής η διαφορά φάσης με την χρήση των καμερών. Παράλληλα τοποθετήθηκαν πάνω από μια άσπρη επιφάνεια, ώστε να υπάρχει δυνατότητα μέτρησης και των σημείων αυτών, και τις επαλληλίας του συνόλου των λαμπτήρων. Πίσω από τα «Fairy lights», τοποθετήθηκαν οι τρεις «Vega Cubes». Ενδιάμεσα των «Vega Cubes», τοποθετήθηκαν τα δύο «LED Candles». Στο συγκεκριμένο μέρος έγινε μέτρηση από την IDT OS7, καθώς η περιοχή ενδιαφέροντος ήταν πολύ μεγάλη και πολύπλοκη για την Ximea. Ο ρυθμός λήψης τέθηκε ως 5790 εικόνων ανά δευτερόλεπτο καθώς είναι ο υψηλότερος δυνατός για διαστάσεις που θα επιτρέψει την πλήρη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Τέλος λήφθηκε μέτρηση για 0.5 δευτερόλεπτα. Παρακάτω ακολουθεί διάγραμμα της διάταξης:



Εικόνα 21. Διάταξη τέταρτου συνόλου, μέρος τρίτο - PTB

Μέρος τέταρτο

Στο συγκεκριμένο μέρος, δημιουργήσαμε μια σκηνή που περιλαμβάνει ένα φωτιστικό από το προαύλιο του κτηρίου «Einstein Bau-PTB», και το αυτοκίνητο ενός ερευνητή. Πρόκειται για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο «Renault Zoe eTech». Οι λήψεις έχουν γίνει από το παράθυρο του εργαστηρίου. Έγιναν τρεις λήψεις, με διαφορετικές ρυθμίσεις εξωτερικού φωτισμού του αυτοκινήτου, με ρυθμό λήψης 8000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο, λήφθηκαν 2000 εικόνες για 0.25 δευτερόλεπτα. Παράλληλα, έχει μετρηθεί το φωτιστικό που βρίσκεται στην σκηνή, με την χρήση του BTS256, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο μεθόδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

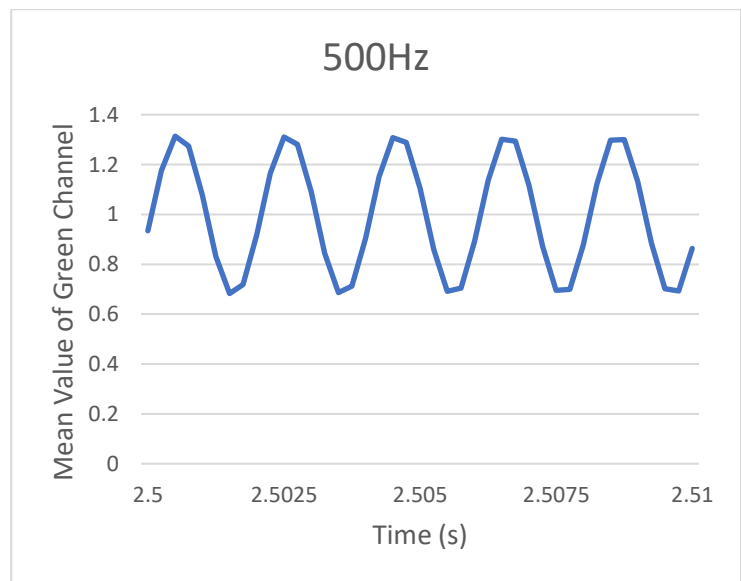
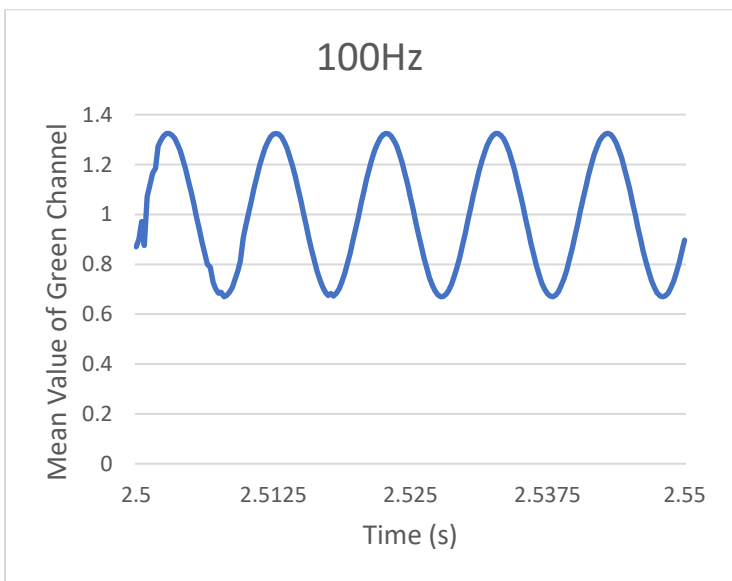
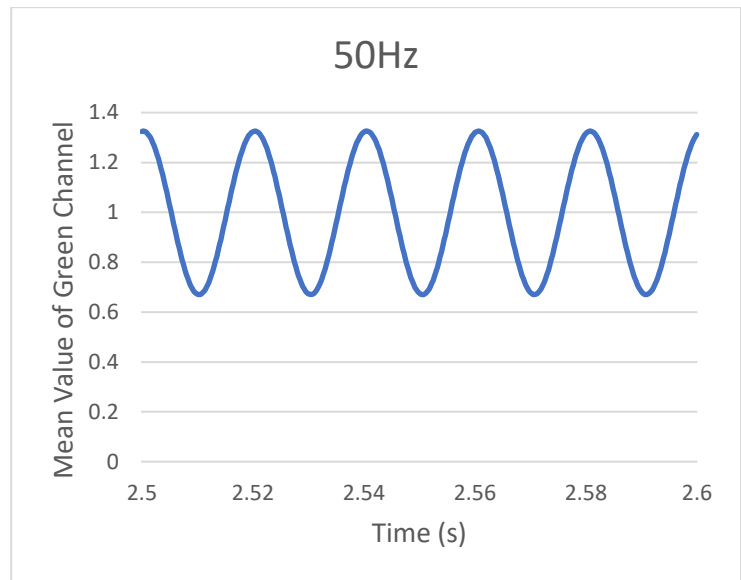
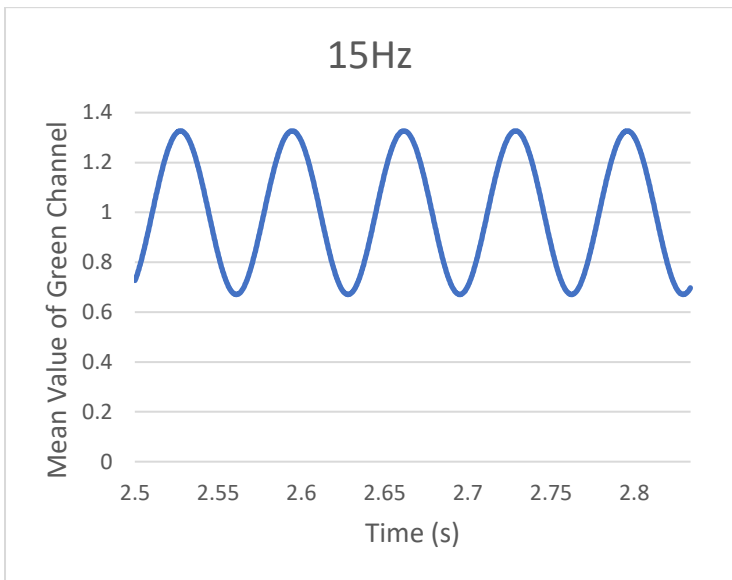
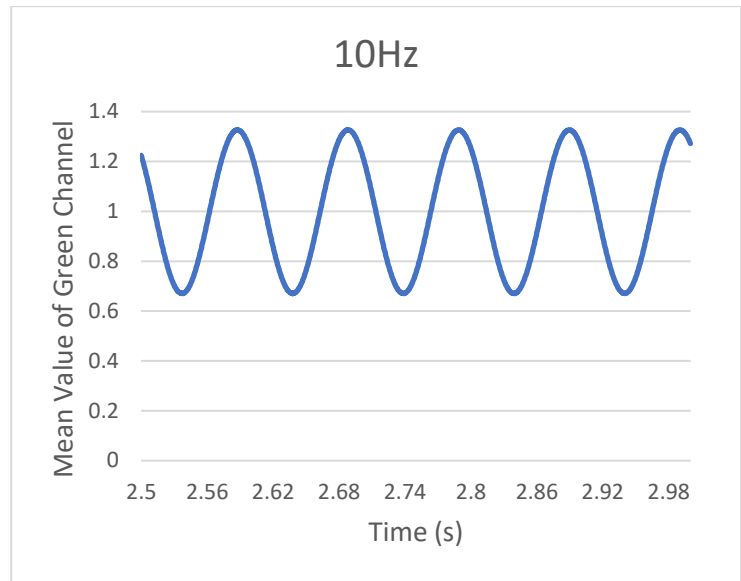
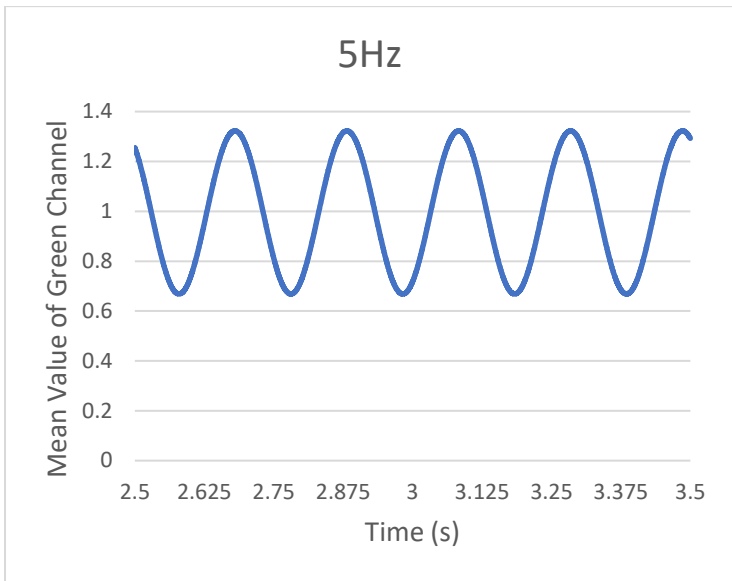
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

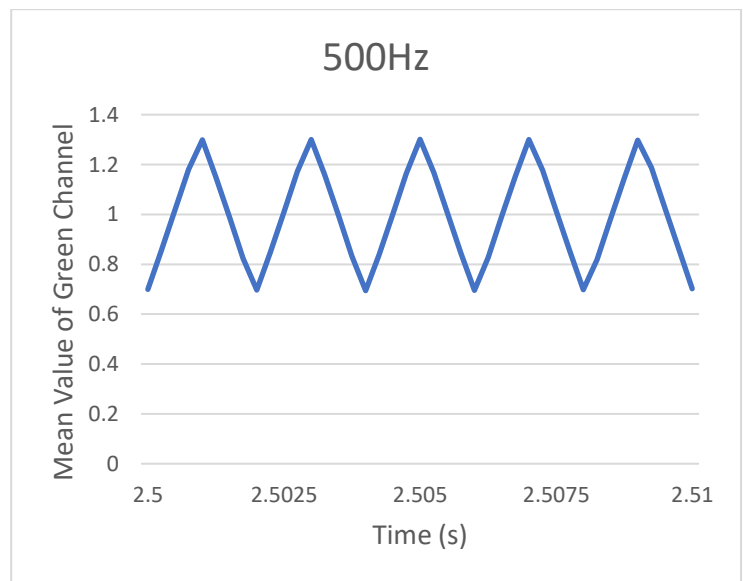
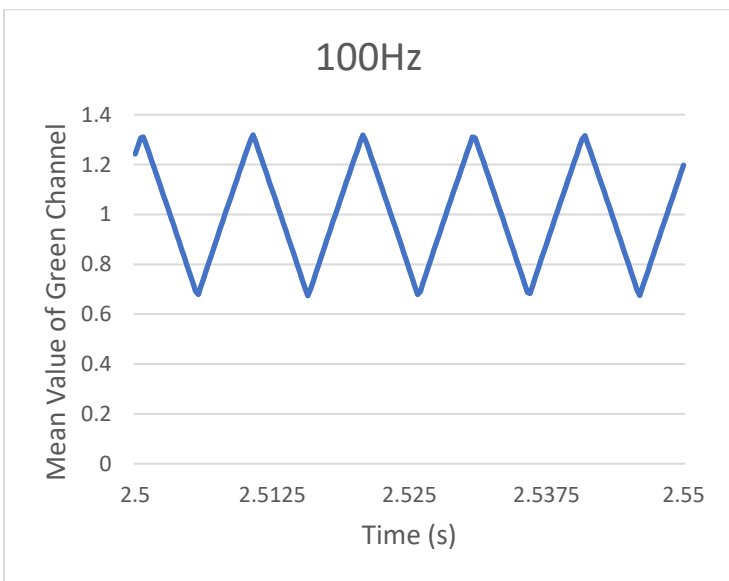
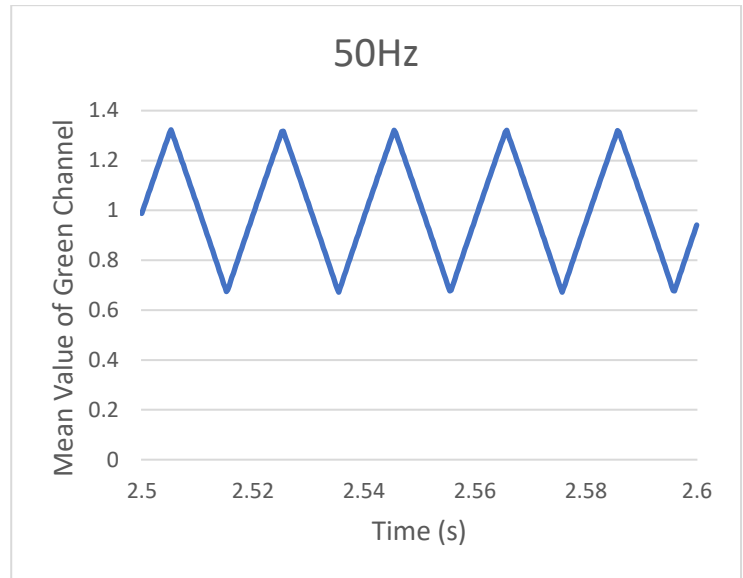
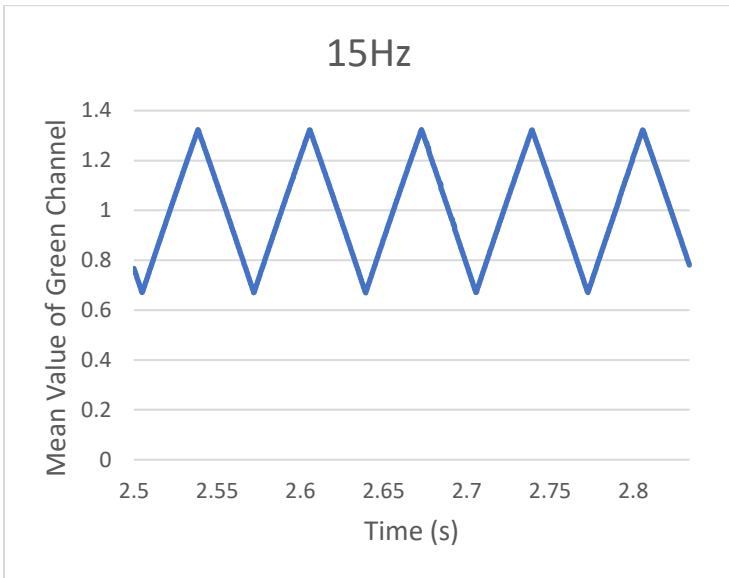
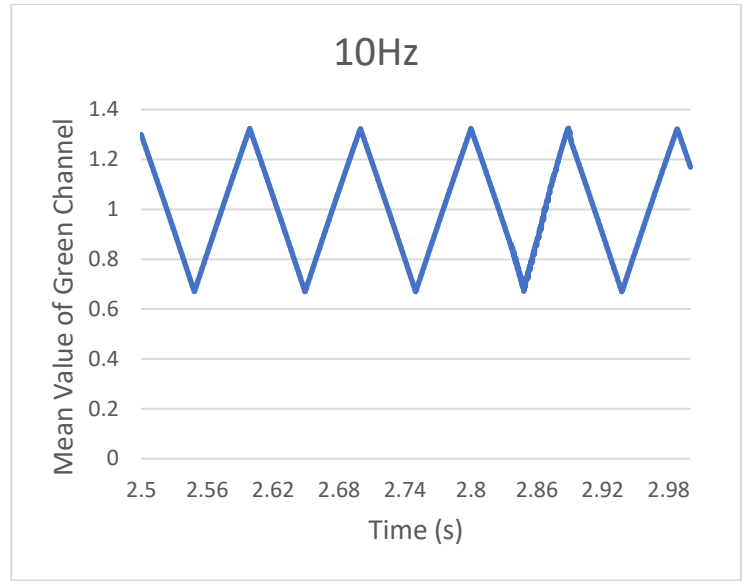
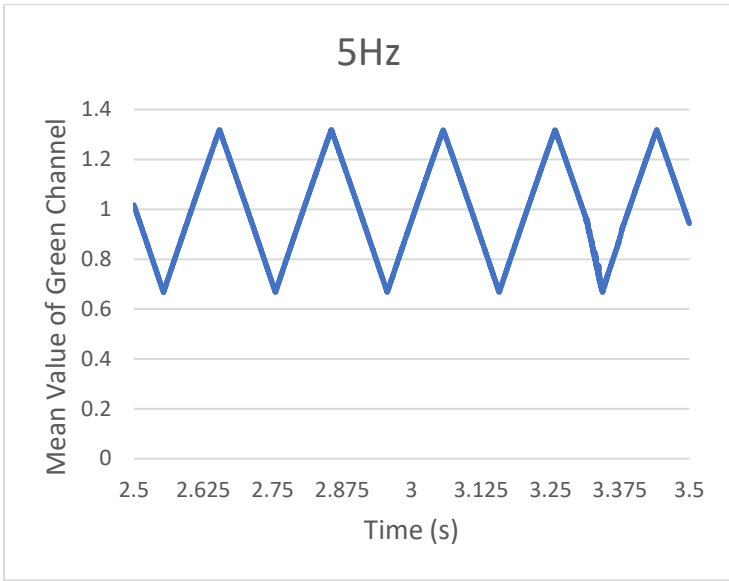
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα παρουσιασθούν και θα σχολιασθούν τα αποτελέσματα των διαδικασιών που έχουν παρουσιασθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα αποτελούνται κυρίως από πίνακες με τα υπολογιζόμενα μεγέθη σε κάθε μέτρηση. Παράλληλα, σε κάποιες μετρήσεις, θα παρουσιασθούν και φωτογραφίες, της διάταξης που μετρήθηκε και της εικόνας που λάμβαναν οι αισθητήρες CMOS.

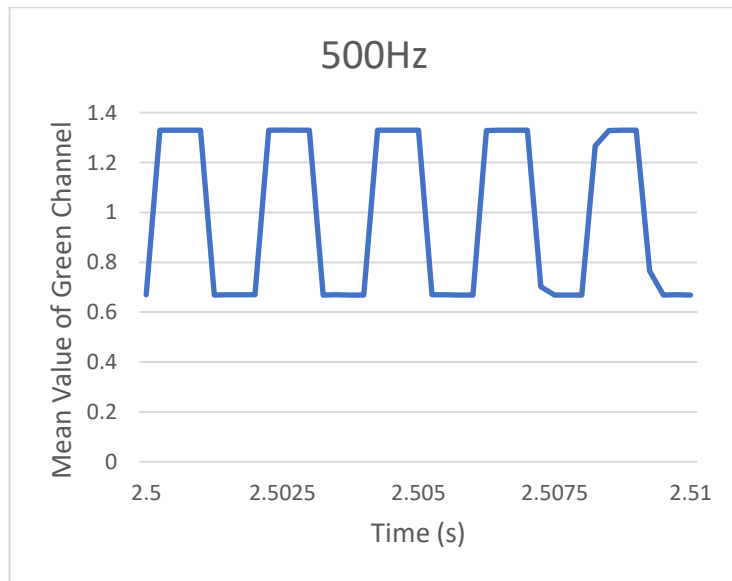
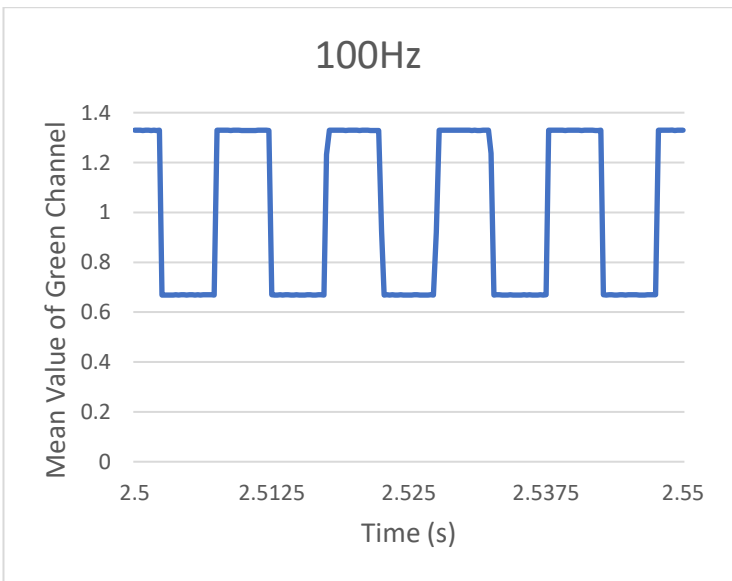
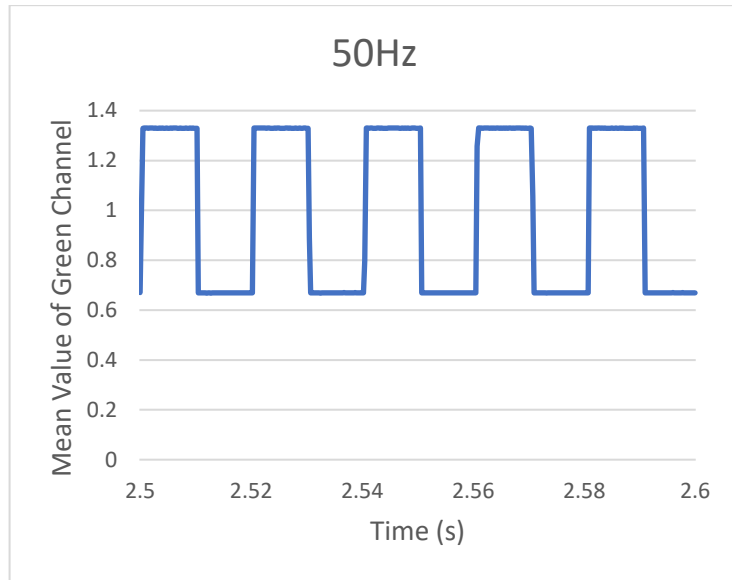
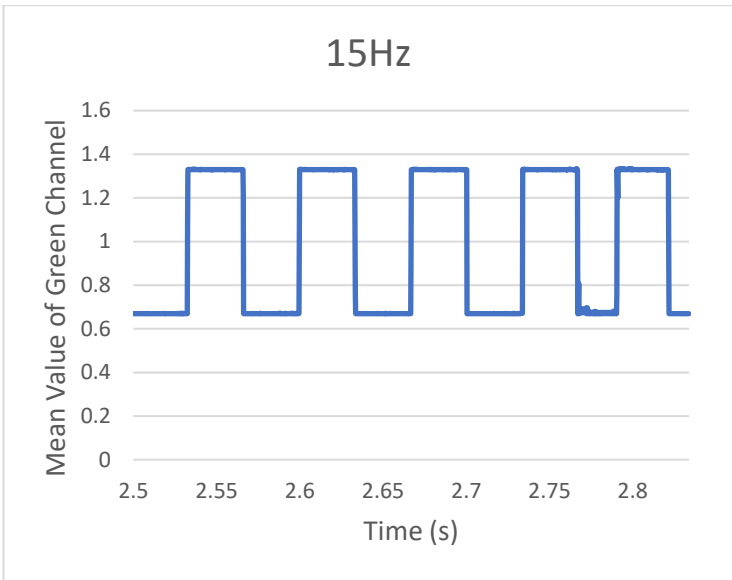
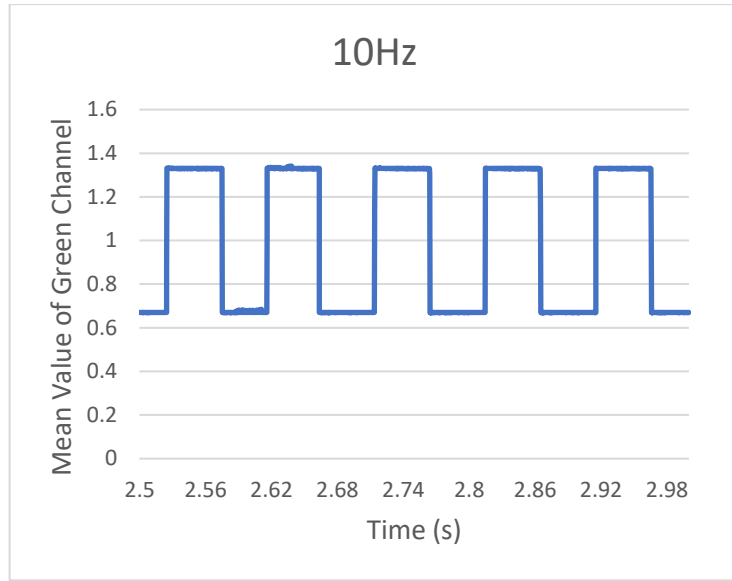
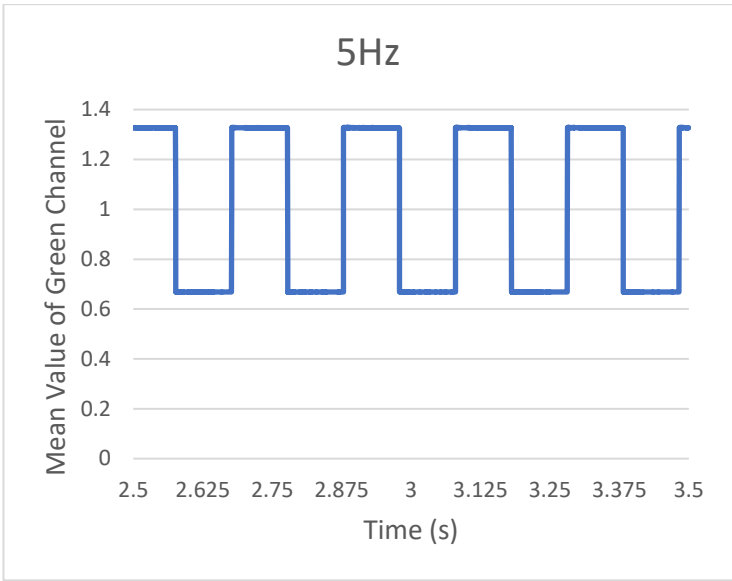
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΜΠ

4.1.1 Αποτελέσματα πρώτου συνόλου

Στην συγκεκριμένη διάταξη, σκοπός μας ήταν η εξακρίβωση των δυνατοτήτων του αισθητήρα CMOS στην κάμερα Ximea MC050CG-SY. Μετά την λήψη των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή των κυματομορφών φωτός που λήφθηκαν από τον αισθητήρα, ώστε να εξακριβώσουμε εποπτικά, πως υπάρχει η δυνατότητα για καταγραφή της πληροφορίας του φωτός. Παρακάτω θα παρουσιασθούν στιγμιότυπα από τις γραφικές παραστάσεις των κυματομορφών, όπως αυτές έχουν περιγραφεί στην ενότητα **3.2.1.1**. Το στιγμιότυπο είναι παρμένο από την χρονική στιγμή $t=2.5s$ και για μία περίοδο του κάθε σήματος.







Στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, παρατηρούμε πως η κάμερα Ximea, έχει την δυνατότητα αναπαράστασης της κυμάτωσης της φωτεινής πηγής. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές πως ο βαθμός αξιοπιστίας της είναι χαμηλός, καθώς σε μία από τις συνολικά 18 γραφικές παραστάσεις, συγκεκριμένα στα «100Hz Sine», η κυματομορφή στην αρχή της γραφικής, έχει χάσει την κύρια μορφή της. Η απόκλιση αυτή ενδέχεται να προσθέσει αρμονικές που υπό κανονικές συνθήκες δεν θα παρατηρούσαμε.

Παράλληλα, στα αποτελέσματα των τετραγωνικών παλμών, παρατηρούμε πως είναι συχνό φαινόμενο μια ελαφρά διακύμανση στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Αυτό πιθανώς να οφείλεται σε θόρυβο που έχει προκληθεί κατά την διάρκεια της μέτρησης. Επίσης, στην γραφική παράσταση «500Hz Square», βλέπουμε πως η μεταβολή από την ελάχιστη στην μέγιστη τιμή, δεν γίνεται βηματικά, καθώς επίσης πως προς το τέλος της κυματομορφής έχει χάσει την κύρια μορφή της. Το πρώτο οφείλεται στο γεγονός πως για την αναπαράσταση μίας περιόδου 500Hz, με δειγματοληψία 4000Hz, χρειάζονται 8 διαδοχικά σημεία της κυματομορφής, τα οποία χρονικά μεταξύ τους απέχουν 20ms, χρόνος στον οποίο η βηματική μεταβολή δεν είναι εφικτή.

4.1.2 Αποτελέσματα δεύτερου συνόλου

Στο συγκεκριμένο σύνολο, λήφθηκαν μετρήσεις ενός LED συνδεδεμένο σε μια γεννήτρια κυματομορφών, με την χρήση της κάμερας Ximea και της φωτοδιόδου του EMIP.

Ο πρώτος πίνακας, παρουσιάζει τις τιμές που λήφθηκαν από τους αλγόριθμους, με την χρήση των δεδομένων της φωτοδιόδου. Στον δεύτερο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που λήφθηκαν από τους αλγόριθμους, με την χρήση των δεδομένων της κάμερας Ximea. Στον τρίτο πίνακα, παρουσιάζεται η ποσοστιαία απόκλιση των τιμών της κάμερας Ximea από την φωτοδίοδο.

Κυματομορφές Ημιτόνου

Photodiode

Συχνότητα (Hz)	Flicker Index	Flicker Percent	PstLM	SVM	Frequency
50	0.1500	52.43%	3.8903	1.3488	50.0000
100	0.1502	53.47%	0.2187	1.838	100.0000
200	0.1495	54.55%	0.1983	1.2831	200.0000
300	0.1485	52.53%	0.1987	0.946	299.9960
400	0.1474	52.53%	0.2031	0.7442	400.0080
500	0.1461	51.00%	0.2012	0.6207	500.0000
1000	0.1392	49.00%	0.1940	0.4477	1000.0000
2000	0.1134	41.00%	0.1940	0.0094	2000.0400

Ximea

Συχνότητα (Hz)	Flicker Index	Flicker Percent	PstLM	SVM	Frequency
50	0.1290	40.75%	4.3371	1.1064	49.6740
100	0.1291	41.02%	0.2060	1.5508	99.3265
200	0.1298	40.99%	1.2668	0.9736	198.4733
300	0.1289	40.68%	1.2410	0.7375	297.9133
400	0.1284	40.53%	0.0295	0.6542	395.9330
500	0.1288	40.63%	0.0763	0.5467	496.4928
1000	0.1246	39.39%	2.1208	0.4005	976.1751
2000	0.1109	35.21%	0.7602	0.2689	1883.9216

Ximea-Photodiode (%)

Συχνότητα (Hz)	Flicker Index	Flicker Percent	PstLM	SVM	Frequency
50	14.00%	22.27%	11.48%	17.97%	0.65%
100	14.05%	23.28%	5.81%	15.63%	0.67%
200	13.18%	24.85%	538.83%	24.12%	0.76%
300	13.20%	22.55%	524.56%	22.04%	0.69%
400	12.89%	22.85%	85.48%	12.09%	1.02%
500	11.84%	20.33%	62.08%	11.92%	0.70%
1000	10.49%	19.60%	993.20%	10.54%	2.38%
2000	2.20%	14.13%	291.86%	2760.64%	5.81%

Τετραγωνικές κυματομορφές

Photodiode

Συχνότητα (Hz)	Flicker Index	Flicker Percent	PstLM	SVM	Frequency
50	0.2377	65.99%	5.0290	1.7627	49.9980
100	0.2355	66.03%	0.7167	2.3729	99.9960
200	0.2326	66.04%	0.0895	1.6667	199.9920
300	0.2293	66.16%	0.2678	1.2262	300.0080
400	0.2267	66.28%	0.1385	0.9871	399.9920
500	0.2234	66.47%	0.0875	0.8363	500.0200
1000	0.2019	65.76%	0.1764	0.6356	1000.0400
2000	0.2039	64.69%	0.0872	0.0026	2000.0800

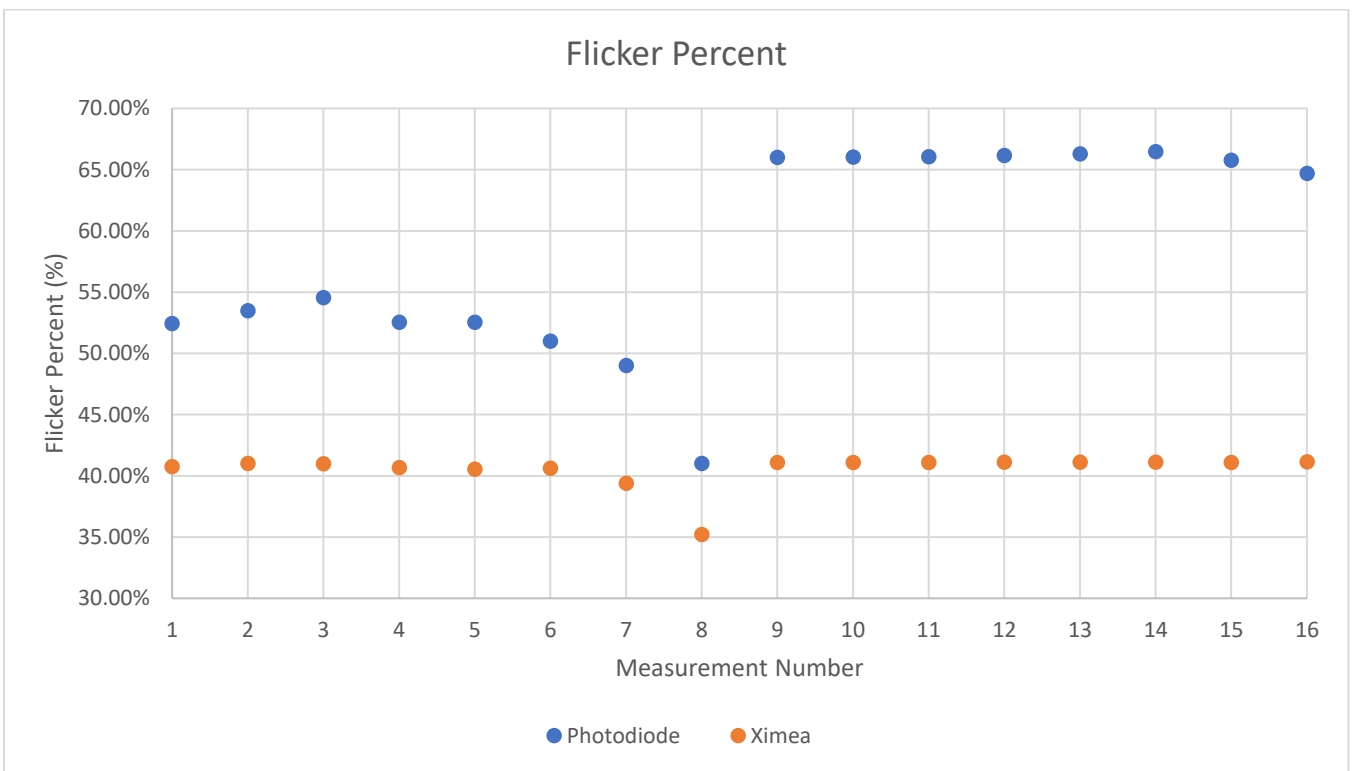
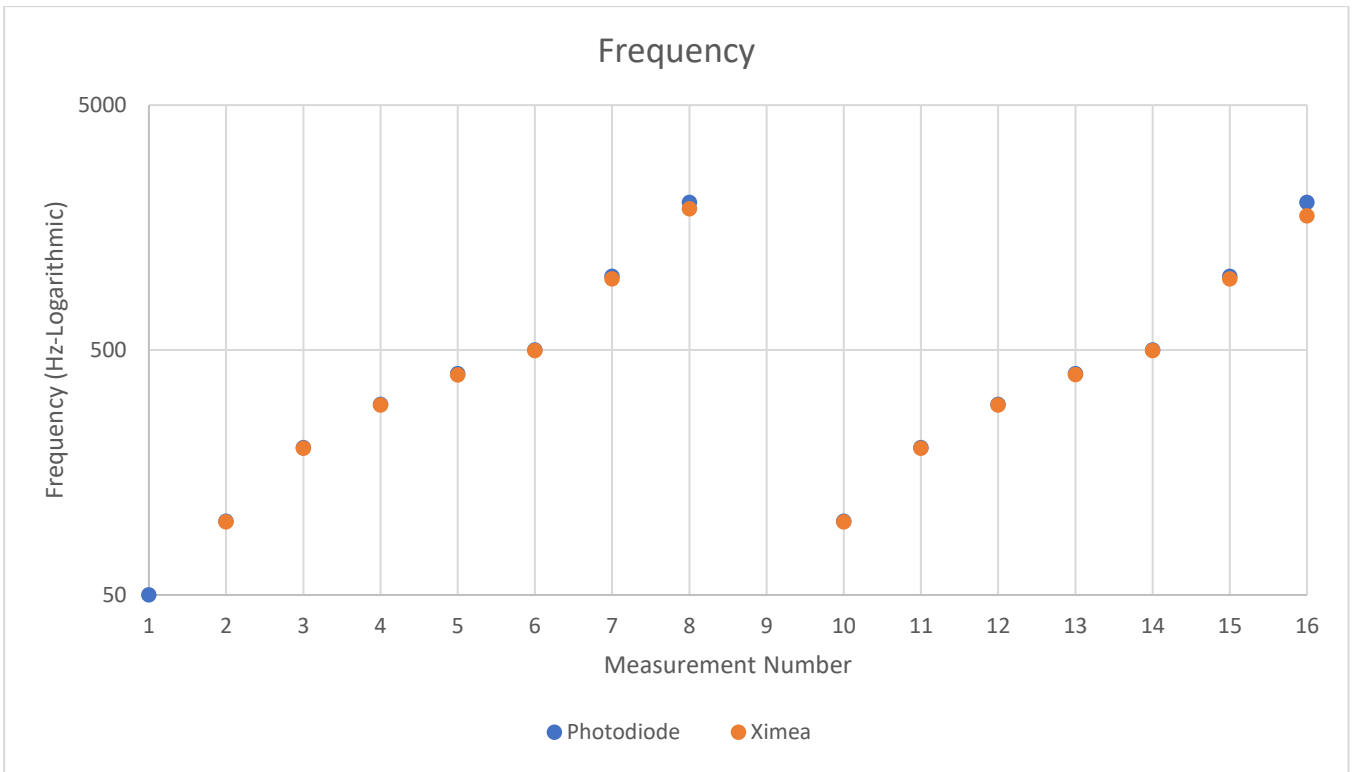
Ximea

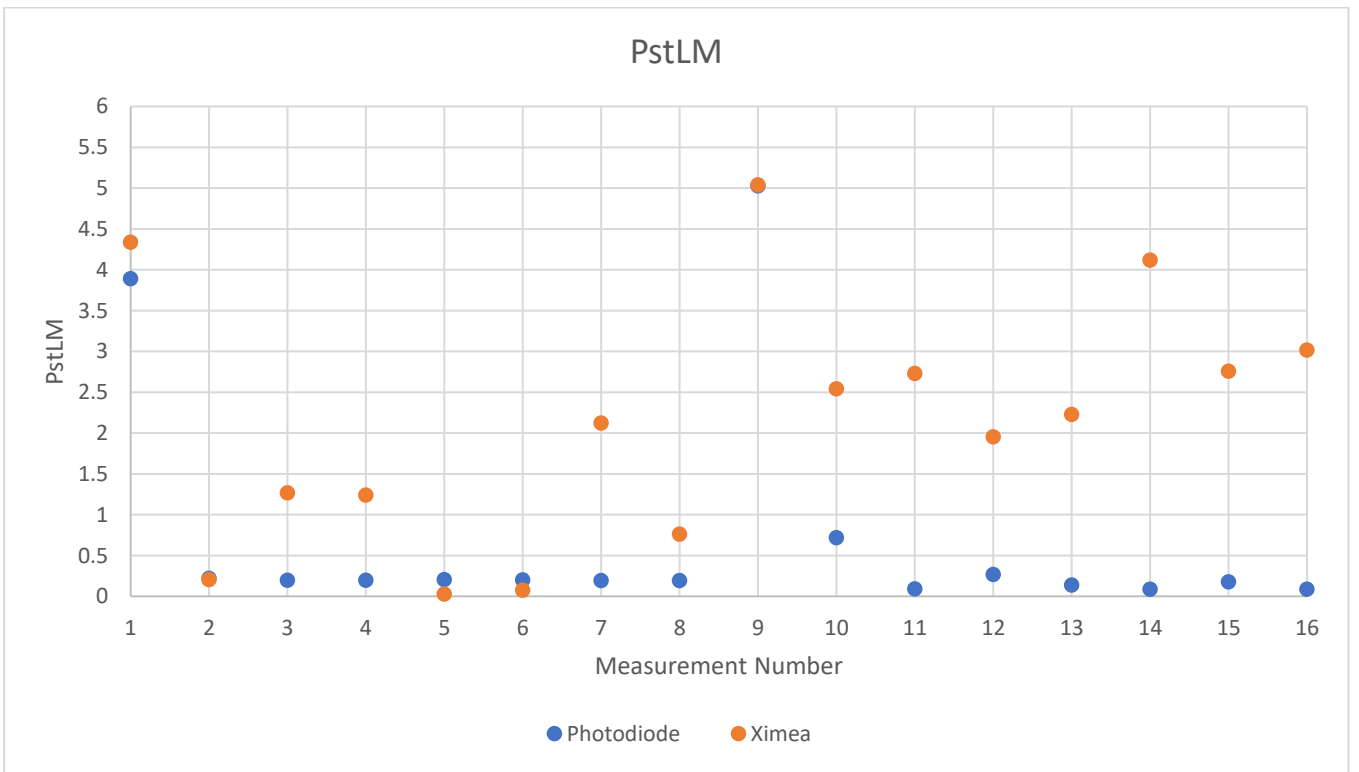
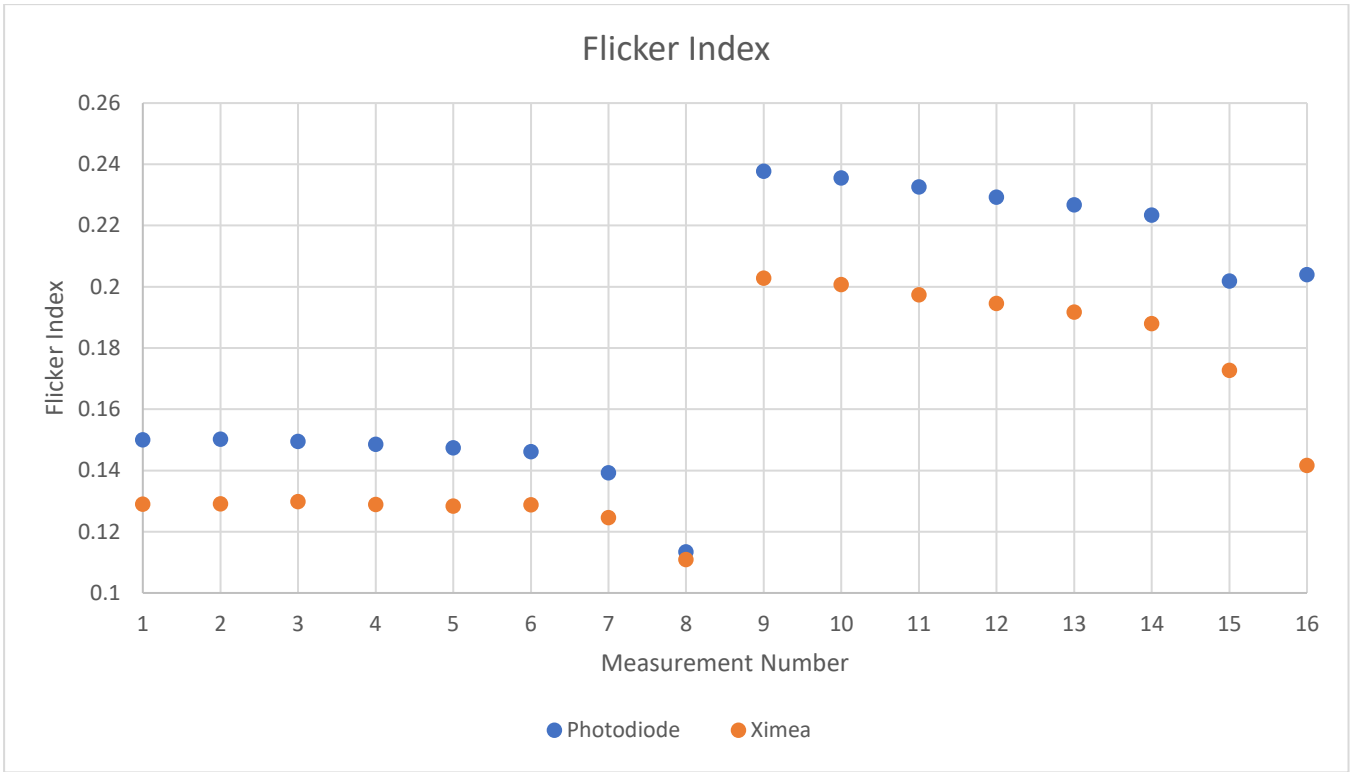
Συχνότητα (Hz)	Flicker Index	Flicker Percent	PstLM	SVM	Frequency
50	0.2028	41.08%	5.0383	1.4292	49.6415
100	0.2007	41.09%	2.5410	1.9613	99.2945
200	0.1974	41.10%	2.7285	1.0875	198.5548
300	0.1945	41.11%	1.9527	1.0471	297.8937
400	0.1917	41.12%	2.2267	0.8302	397.0993
500	0.1880	41.12%	4.1190	0.5056	496.4630
1000	0.1727	41.08%	2.7584	0.3689	975.6098
2000	0.1416	41.13%	3.0152	0.4201	1763.3441

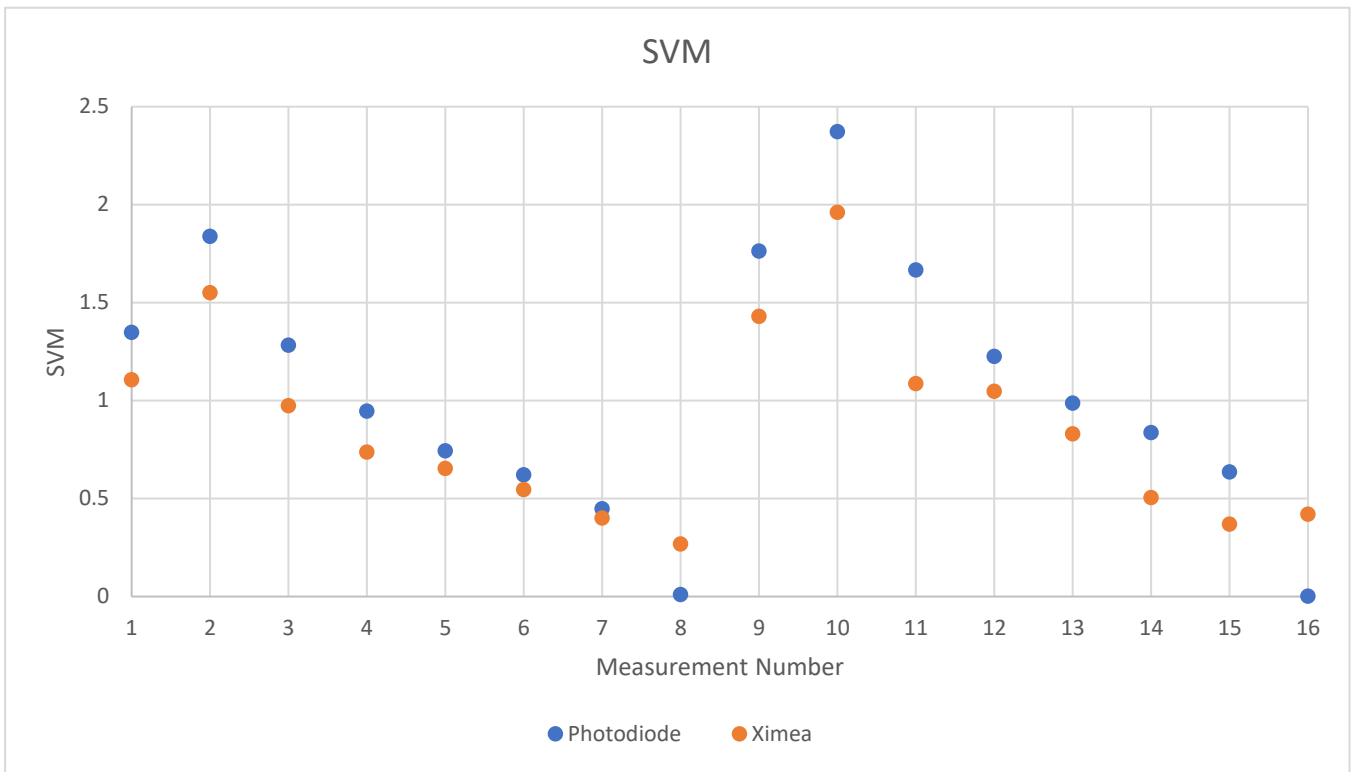
Ximea-Photodiode (%)

Συχνότητα (Hz)	Flicker Index	Flicker Percent	PstLM	SVM	Frequency
50	14.68%	37.74%	0.18%	18.92%	0.71%
100	14.78%	37.77%	254.54%	17.35%	0.70%
200	15.13%	37.76%	2948.60%	34.75%	0.72%
300	15.18%	37.86%	629.16%	14.61%	0.70%
400	15.44%	37.97%	1507.73%	15.90%	0.72%
500	15.85%	38.14%	4607.43%	39.54%	0.71%
1000	14.46%	37.52%	1463.72%	41.96%	2.44%
2000	30.55%	36.43%	3357.80%	16057.69%	11.84%

Στην συνέχεια, θα ακολουθήσουν διαγράμματα τύπου Scatter για το σύνολο των 12 μετρήσεων, για καλύτερη οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.







Βλέποντας τις ποσοστιαίες διαφορές των δύο οργάνων αλλά και την εικόνα που σχηματίζουν τα scatter plots, είναι προφανές, πως οι τιμές απέχουν κατά πολύ, σε όλα τα μεγέθη, εκτός από το μέγεθος της συχνότητας.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΡΤΒ

4.2.1 Αποτελέσματα πρώτου συνόλου

Ο σκοπός αυτού του συνόλου αυτού είναι η επαλήθευση της ικανότητας των δύο αισθητήρων CMOS να υπολογίζουν τη συχνότητα, το σχήμα, το βάθος διαμόρφωσης και τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) του φωτιστικού. Για τα πρώτα δύο μέρη, έγινε χρήση της ίδιας διάταξης.

Μέρος Πρώτο – Αλλαγές συχνότητας

Καθώς το φαινόμενο της φωτεινής πάλμωσης και του PstLM δεν είναι εμφανή στις ψηλές συχνότητες και σε συνδυασμό πως σε αυτές τις συχνότητες το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι εμφανές, πάρθηκε η απόφαση στις μετρήσεις για 500Hz και 1000Hz, να μην πραγματοποιηθεί η μέτρηση για PstLM από το όργανο BTS256, το οποίο χρειάζεται τουλάχιστον 180 δευτερόλεπτα μέτρησης για το συγκεκριμένο μέγεθος.

10Hz (1-2)

Sine						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	9.9751	9.9228	9.9679	9.9700	0.45	0.07
Flicker Percent	95.88%	93.51%	95.07%	94.55%	1.64	0.85
Flicker Index	0.3654	0.3425	0.3432	0.3457	0.21	6.47
PstLM	205.2622	247.4004	248.4586	250.7072	0.43	17.39
SVM	0.1464	0.1379	0.1362	0.1420	1.31	7.56

Square						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	10.0000	9.9365	9.9992	10.0000	0.63	0.01
Flicker Percent	99.60%	99.33%	100.00%	100.00%	0.67	0.40
Flicker Index	0.4959	0.4968	0.5013	0.4980	0.89	1.06
PstLM	232.2770	298.4861	301.3715	300.6905	0.96	22.93
SVM	0.9532	0.7335	0.9056	0.9636	19.00	5.25

50Hz (3-4)

Sine						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	49.7925	49.4949	49.8339	49.8800	0.68	0.08
Flicker Percent	95.84%	94.02%	95.36%	94.60%	1.41	0.50
Flicker Index	0.3668	0.3437	0.3429	0.3457	0.25	6.99
PstLM	7.8199	9.9411	8.9525	9.3475	11.04	12.65
SVM	3.2810	2.9768	2.6938	3.8835	10.51	21.80

Square						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	50.0000	49.7336	49.9961	50.0000	0.53	0.01
Flicker Percent	99.75%	100.36%	100.00%	100.00%	0.36	0.25
Flicker Index	0.4977	0.4961	0.4995	0.4900	0.68	0.37
PstLM	8.5843	11.3777	10.5256	10.4974	8.10	18.44
SVM	3.6731	3.3762	3.4653	3.7118	2.57	6.00

200Hz (5-6)

Sine						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	200.0000	197.8762	199.2859	200.0000	0.70	0.36
Flicker Percent	94.48%	94.83%	95.04%	94.35%	0.22	0.59
Flicker Index	0.3646	0.3467	0.3425	0.3409	1.21	6.44
PstLM	0.1712	2.6646	0.0743	0.1266	3485.40	130.38
SVM	3.0879	2.2899	3.1905	2.8895	28.23	3.22

Square						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	200.0000	197.3481	199.9845	200.0000	1.32	0.01
Flicker Percent	99.71%	100.26%	100.00%	100.00%	0.26	0.29
Flicker Index	0.4585	0.4843	0.4936	0.4267	1.87	7.10
PstLM	0.0291	4.0195	0.0259	0.5223	15391.79	12.18
SVM	3.4373	2.2786	3.7998	3.4267	40.03	9.54

500Hz (7-8)

Sine						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	500.0000	494.3708	497.9382	500.0000	0.72	0.41
Flicker Percent	94.78%	94.09%	93.73%	90.47%	0.39	1.12
Flicker Index	0.3562	0.3429	0.3408	0.3132	0.62	4.52
PstLM	0.2158	2.1221				
SVM	1.5090	1.3929	1.5657	1.3310	11.04	3.62

Square						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	500.0000	496.3723	499.9600	500.0000	0.72	0.01
Flicker Percent	98.52%	100.23%	100.00%	99.78%	0.23	1.48
Flicker Index	0.4566	0.4615	0.4815	0.3985	4.15	5.17
PstLM	0.0803	3.4817				
SVM	1.7154	1.2867	1.8471	1.5862	30.34	7.13

1000Hz (9-10)

Sine						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	1000.0000	987.9880	995.0373	1000.0000	0.71	0.50
Flicker Percent	91.62%	91.40%	93.05%	90.78%	1.77	1.53
Flicker Index	0.3270	0.3243	0.3345	0.2501	3.04	2.22
PstLM	0.6032	8.0189				
SVM	1.0412	1.0119	0.6794	0.7958	48.94	53.26

Square						
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	1000.0000	992.9930	999.9200	1000.0000	0.69	0.01
Flicker Percent	98.11%	100.14%	100.00%	92.90%	0.14	1.89
Flicker Index	0.4741	0.4224	0.4612	0.3038	8.42	2.79
PstLM	0.2147	6.6210				
SVM	1.3814	0.9865	0.8496	0.9615	16.12	62.60

Ως ποσοστιαίες διαφορές εδώ, είναι η διαφορά μεταξύ μιας κάμερας, με την τιμή του οργάνου BTS256. Με πράσινο χρώμα, έχουν σκιαστεί οι ποσοστιαίες διαφορές όπου η διαφορά του οργάνου BTS256 από την αντίστοιχη κάμερα, είναι μικρότερη του 5%. Παρατηρούμε πως η Ximea έχει περισσότερες τιμές κάτω του 5% ποσοστιαίας διαφοράς.

Μέρος Δεύτερο – Αλλαγές «duty cycle»

Όπως και πριν, καθώς το φαινόμενο της φωτεινής πάλμωσης και του PstLM δεν είναι εμφανή στις ψηλές συχνότητες και σε συνδυασμό πως σε αυτές τις συχνότητες το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι εμφανές, πάρθηκε η απόφαση, καθώς η συχνότητα θα παρέμενε σταθερή στα 100Hz, να μην πραγματοποιηθεί η μέτρηση για PstLM από το όργανο BTS256.

10% Duty Cycle (11)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0000	152.1141	99.9920	100.0000	52.13	0.01
Flicker Percent	99.75%	100.37%	100%	100%	0.37	0.25
Flicker Index	0.8648	0.8832	0.9050	0.8525	2.41	4.44
PstLM	0.1647	20.2263				
SVM	7.9551	7.2287	8.3995	8.1449	13.94	5.29

30% Duty Cycle (12)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0000	99.2979	99.9920	100.0000	0.69	0.01
Flicker Percent	99.77%	100.37%	100%	100%	0.37	0.23
Flicker Index	0.6922	0.6887	0.6977	0.6702	1.29	0.79
PstLM	0.1491	3.3937				
SVM	6.5904	5.6600	6.6604	6.7143	15.02	1.05

50% Duty Cycle (13)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0000	99.2979	99.9920	100.0000	0.69	0.01
Flicker Percent	99.80%	99.25%	100%	100%	0.75	0.20
Flicker Index	0.4888	0.4868	0.4975	0.4798	2.14	1.74
PstLM	0.1380	6.7737				
SVM	4.8558	4.7178	4.8596	4.9336	2.92	0.08

70% Duty Cycle (14)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0000	99.2979	99.9920	100.0000	0.69	0.01
Flicker Percent	99.65%	100.34%	100%	100%	0.34	0.35
Flicker Index	0.2908	0.2943	0.2981	0.2873	1.29	2.45
PstLM	0.0735	3.5305				
SVM	2.8372	2.8387	2.8458	2.8779	0.25	0.30

90% Duty Cycle (15)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Viso LabFlicker	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0000	348.9362	99.9920	100.0000	248.96	0.01
Flicker Percent	98.51%	101.20%	100%	99.78%	1.20	1.49
Flicker Index	0.0984	0.0988	0.0991	0.0948	0.33	0.73
PstLM	0.0386	3.5677				
SVM	0.9063	0.7677	0.9198	0.9053	16.54	1.47

Στο παρόν μέρος, παρατηρούμε πως η κάμερα IDT OS7, καταφέρνει σχεδόν σε όλες τις

μετρήσεις να βρίσκεται κάτω από το 5% ποσοστιαίας διαφοράς από το όργανο BTS256. Επίσης παρατηρούμε πως και η κάμερα Ximea έχει καταφέρει να βρίσκεται κάτω από το 5% ποσοστιαίας διαφοράς σε μεγάλο μέρος της διαδικασίας.

Μέρος Τρίτο – Αλλαγές “Modulation Depth”

Όπως και πριν, καθώς το φαινόμενο της φωτεινής πάλμωσης και του PstLM δεν είναι εμφανή στις ψηλές συχνότητες και σε συνδυασμό πως σε αυτές τις συχνότητες το στροβοσκοπικό φαινόμενο είναι εμφανές, πάρθηκε η απόφαση, καθώς η συχνότητα θα παρέμενε σταθερή στα 100Hz, να μην πραγματοποιηθεί η μέτρηση για PstLM από το όργανο BTS256.

10% Intensity (16)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0000	99.2979	99.9940	0.70	0.01
Flicker Percent	55.80%	77.62%	51%	53.03	10.02
Flicker Index	0.2730	0.3717	0.2489	49.31	9.68
PstLM	0.1263	6.2449			
SVM	2.6724	2.9787	2.4341	22.38	9.79

30% Intensity (17)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.1669	99.2761	99.9940	0.72	0.17
Flicker Percent	28.65%	48.74%	25%	94.23	14.14
Flicker Index	0.1338	0.1414	0.1232	14.80	8.60
PstLM	0.0682	5.5507			
SVM	1.3071	1.3259	1.2044	10.09	8.53

50% Intensity (18)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.9534	99.2966	99.9940	0.70	0.96
Flicker Percent	18.99%	29.61%	16%	80.74	15.93
Flicker Index	0.0886	0.0905	0.0803	12.75	10.34
PstLM	0.0449	1.4163			
SVM	0.8621	0.9006	0.7848	14.75	9.85

70% Intensity (19)

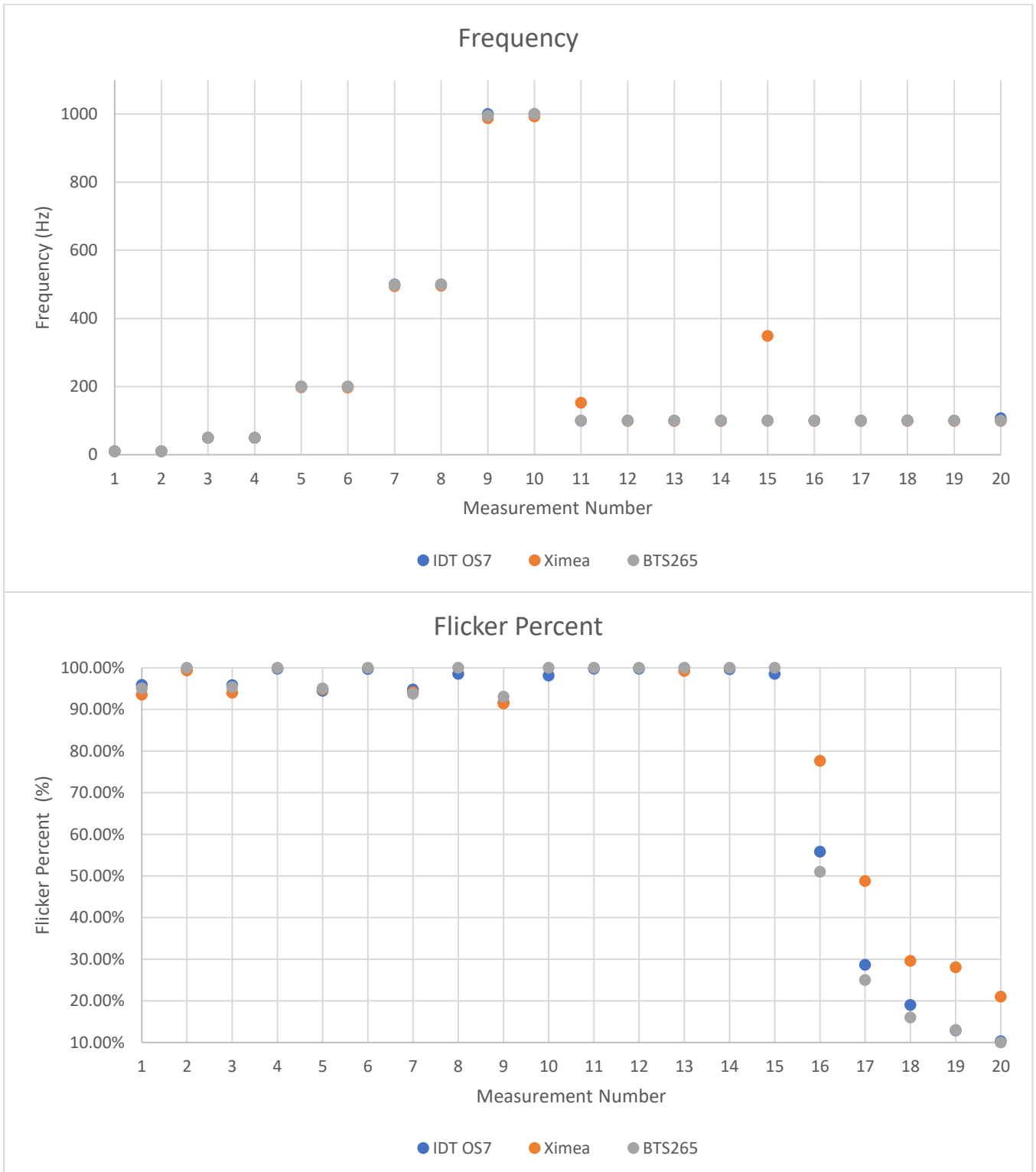
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0000	99.3103	99.9940	0.68	0.01
Flicker Percent	12.89%	28.07%	13%	119.16	0.65
Flicker Index	0.0631	0.0669	0.0599	11.68	5.36
PstLM	0.0559	3.1584			
SVM	0.6140	0.5714	0.5851	2.34	4.94

90% Intensity (20)

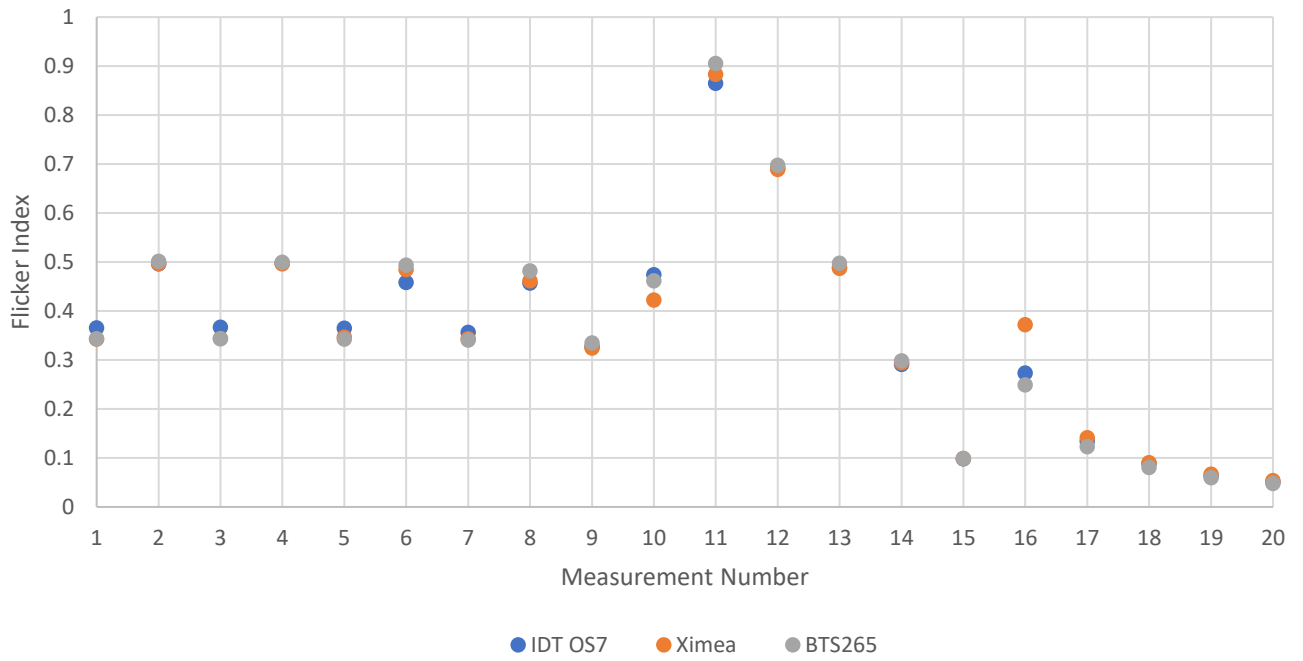
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	106.8966	99.2840	99.9940	0.71	6.90
Flicker Percent	10.32%	21.00%	10%	106.54	1.47
Flicker Index	0.0503	0.0540	0.0481	12.21	4.61
PstLM	0.0525	2.4415			
SVM	0.4916	0.3961	0.4701	15.75	4.56

Παρατηρούμε, πως στο συγκεκριμένο μέρος, πως οι δύο κάμερες, κυρίως στην συχνότητα κατάφεραν μετρήσεις κάτω από το 5% ποσοστιαίας διαφοράς από το όργανο BTS256.

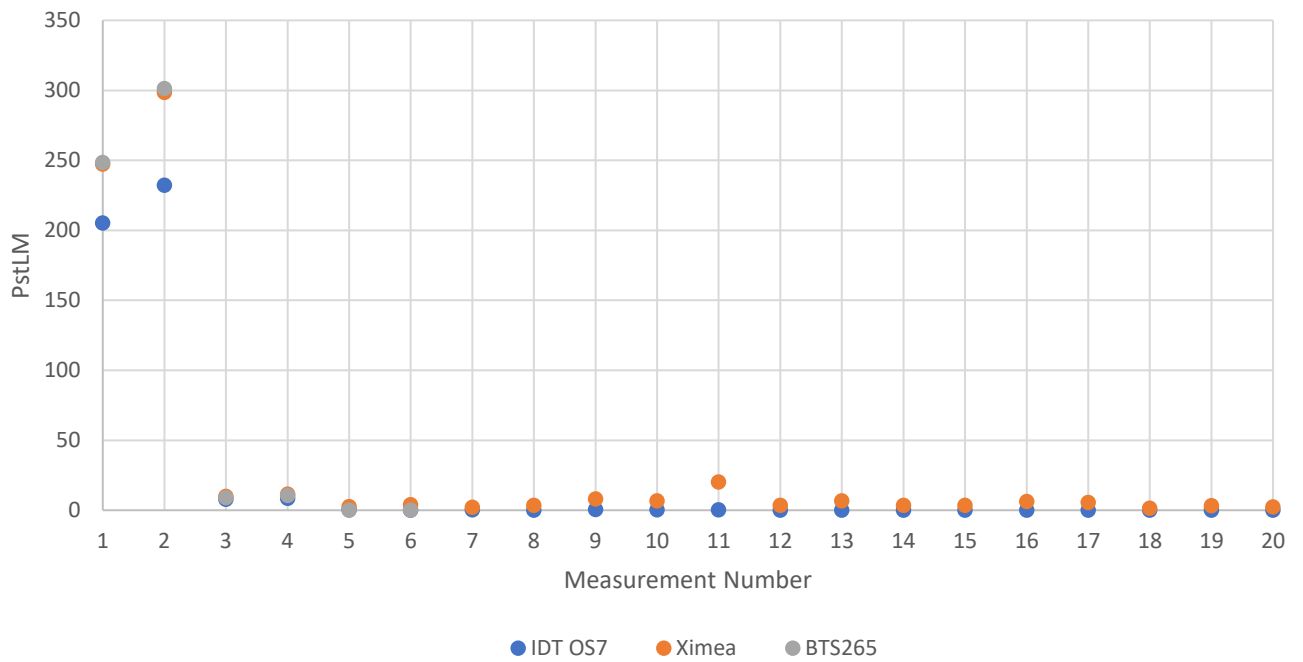
Στην συνέχεια, θα ακολουθήσουν διαγράμματα τύπου Scatter για το σύνολο των 20 μετρήσεων του συγκεκριμένου συνόλου, για καλύτερη οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.

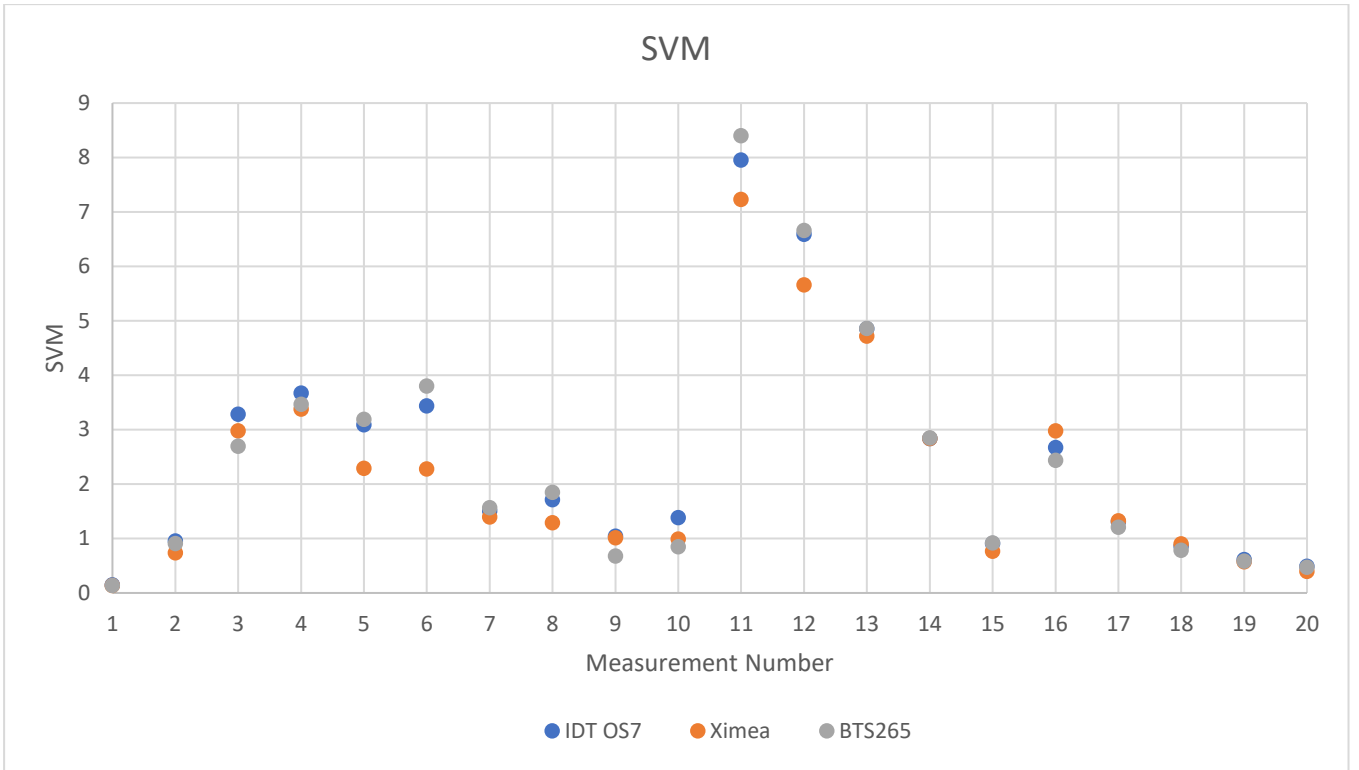


Flicker Index



PstLM





4.2.2 Αποτελέσματα δεύτερου συνόλου

Ο σκοπός αυτού του συνόλου αυτού είναι η διερεύνηση της επίδρασης του ρυθμού λήψης εικόνων ανά δευτερόλεπτο της κάμερας. Δοκιμάστηκαν δύο κυματομορφές, ημίτονο και τετραγωνικός παλμός, συχνότητας 1kHz, έτσι δεν πραγματοποιήθηκε η μέτρηση για PstLM από το όργανο BTS256. Στο συγκεκριμένο σύνολο έγινε χρήση μόνο της OS7-S3.

4000 FPS (1-2)

Sine				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	994.9917	995.0373	1000.0000	0.00
Flicker Percent	92.02%	93.05%	90.78%	1.10
Flicker Index	0.3268	0.3345	0.2501	2.29
PstLM	0.1050			
SVM	1.0460	0.6794	0.7958	53.96

Square				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	1000.0000	999.9200	1000.0000	0.0080
Flicker Percent	98.73%	100.00%	92.90%	1.2698
Flicker Index	0.4592	0.4612	0.3038	0.4423
PstLM	0.1192			
SVM	1.3419	0.8496	0.9615	57.9517

8000 FPS (3-4)

Sine				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	994.9917	995.03732	1000	0.0046
Flicker Percent	94.40%	93.05%	90.78%	1.4530
Flicker Index	0.3539	0.3345	0.2501	5.8257
PstLM	0.0303			
SVM	1.1058	0.6794	0.7958	62.7608

Square				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	1000.0000	999.9200	1000.0000	0.0080
Flicker Percent	99.30%	100.00%	92.90%	0.6998
Flicker Index	0.4756	0.4612	0.3038	3.1074
PstLM	0.2974			
SVM	1.3125	0.8496	0.9615	54.4966

16000 FPS (5-6)

Sine				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	994.8647	995.03732	1000	0.0174
Flicker Percent	93.88%	93.05%	90.78%	0.8986
Flicker Index	0.3610	0.3345	0.2501	7.9365
PstLM	0.0785			
SVM	1.1421	0.6794	0.7958	68.1014

Square				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	999.8608	999.9200	1000.0000	0.0059
Flicker Percent	99.64%	100.00%	92.90%	0.3577
Flicker Index	0.4701	0.4612	0.3038	1.9280
PstLM	0.3946			
SVM	1.2977	0.8496	0.9615	52.7449

32000 FPS (7-8)

Sine				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	994.7149	995.03732	1000	0.0324
Flicker Percent	94.14%	93.05%	90.78%	1.1770
Flicker Index	0.3646	0.3345	0.2501	9.0067
PstLM	0.0182			
SVM	1.1240	0.6794	0.7958	65.4371

Square				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	999.5826	999.9200	1000.0000	0.0337
Flicker Percent	99.82%	100.00%	92.90%	0.1754
Flicker Index	0.4870	0.4612	0.3038	5.5826
PstLM	0.4129			
SVM	1.2712	0.8496	0.9615	49.6273

64000 FPS (9-10)

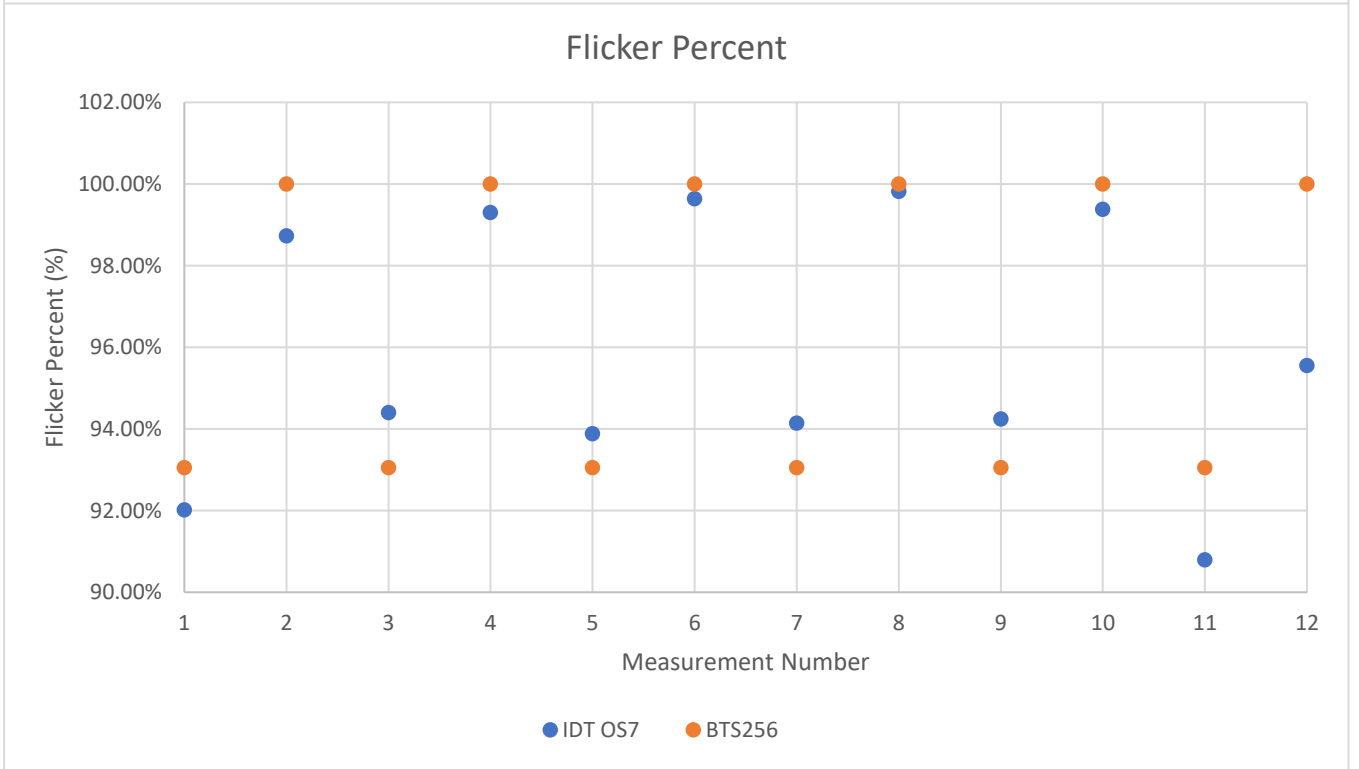
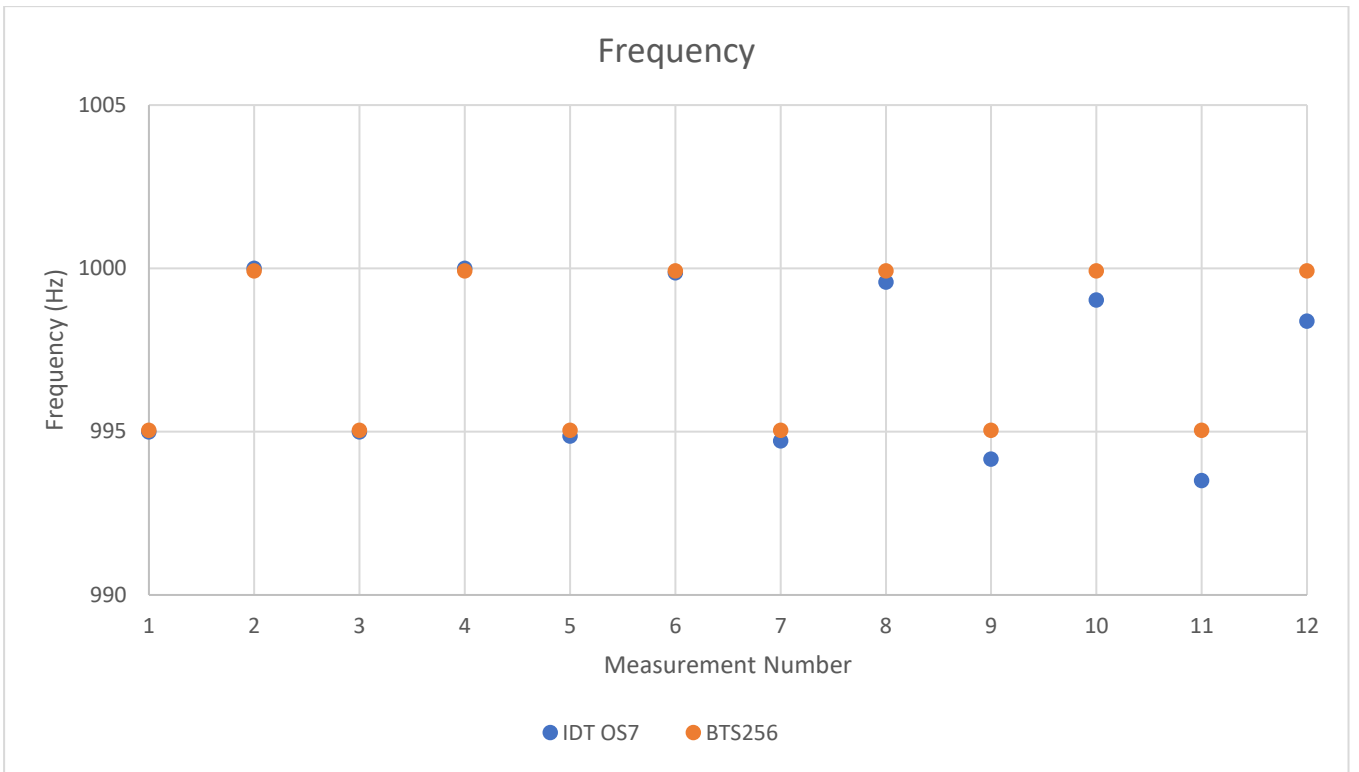
Sine				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	994.1618	995.03732	1000	0.0880
Flicker Percent	94.24%	93.05%	90.78%	1.2819
Flicker Index	0.3669	0.3345	0.2501	9.7042
PstLM	21.0195			
SVM	1.1553	0.6794	0.7958	70.0543

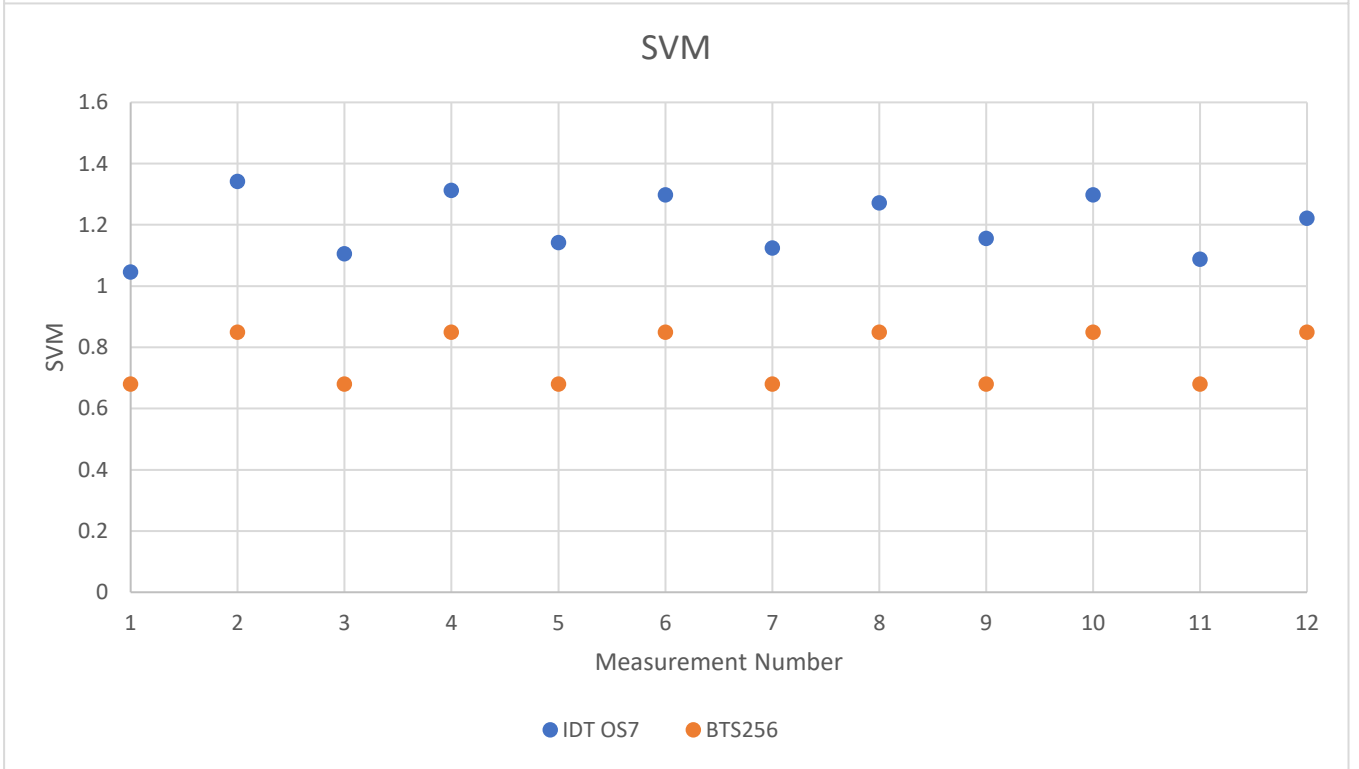
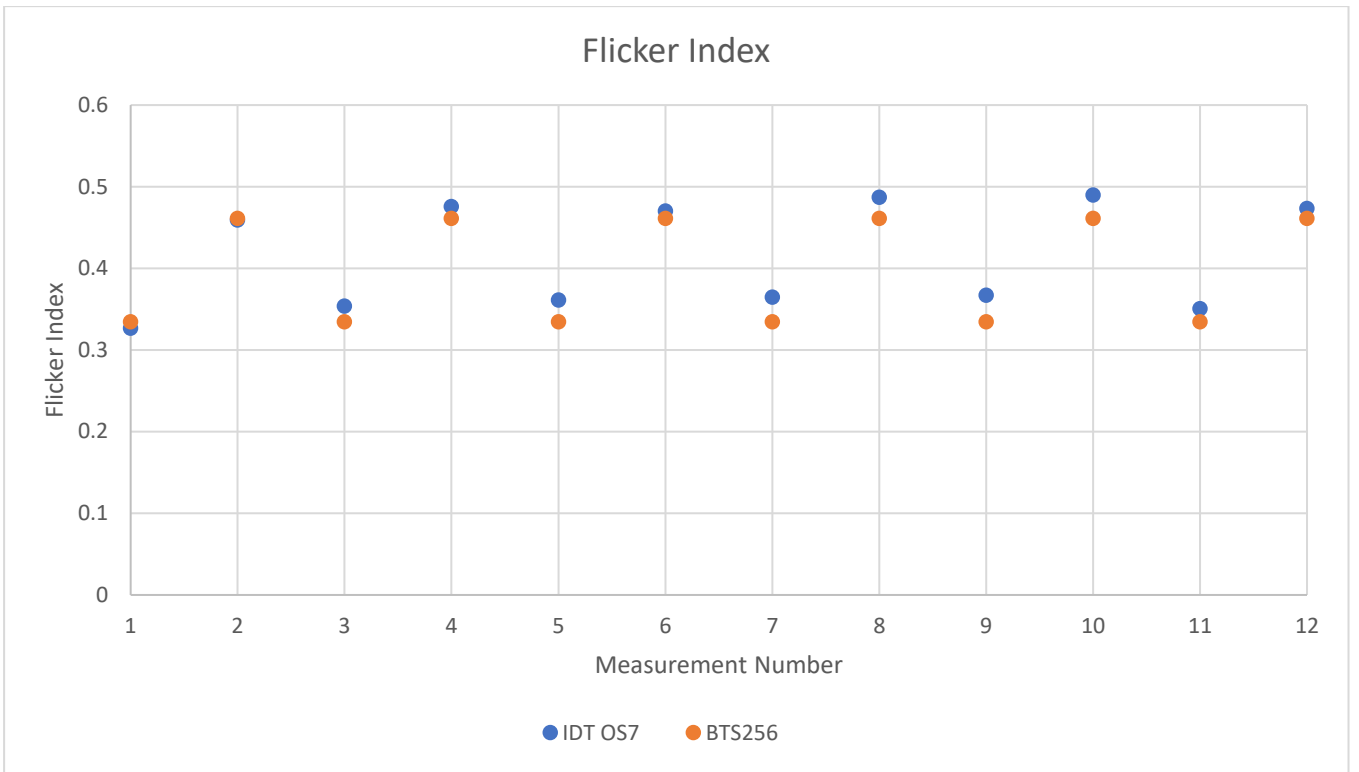
Square				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	999.0266	999.9200	1000.0000	0.0893
Flicker Percent	99.38%	100.00%	92.90%	0.6184
Flicker Index	0.4896	0.4612	0.3038	6.1535
PstLM	45.4061			
SVM	1.2974	0.8496	0.9615	52.7153

128000 FPS (11-12)

Sine				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	993.5058	995.03732	1000	0.1539
Flicker Percent	90.79%	93.05%	90.78%	2.4278
Flicker Index	0.3506	0.3345	0.2501	4.8242
PstLM	4.4949E+16			
SVM	1.0878	0.6794	0.7958	60.1132

Square				
	IDT OS7	BTS256	Viso LabFlicker	OS7-BTS (%)
Frequency	998.3844	999.9200	1000.0000	0.1536
Flicker Percent	95.55%	100.00%	92.90%	4.4535
Flicker Index	0.4734	0.4612	0.3038	2.6335
PstLM	4.69882E+16			
SVM	1.2212	0.8496	0.9615	43.7451





Αρχικά, είναι εμφανές πως τα μεγέθη της συχνότητας και του «Flicker Percent», είναι αυτά που έχουν υπολογισθεί όλες τις φορές κάτω από το 5% ποσοστιαίας διαφοράς από το όργανο BTS256. Με μερικές εξαιρέσεις, το μέγεθος «Flicker Index» έχει υπολογισθεί σχεδόν όλες τις φορές κάτω από το 5% ποσοστιαίας διαφοράς.

Επίσης, στην μέτρηση με 128000FPS, παρατηρούμε πως με την κάμερα IDT OS7 έχουν υπολογισθεί υπερβολικά μεγάλες τιμές PstLM. Παρόλο που δεν υπάρχει μέτρηση με το BTS256, είναι ασφαλές να συμπεράνουμε πως αυτή η τιμή του PstLM είναι λανθασμένη, καθώς σε τετραγωνικό παλμό και ημίτονο συχνότητας 1kHz, δεν είναι εφικτό να υπολογισθεί τόσο ψηλή. Μια μικρότερη αύξηση στην τιμή του PstLM παρατηρείται και στην μέτρηση με 64000FPS, όπου και εδώ είναι ασφαλές να συμπεράνουμε πως είναι λανθασμένη.

Μέσα από τα scatter plots, επιβεβαιώνουμε οπτικά τα παραπάνω συμπεράσματα. Το scatter plot για το μέγεθος του PstLM δεν υπολογίσθηκε καθώς δεν πάρθηκε μέτρηση για το συγκεκριμένο μέγεθος από το όργανο BTS256.

4.2.3 Αποτελέσματα τρίτου συνόλου

Ο σκοπός αυτού του συνόλου αυτού είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων των καμερών, να καταγράψουν με επιτυχία περισσότερες από μια πηγές φωτός με διαφορετικά χαρακτηριστικά κυμάτωσης η κάθε μία.

Μέρος Πρώτο

Για το πρώτο μέρος τα τρία φωτιστικά έχουν ως έξοδο κάποιου είδους κυματομορφής, συγχρονισμένες και ασυγχρόνιστες, με την ίδια συχνότητα εξόδου 100Hz.

Synchronized 100Hz

Left - Square		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	100.000	99.273
Flicker Percent	97.950%	99.283%
Flicker Index	0.484	0.481
PstLM	0.112	4.048
SVM	4.723	4.758

Middle - Sine		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	100.056	99.174
Flicker Percent	95.031%	93.255%
Flicker Index	0.366	0.344
PstLM	0.156	5.504
SVM	4.318	3.548

Right - Triangle		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	100.056	99.323
Flicker Percent	92.358%	91.763%
Flicker Index	0.306	0.280
PstLM	0.114	5.428
SVM	3.726	2.920

BTS – Superposition					
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.000	99.323	99.992	0.67	0.01
Flicker Percent	90.382%	85.196%	94.602%	9.94	4.46
Flicker Index	0.263	0.253	0.233	8.50	12.52
PstLM	0.236	2.418			
SVM	3.260	2.651	2.937	9.75	11.01

Παρατηρούμε, πως και οι δύο κάμερες, έχουν μεγάλες ποσοστιαίες αποκλίσεις από το όργανο BTS256, εκτός στην περίπτωση του μεγέθους της συχνότητας. Η κάμερα IDT OS7 έχει επίσης πετύχει τιμή κάτω από το 5% ποσοστιαίας διαφοράς στο μέγεθος του «Flicker Percent».

Not Synchronized 100Hz

Left - Square		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	100.000	99.273
Flicker Percent	96.515%	99.065%
Flicker Index	0.468	0.478
PstLM	0.089	1.479
SVM	4.694	4.794

Middle - Sine		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	100.000	99.273
Flicker Percent	94.613%	92.721%
Flicker Index	0.366	0.343
PstLM	0.083	4.699
SVM	4.305	4.062

Right - Triangle		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	100.056	99.348
Flicker Percent	91.211%	92.111%
Flicker Index	0.303	0.282
PstLM	0.099	5.237
SVM	3.695	2.783

BTS – Superposition					
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.000	99.273	99.992	0.72	0.01
Flicker Percent	54.942%	76.846%	52.168%	47.31	5.32
Flicker Index	0.177	0.175	0.097	80.12	82.63
PstLM	0.134	1.594			
SVM	1.827	2.122	0.902	135.35	102.61

Παρατηρούμε, πως και οι δύο κάμερες, έχουν μεγάλες ποσοστιαίες αποκλίσεις από το όργανο BTS256, εκτός στην περίπτωση του μεγέθους της συχνότητας.

Μέρος Δεύτερο

Για το μέρος δεύτερο, δόθηκε η εντολή ώστε μία έξοδος να έχει σήμα σταθερής φωτεινής έντασης, και τα άλλα δύο φωτιστικά ως έξοδο κάποιου είδους κυματομορφής.

Πρώτη Μέτρηση

Left, Square, Duty cycle 50%, 95Hz		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	95.0226	94.3302
Flicker Percent	97.79%	99.13%
Flicker Index	0.4769	0.4813
PstLM	0.6881	2.1161
SVM	4.8752	4.8991

Right, Square, Duty cycle 50%, 105Hz

	IDT OS7	Ximea
Frequency	105.0279	104.2607
Flicker Percent	98.41%	99.06%
Flicker Index	0.4751	0.4834
PstLM	0.5853	2.3608
SVM	4.6164	4.8096

BTS – Superposition

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	123.6873	222.1533	94.972965	133.91	30.23
Flicker Percent	81.91%	59.88%	80.06%	25.21	2.30
Flicker Index	0.2168	0.1357	0.203581	33.34	6.48
PstLM	4.0985	4.6545			
SVM	2.4485	1.3790	2.309518	40.29	6.02

Δεύτερη Μέτρηση

Left, Sine, 95Hz		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	94.7547	94.3538
Flicker Percent	93.82%	93.32%
Flicker Index	0.3580	0.3316
PstLM	0.3443	10.0278
SVM	4.4104	2.8248

Right, Square, Duty cycle 50%, 105Hz		
	IDT OS7	Ximea
Frequency	105.0279	104.2607
Flicker Percent	98.25%	99.04%
Flicker Index	0.4795	0.4846
PstLM	0.1537	5.9652
SVM	4.6147	3.6520

BTS – Superposition					
	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	105.0228	93.0233	94.897733	1.98	10.67
Flicker Percent	79.35%	63.26%	77.39%	18.27	2.52
Flicker Index	0.2204	0.1392	0.209111	33.43	5.39
PstLM	3.8096	4.4674			
SVM	2.2791	1.4698	2.125225	30.84	7.24

Στο συγκεκριμένο μέρος, παρατηρούμε την αδυναμία των καμερών να υπολογίσουν τα μεγέθη, με κάποιες εξαιρέσεις στα μεγέθη της συχνότητας και του «Flicker Percent». Η αποτυχία αυτή, πολύ πιθανό να οφείλεται στο γεγονός πως οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μια φωτιζόμενη επιφάνεια, συγκεκριμένα στην πρόσοψη του αισθητήρα BTS256, και όχι στα φωτιστικά.

4.2.4 Αποτελέσματα τετάρτου συνόλου

Μέρος πρώτο

Σε μία ειδική βάση τροφοδοσίας, τοποθετήθηκαν οι τρεις λαμπτήρες της αγοράς. Μετά το πέρας ενός χρονικού διαστήματος για την σταθεροποίηση της λάμπας πυρακτώσεως, η κάμερα IDT OS7, έλαβε δύο λήψεις, μία με ρυθμό 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο για 0.5 δευτερόλεπτα και μία με ρυθμό 8000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο για 0.25 δευτερόλεπτα. Η κάμερα Ximea, έκανε τρεις δειγματοληψίας, μία για κάθε φωτιστικό, με ρυθμό 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο, διάρκειας 5 δευτερολέπτων. Στην συνέχεια, με την χρήση του BTS256, καταμετρήθηκε έκαστος μόνη της η κάθε λάμπα. Δεν πραγματοποιήθηκε η μέτρηση για PstLM από το όργανο BTS256.

Left, Phillips Hue (1)

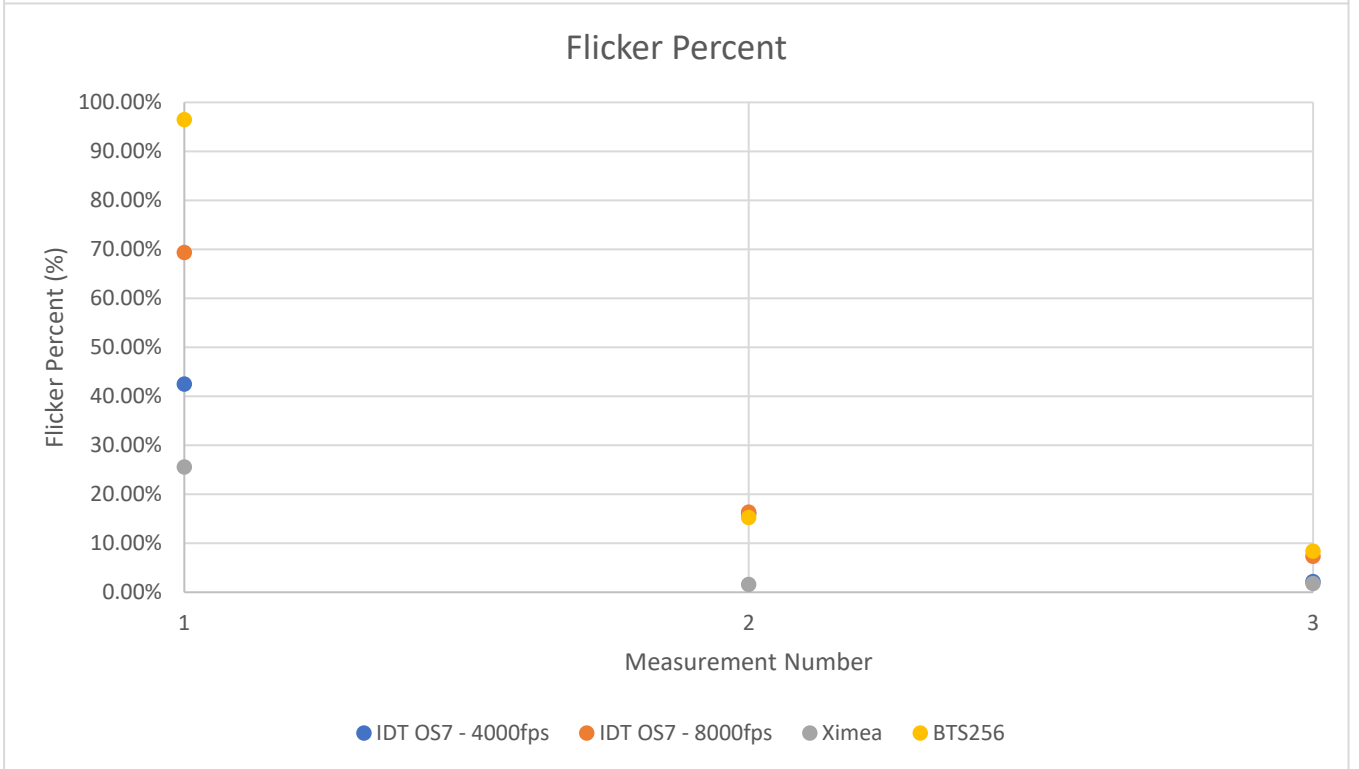
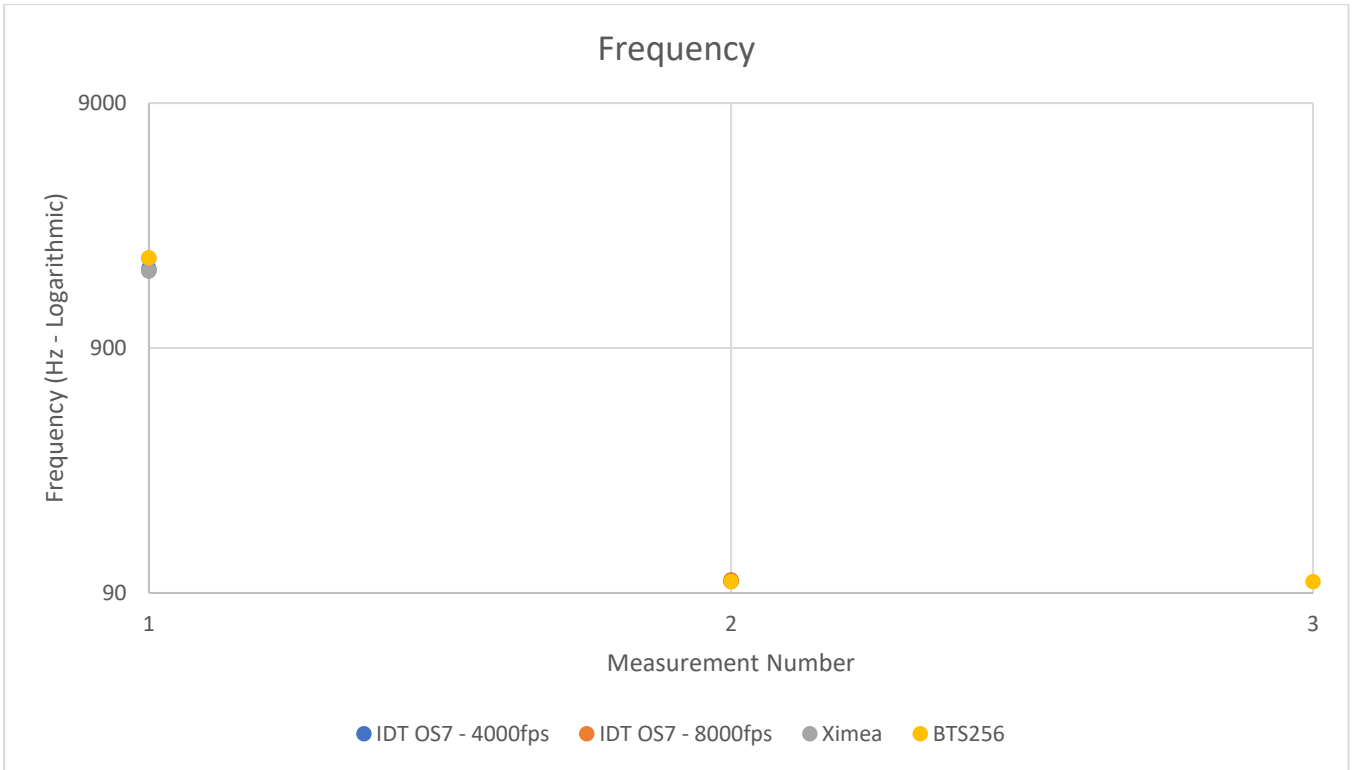
	IDT OS7 - 4000fps	IDT OS7 - 8000fps	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7 (4000fps)- BTS (%)	OS7 (8000fps)- BTS (%)
Frequency	1893.333	2091.212	1859.532	2100.004	11.451	9.841	0.419
Flicker Percent	42.479%	69.316%	25.565%	96.437%	73.490	55.952	28.123
Flicker Index	0.100	0.168	0.049	0.209	76.713	52.221	19.382
PstLM	0.024	0.027	1.586				
SVM	0.335	0.088	0.206	0.141	46.061	138.081	37.762

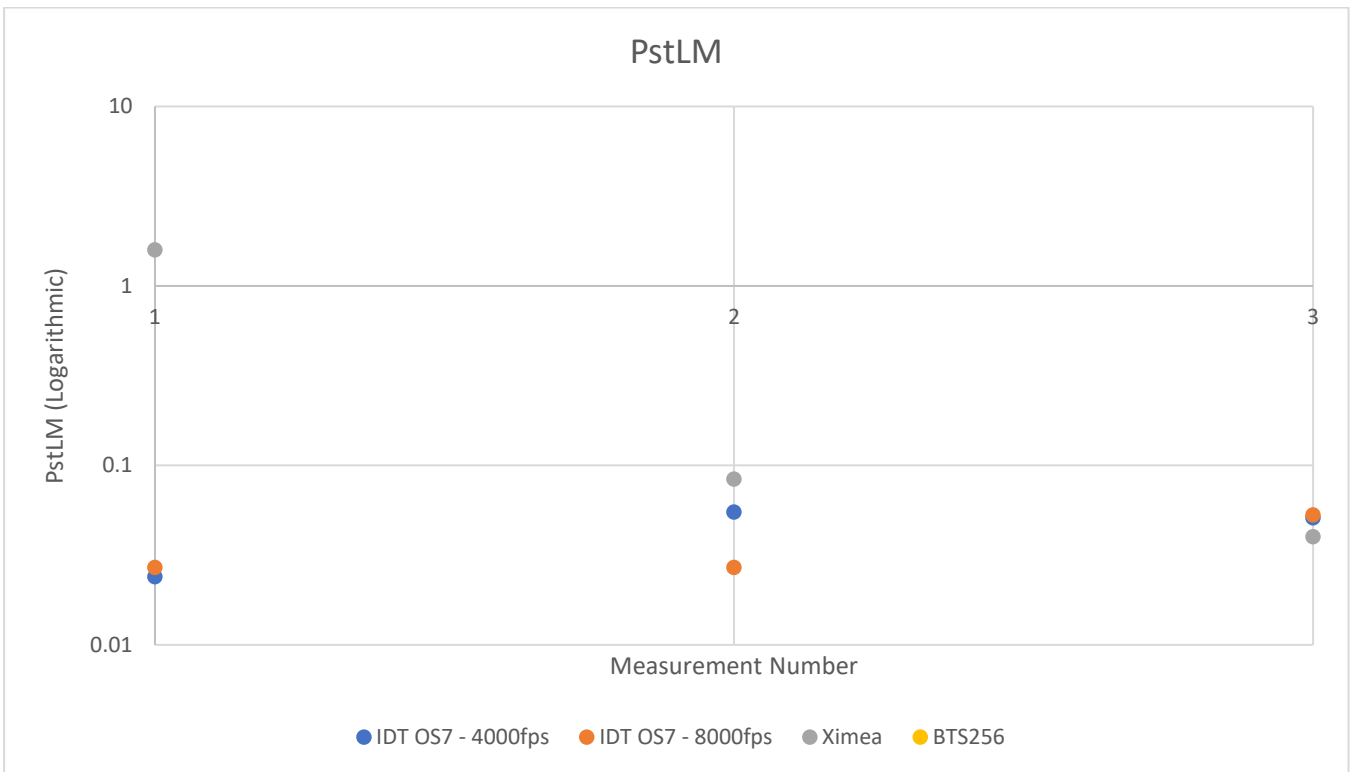
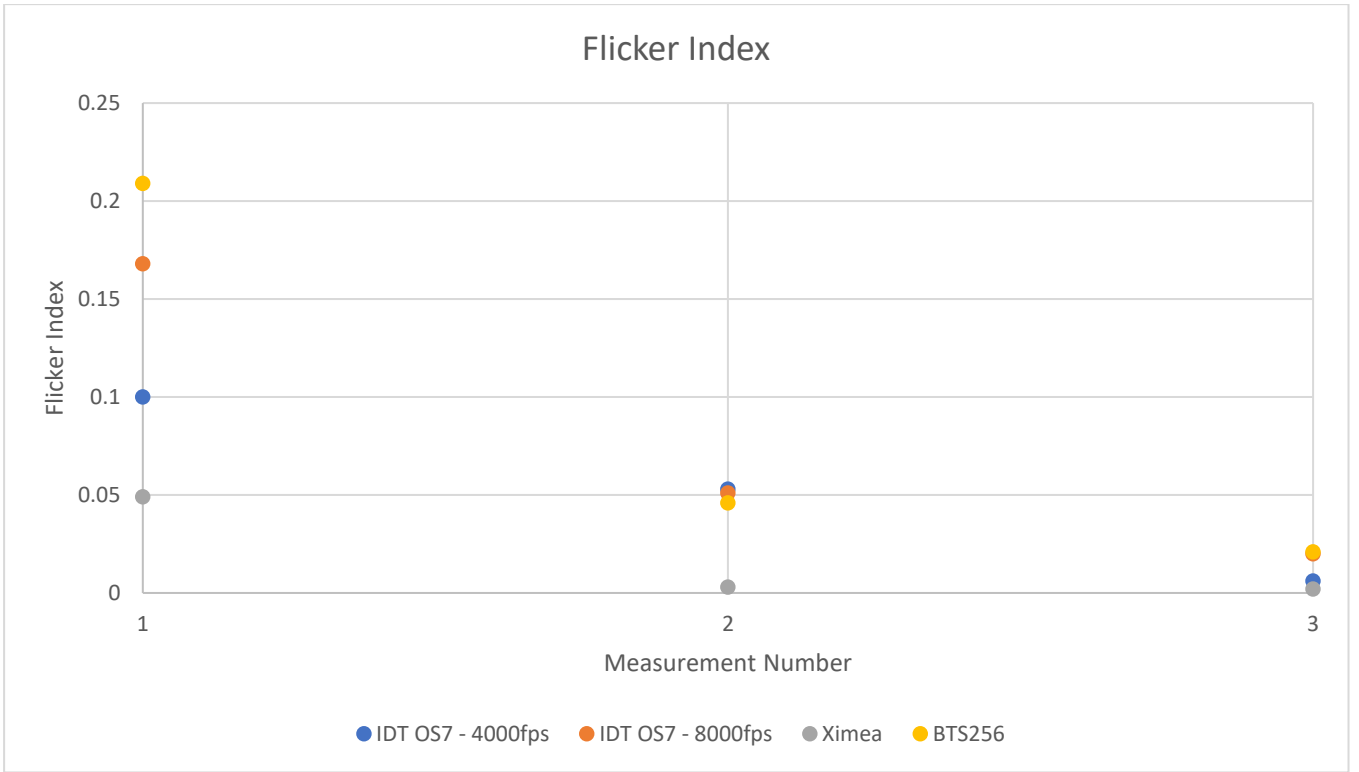
Middle, Incadesent (2)

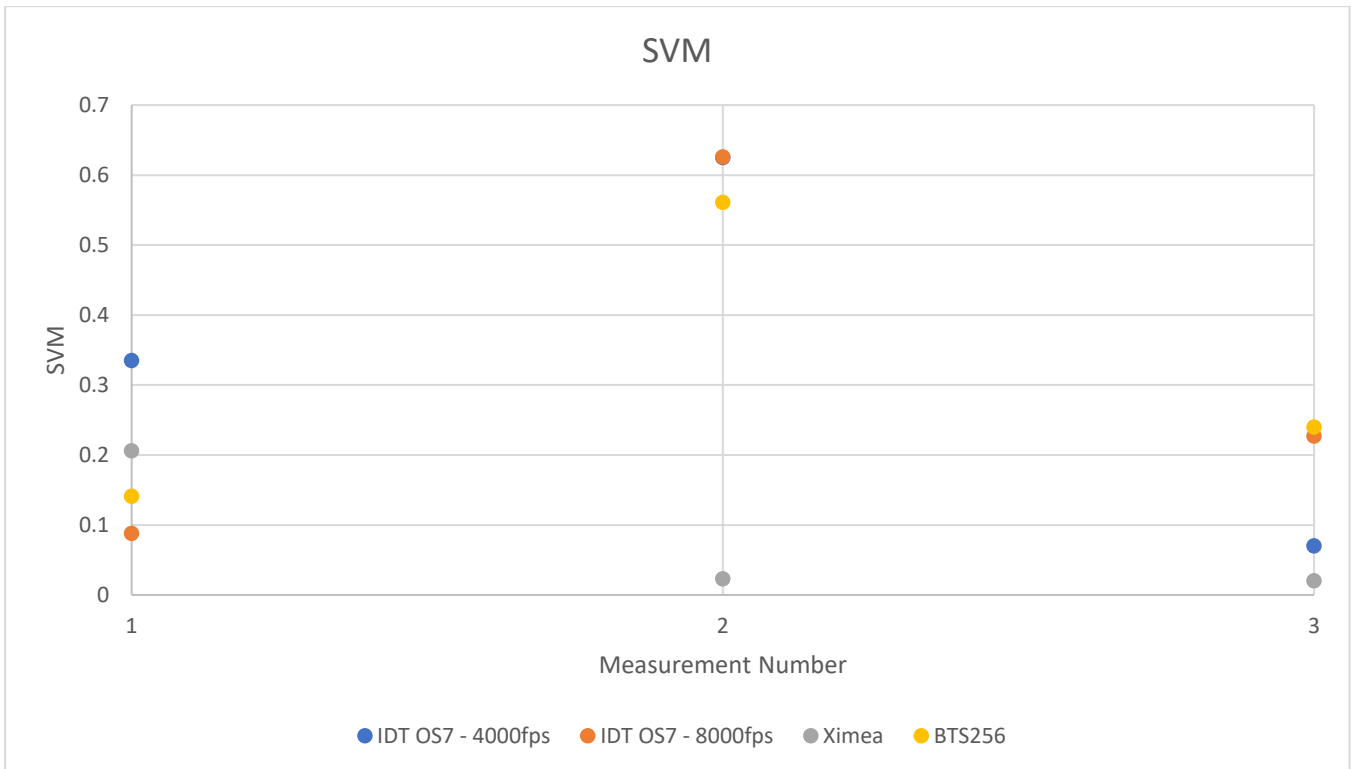
	IDT OS7 - 4000fps	IDT OS7 - 8000fps	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7 (4000fps)- BTS (%)	OS7 (8000fps)- BTS (%)
Frequency	100.463	101.463	NaN	99.956	Αδ. Πράξης	0.507	1.508
Flicker Percent	16.024%	16.341%	1.598%	15.209%	89.495	5.361	7.446
Flicker Index	0.053	0.051	0.003	0.046	94.432	13.369	10.496
PstLM	0.055	0.027	0.084				
SVM	0.625	0.626	0.023	0.561	95.951	11.449	11.707

Right, LED Filament (3)

	IDT OS7 - 4000fps	IDT OS7 - 8000fps	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7 (4000fps)- BTS (%)	OS7 (8000fps)- BTS (%)
Frequency	NaN	NaN	NaN	99.950	Αδ. Πράξης	Αδ. Πράξης	Αδ. Πράξης
Flicker Percent	2.177%	7.355%	1.745%	8.400%	79.228	74.086	12.438
Flicker Index	0.006	0.020	0.002	0.021	91.534	70.523	5.711
PstLM	0.051	0.053	0.040				
SVM	0.070	0.227	0.020	0.240	91.675	71.046	5.469







Αρχικά, παρατηρούμε την αδυναμία του υπολογισμού της συχνότητας. Για την περίπτωση του δεξιού φωτιστικού (LED Filament), ίσως οφείλεται στο γεγονός πως η περιοχή στην οποία έγινε η μέτρηση, περιλαμβάνει αρκετές φωτοδιόδους εκπομπής φωτός, πράγμα που περιπλέκει τους υπολογισμούς.

Επιπλέον, παρατηρούμε πως μόνο σε δύο περιπτώσεις έχει επιτευχθεί τιμή κάτω από το 5% ποσοστιαίας διαφοράς, συγκεκριμένα στην λάμπα πυρακτώσεως, στο μέγεθος της συχνότητας με την χρήση της κάμερας IDT OS7.

Μέρος δεύτερο

Στο συγκεκριμένο μέρος, μετρήθηκαν τρεις λαμπτήρες τύπου «LED Candles», διαφορετικοί μεταξύ τους. Στον κάθε ένα δόθηκε διαφορετική ρύθμιση λειτουργίας. Η διαδικασία μέτρησης ήταν παρόμοια με το προηγούμενο μέρος. Η κάμερα IDT OS7 έλαβε μόνο μία μέτρηση με ρυθμό 8000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο για 0.25 δευτερόλεπτα. Η κάμερα Ximea, έκανε τρεις δειγματοληψίας, μία για κάθε φωτιστικό, με ρυθμό 4000 εικόνων ανά δευτερόλεπτο, διάρκειας 5 δευτερολέπτων. Στην συνέχεια, με την χρήση του BTS256, καταμετρήθηκε έκαστος μόνος του ο κάθε λαμπτήρας. Δεν πραγματοποιήθηκε η μέτρηση για PstLM από το όργανο BTS256.

Left (1)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	277.2499	440.2201	183.4869	139.92	51.10
Flicker Percent	94.51%	97.79%	100.0000%	2.21	5.49
Flicker Index	0.5544	0.5987	0.9173	34.74	39.56
PstLM	1.8510	39.5849			
SVM	3.6530	3.4706	6.513656	46.72	43.92

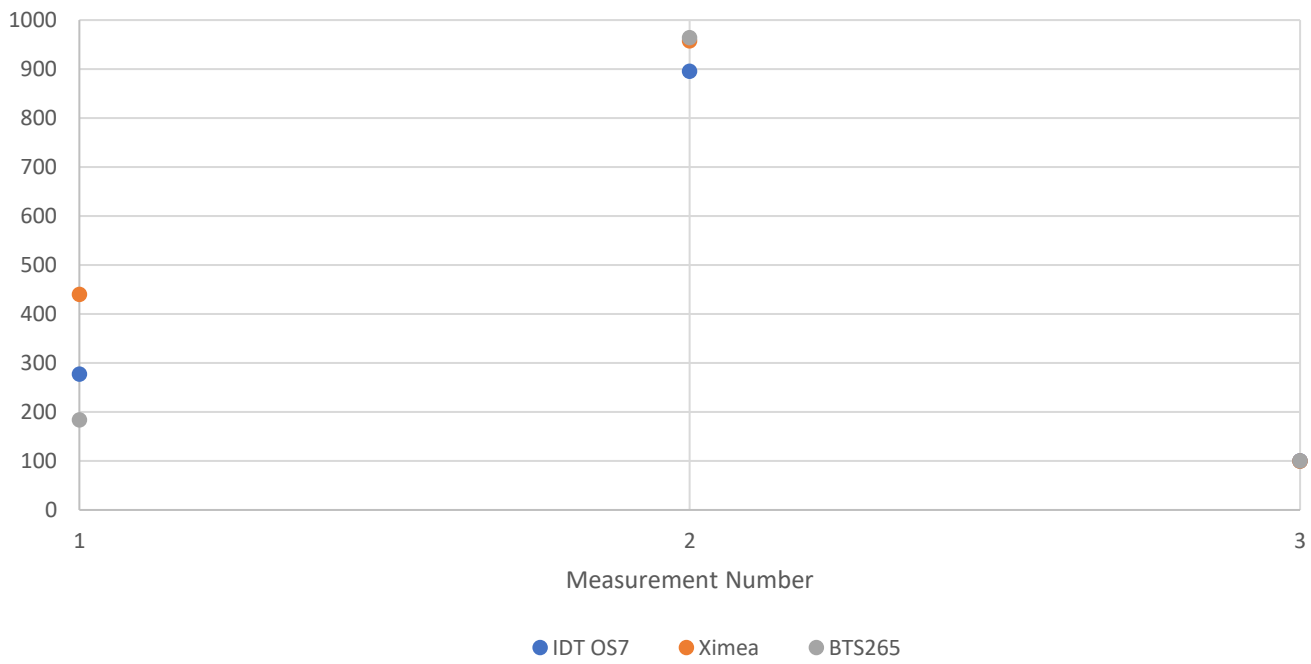
Middle (2)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	895.4883	957.2393	963.9740	0.70	7.10
Flicker Percent	97.81%	103.50%	100.0000%	3.50	2.19
Flicker Index	0.6157	0.6654	0.6841	2.73	9.99
PstLM	0.2672	6.3321			
SVM	3.4932	3.1253	3.026538	3.26	15.42

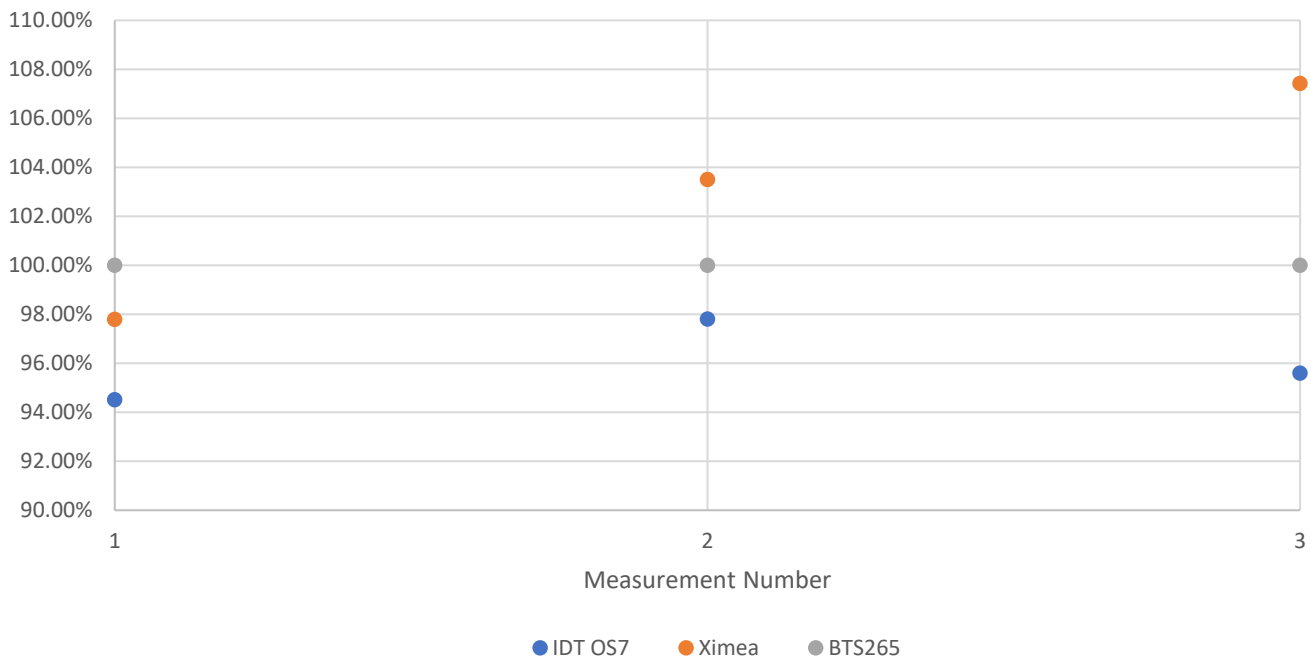
Right (3)

	IDT OS7	Ximea	BTS256	Ximea-BTS (%)	OS7-BTS (%)
Frequency	100.0569	99.3726	99.9451	0.57	0.11
Flicker Percent	95.60%	107.42%	100.0000%	7.42	4.40
Flicker Index	0.6871	0.7804	0.7935	1.66	13.41
PstLM	0.7378	24.1249			
SVM	6.5085	6.9970	7.2467	3.45	10.19

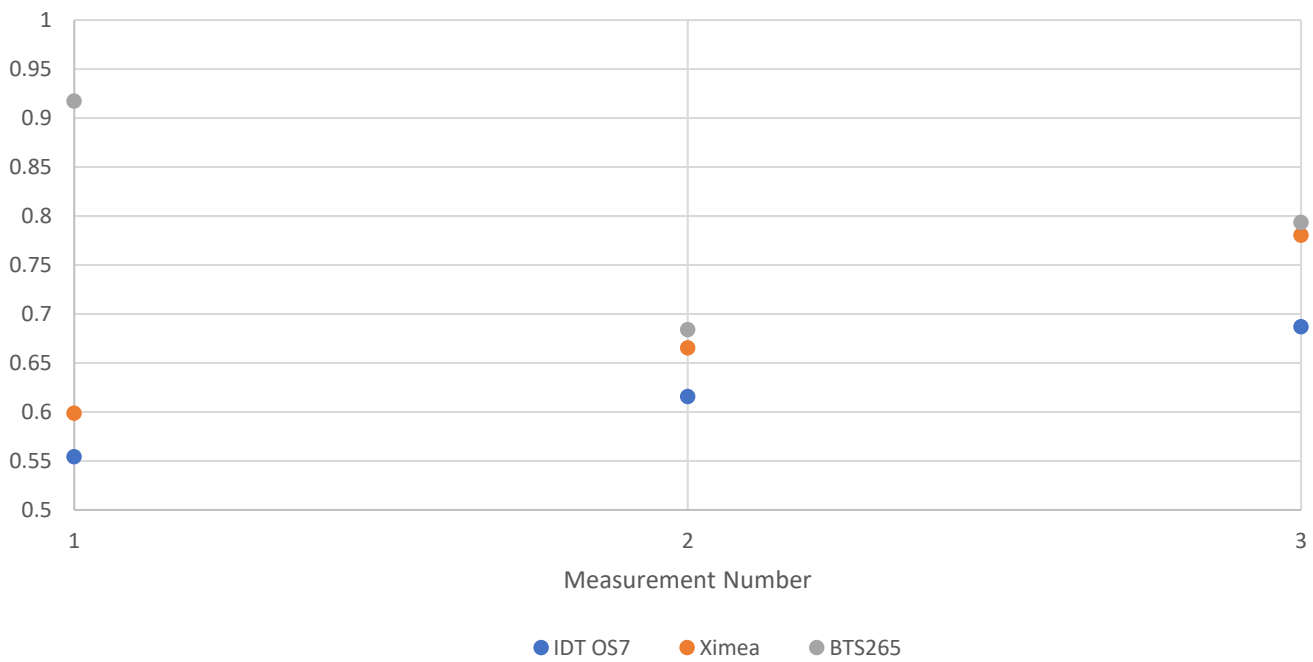
Frequency Scatter Plot



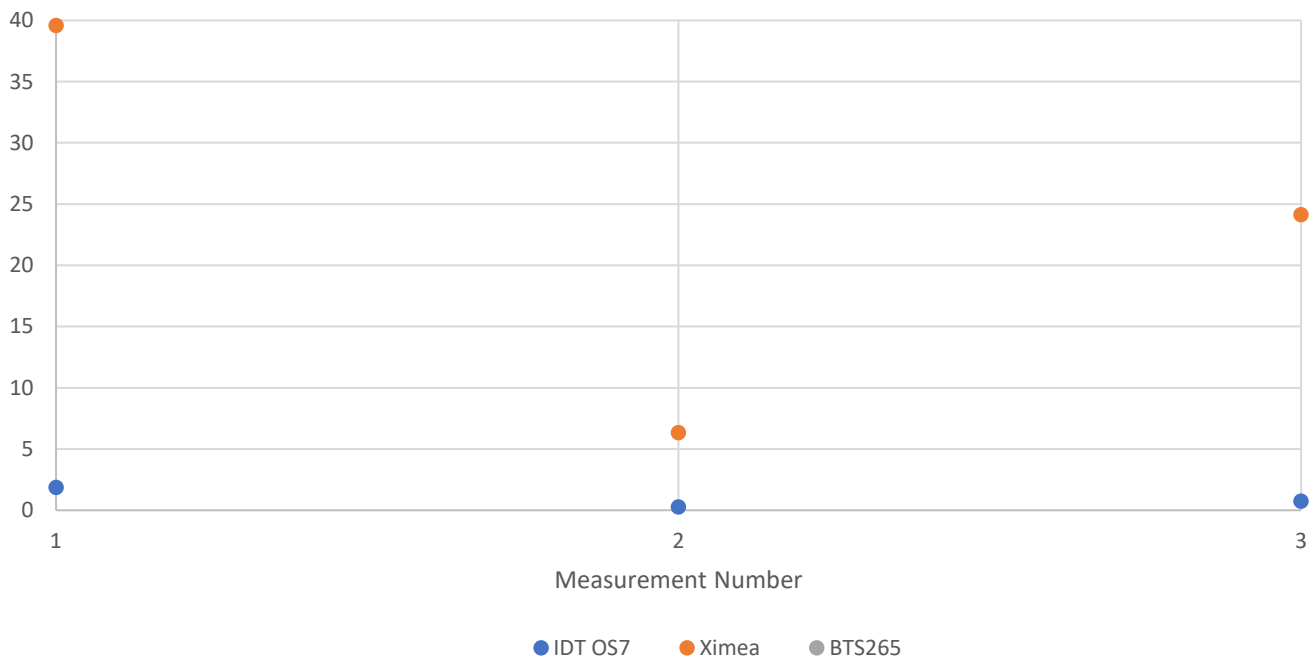
Flicker Percent Scatter Plot

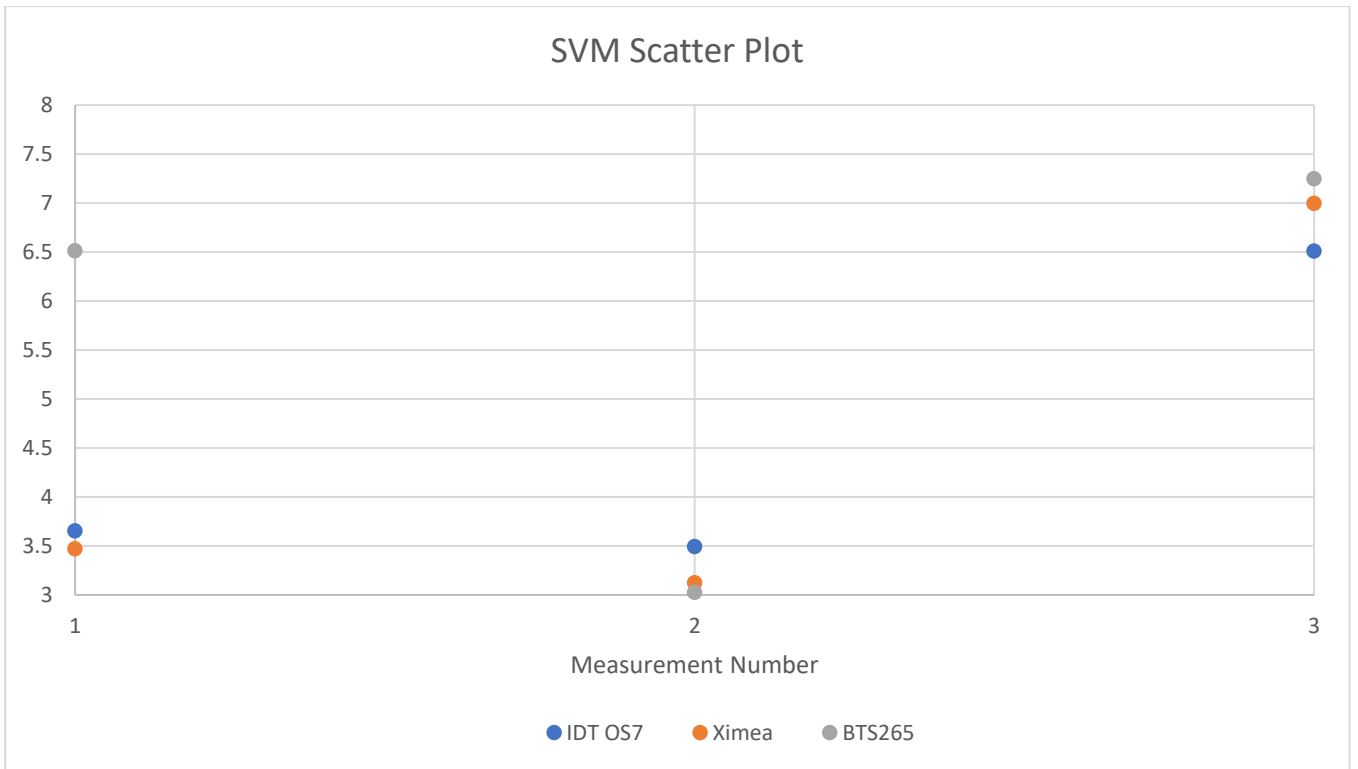


Flicker Index Scatter Plot



PstLM Scatter Plot

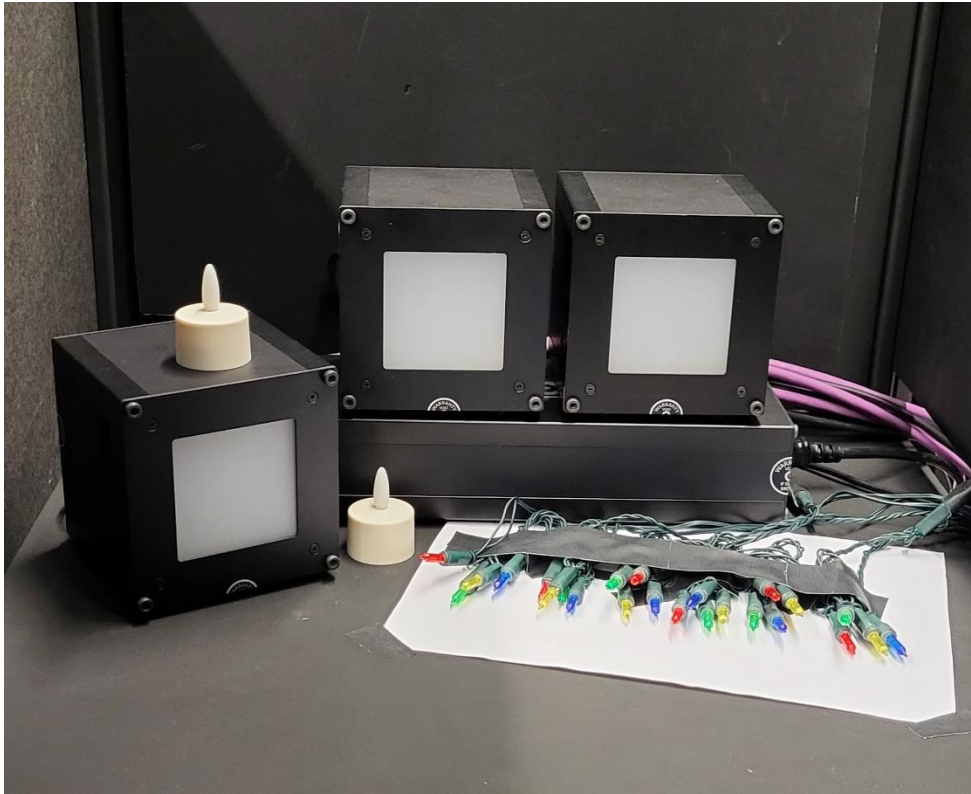




Παρατηρούμε πως η κάμερα Ximea, έχει πετύχει περισσότερα μεγέθη κάτω του 5% ποσοστιαίας διαφοράς. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός πως το «Range of Interest» της κάμερας ήταν αρκετά μικρό εξαρχής, που δεν περιλάμβανε μέρος της γύρο σκηνής. Σε αντίθεση με την κάμερα IDT OS7, όπου έλαβε πλήρη εικόνα όλης της σκηνής, και μετά αποκόπηκε μέρος των εικόνων για τον υπολογισμό των μεγεθών, σε συνδυασμό με το μικρό φυσικό μέγεθος των «LED Candles».

Μέρος τρίτο

Το συγκεκριμένο μέρος αποτελεί την πιο πολύπλοκη σκηνή εντός του εργαστηρίου, που περιλαμβάνει Vega Cubes, Fairy lights και LED Candles. Οι μετρήσεις του BTS256 που θα παρουσιασθούν, είναι μέρος του πρώτου συνόλου μετρήσεων στο PTB. Παρακάτω, είναι η σκηνή η οποία λήφθηκε από την κάμερα IDT OS7, φωτισμένη για σκοπούς παρουσίασης.

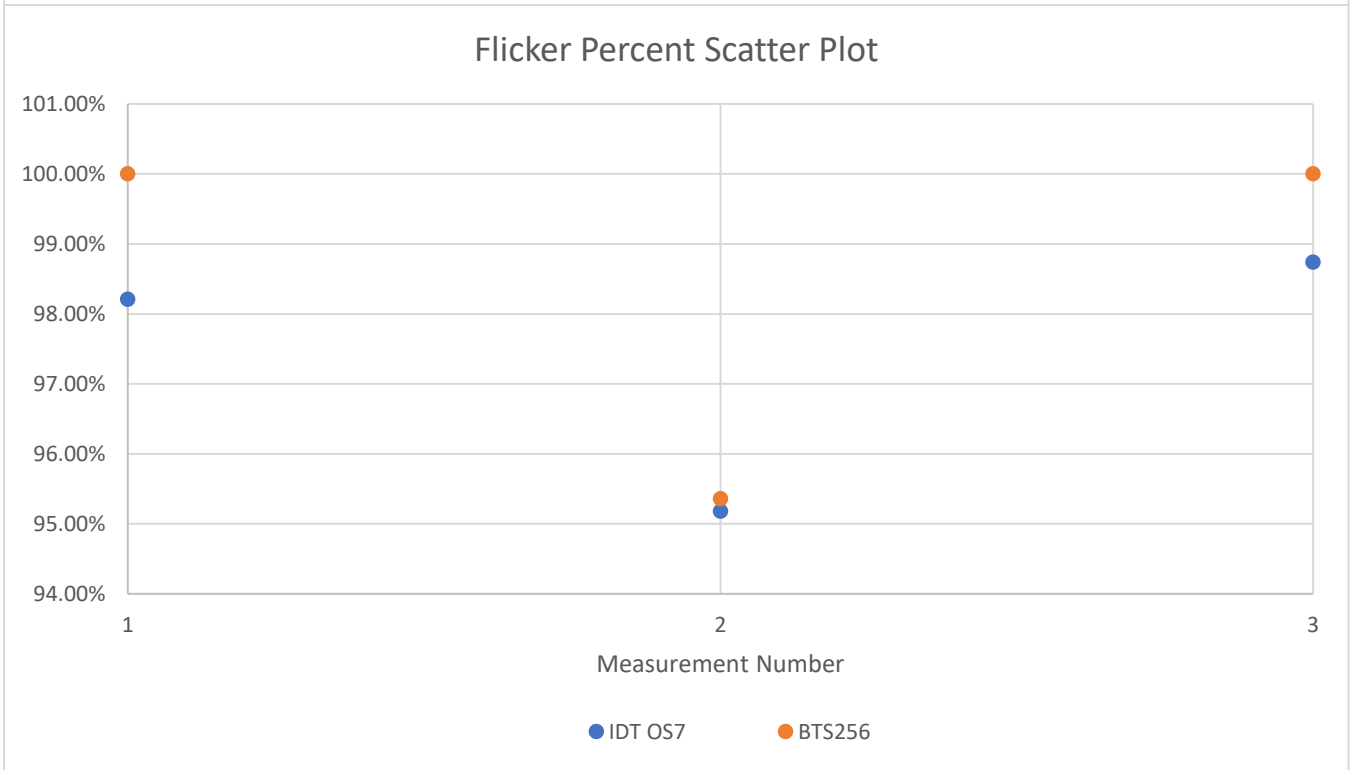
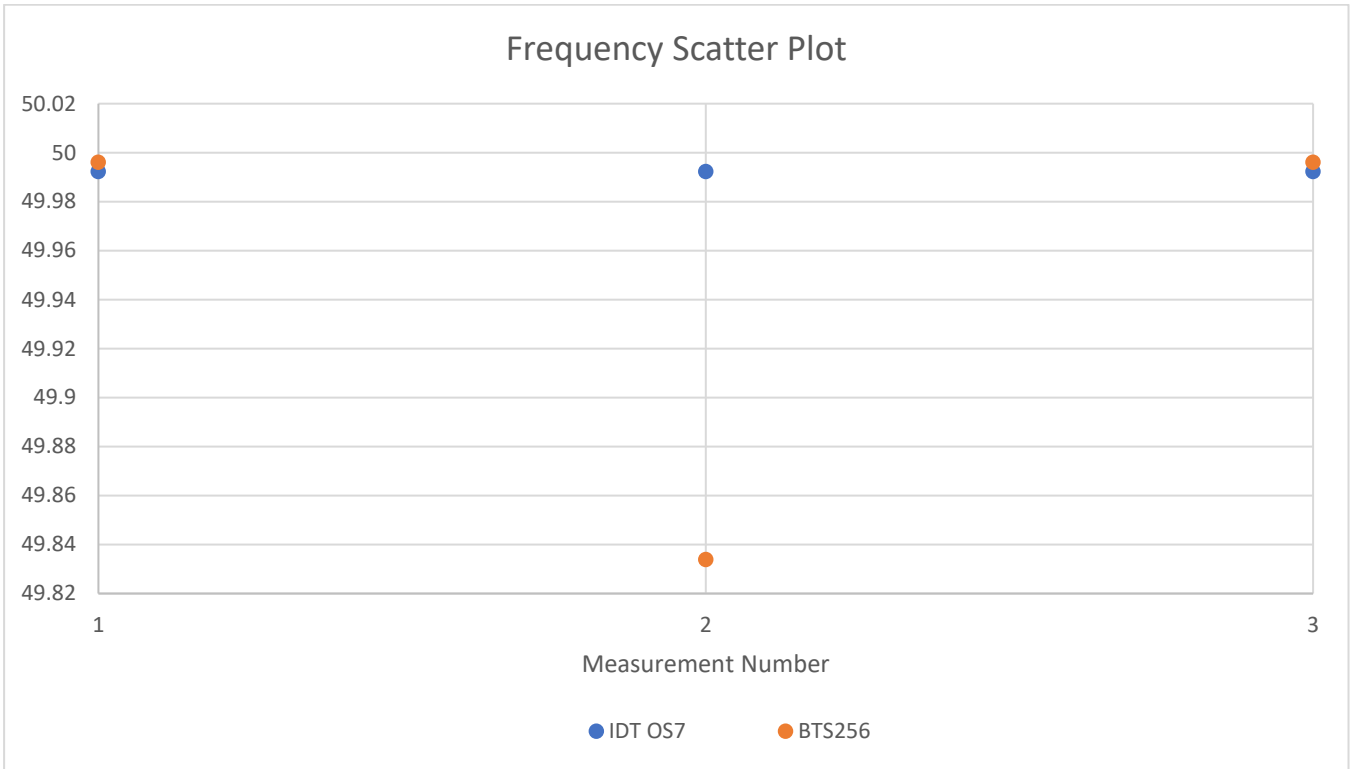


Εικόνα 22. Σύνθετη σκηνή εργαστηρίου

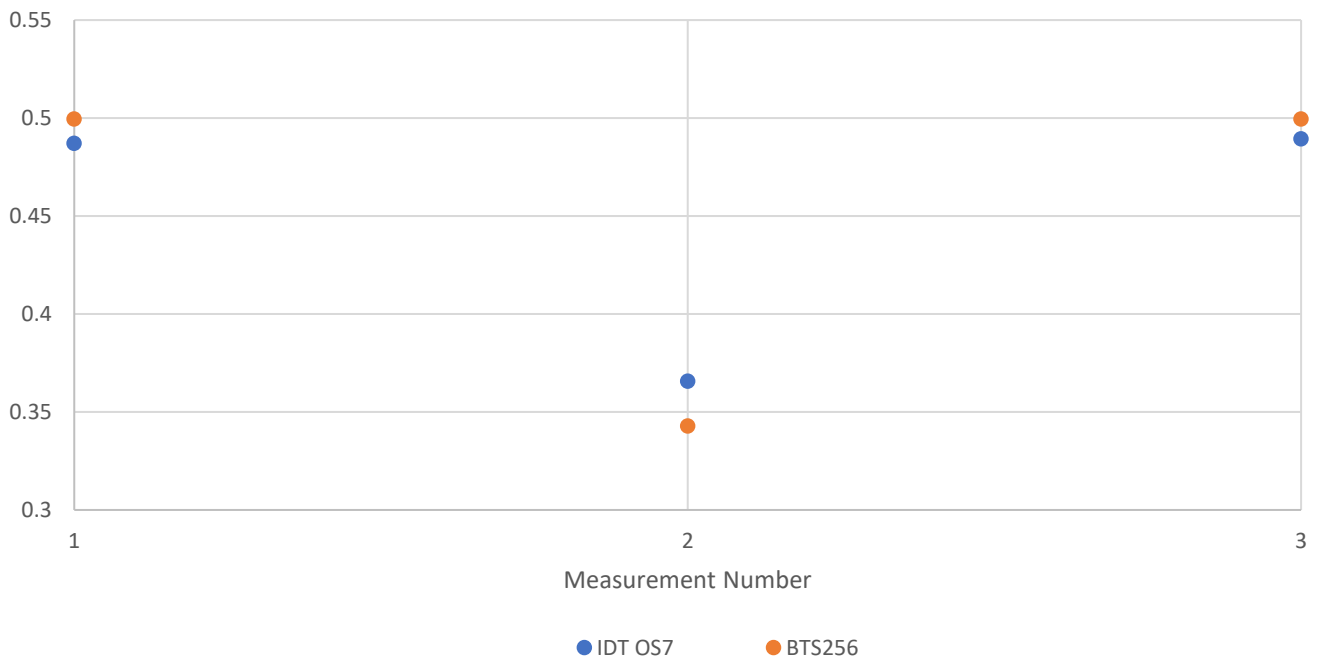
Vega Cube 1, Square, duty cycle 50%, 50Hz			
	IDT OS7	BTS256	OS7-BTS (%)
Frequency	49.9922	49.9961	0.0079
Flicker Percent	0.9821	1.0000	1.7938
Flicker Index	0.4871	0.4995	2.4755
PstLM	8.4678	10.5256	19.5503
SVM	3.6701	3.4653	5.9109

Vega Cube 2, Sine 50Hz			
	IDT OS7	BTS256	OS7-BTS (%)
Frequency	49.9922	49.8339	0.3175
Flicker Percent	0.9518	0.9536	0.1903
Flicker Index	0.3657	0.3429	6.6666
PstLM	7.6813	8.9525	14.1984
SVM	3.2926	2.6938	22.2302

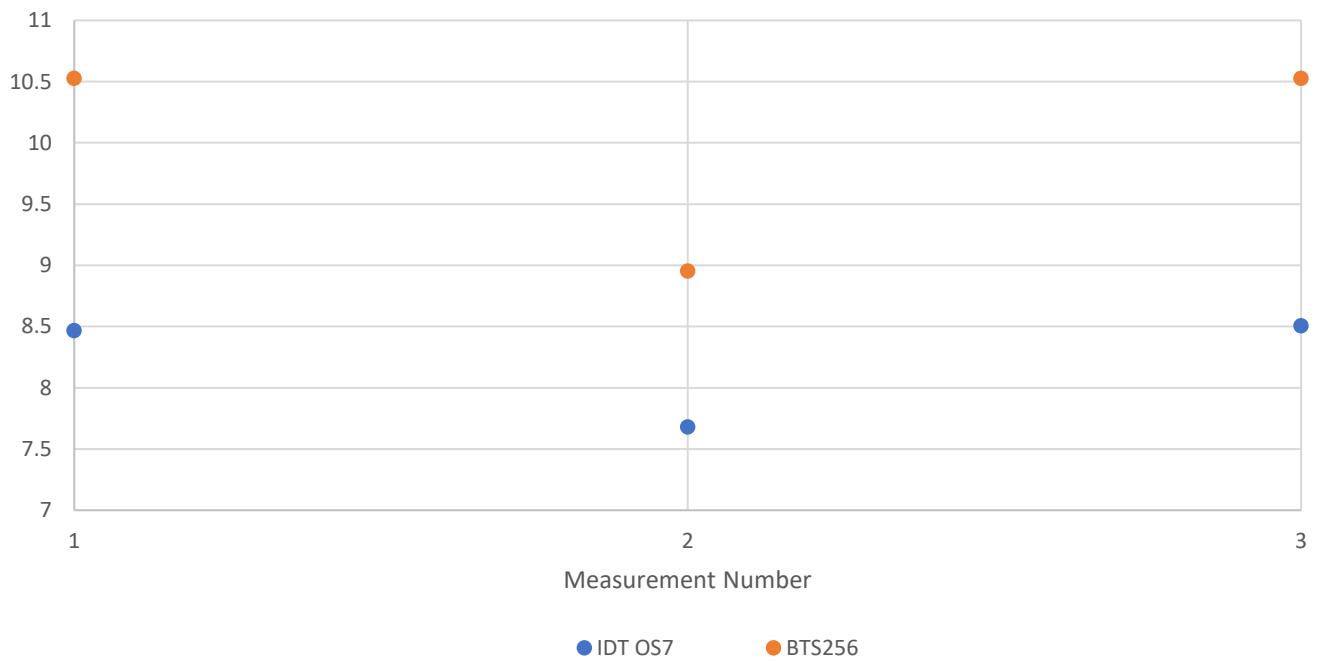
Vega Cube 3, Square, duty cycle 50%, 50Hz			
	IDT OS7	BTS256	OS7-BTS (%)
Frequency	49.9922	49.9961	0.0079
Flicker Percent	0.9874	1.0000	1.2571
Flicker Index	0.4893	0.4995	2.0476
PstLM	8.5050	10.5256	19.1975
SVM	3.6861	3.4653	6.3721

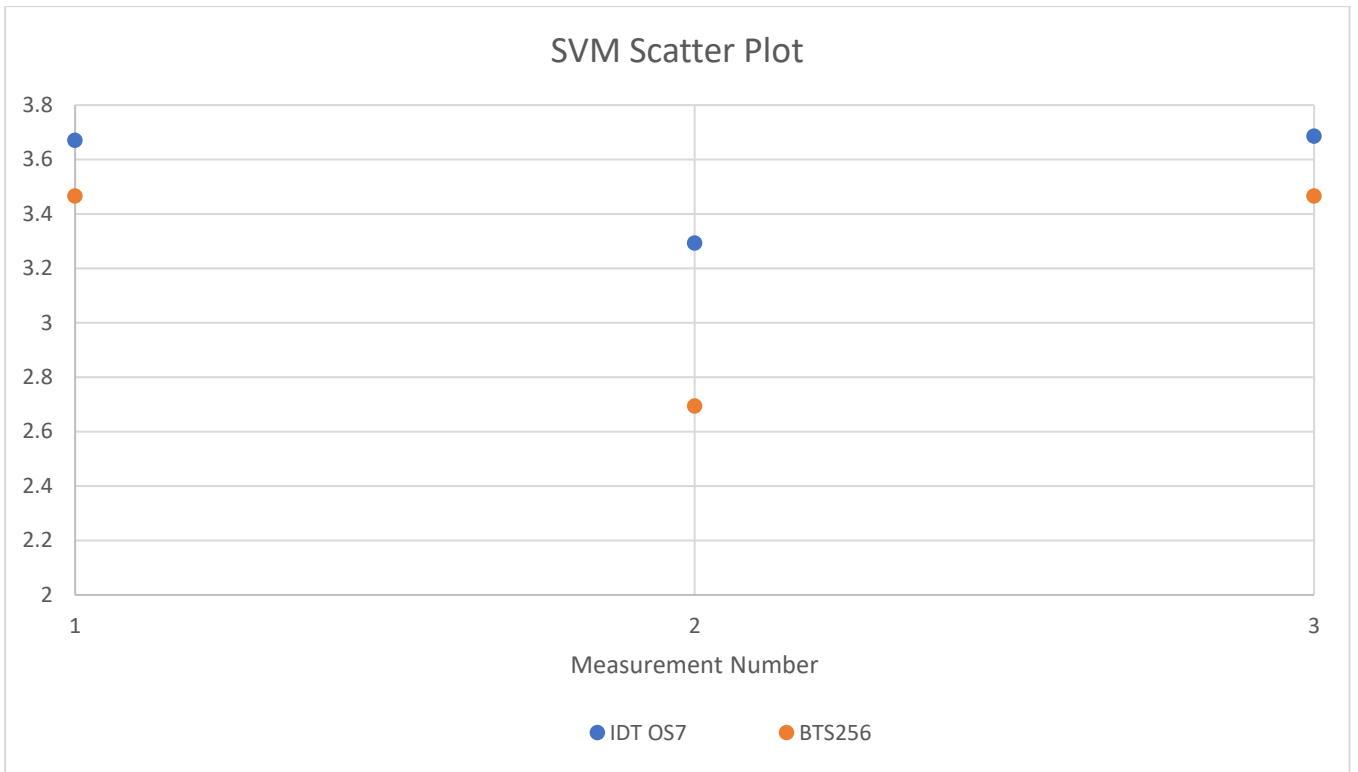


Flicker Index Scatter Plot



PstLM Scatter Plot

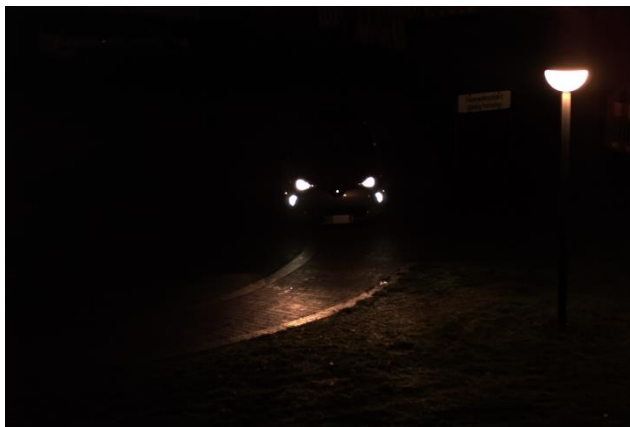




Είναι εμφανής ο επιτυχής υπολογισμός της συχνότητας και του «Flicker Percent» σε τιμές μικρότερες του 5% ποσοστιαίας διαφοράς από το όργανο BTS256.

Μέρος τέταρτο

Στο συγκεκριμένο μέρος, δημιουργήσαμε μια σκηνή που περιλαμβάνει ένα φωτιστικό από το προαύλιο του κτηρίου «Einstein Bau-PTB», και το αυτοκίνητο ενός ερευνητή. Πρόκειται για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο «Renault Zoe eTech». Παράλληλα, έχει μετρηθεί το φωτιστικό που βρίσκεται στην σκηνή, με την χρήση του BTS256, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο μεθόδων.



Εικόνα 23. Εξωτερική σκηνή αυτοκινήτου, όπως λήφθηκε από την IDT OS7



Εικόνα 24. Άποψη από την διαδικασία μέτρησης

Street Light

	IDT OS7 (V1)	IDT OS7 (V2)	IDT OS7 (V3)	BTS256
Frequency	100.2849	100.0000	100.3993	99.9900
Flicker Percent	66.48%	66.53%	66.26%	57.34%
Flicker Index	0.1911	0.1910	0.1905	0.1580
PstLM	0.1831	0.2135	0.2063	
SVM	2.3342	2.3370	2.3293	1.8939

	OS7 (V1) - BTS (%)	OS7 (V2)-BTS (%)	OS7 (V3)-BTS (%)
Frequency	0.2950	0.0101	0.4094
Flicker Percent	15.9443	16.0246	15.5565
Flicker Index	20.9792	20.8858	20.5739
PstLM			
SVM	23.2496	23.3986	22.9896

Και σε αυτή την μέτρηση, είναι εμφανής ο επιτυχής υπολογισμός μόνο της συχνότητας σε τιμές μικρότερες του 5% ποσοστιαίας διαφοράς από το όργανο BTS256.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσα από την διαδικασία των μετρήσεων και την συνεργασία με το PTB, έχουν εξαχθεί τα εξής συμπεράσματα:

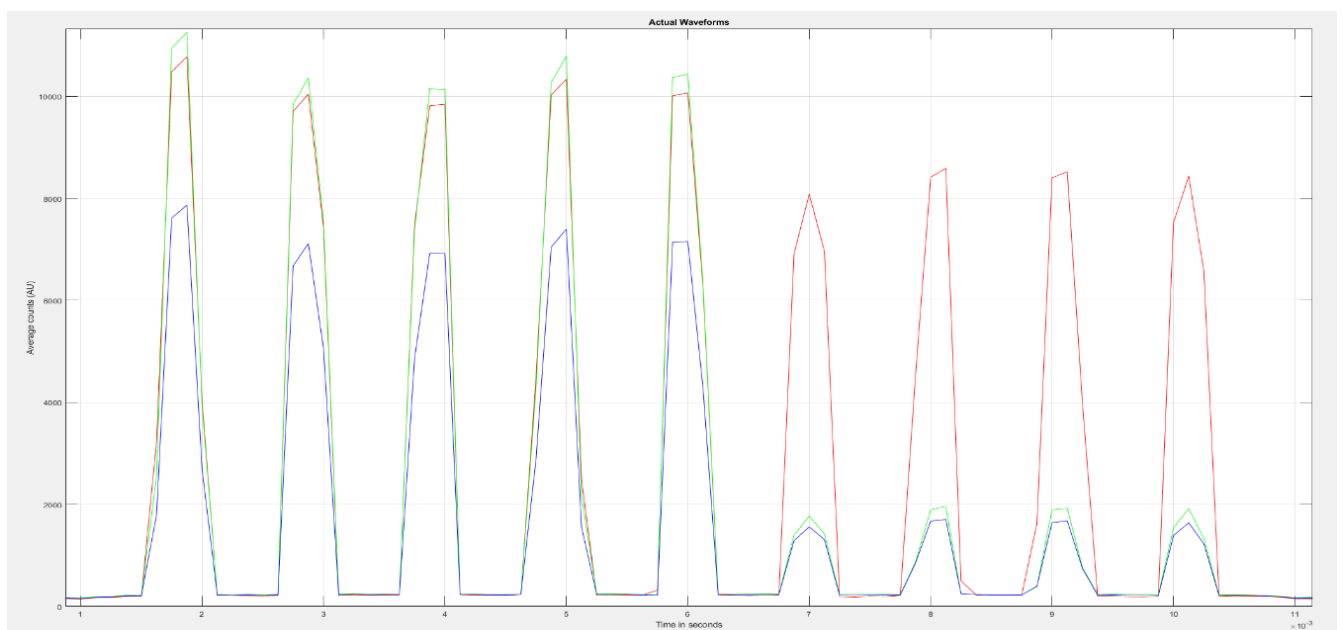
- Οι αισθητήρες CMOS, έχουν την δυνατότητα λήψης αρκετής πληροφορίας, για τον υπολογισμό της συχνότητας διαμόρφωσης ενός φωτιστικού. Η δυνατότητα αυτή προϋποθέτει τον υπολογισμό της συχνότητας στο ίδιο το φωτιστικό και όχι σε επιφάνεια όπου φωτίζεται από το εκάστοτε φωτιστικό.
- Υπάρχει μερική επιτυχία στον υπολογισμό του Flicker Percent και του Flicker Index. Η μερική αυτή επιτυχία, χρήζει περισσότερης διερεύνησης για την πλήρη επιτυχία των μεγεθών ή την εξακρίβωση των συγκεκριμένων παραμέτρων που εμποδίζουν τον επιτυχή υπολογισμό τους.
- Τα μεγέθη SVM και PstLM, δεν μπορούν να υπολογισθούν από τους αισθητήρες CMOS. Σε συνδυασμό με την υφιστάμενη συζήτηση για τροποποίηση υπολογισμού των δύο μεγεθών από τα πρότυπα, καθιστά τον υπολογισμό τους αδύνατο.

5.1.1 Διερεύνηση σκηνής

Κάμερες με την δυνατότητα καταγραφής πλήρης σκηνής με ρυθμό λήψης εικόνων ανά δευτερόλεπτο, μεγαλύτερο του 4000FPS, όπως η IDT OS7, παραμένουν χρήσιμο εργαλείο για την διερεύνηση της συμπεριφοράς των φωτιστικών. Η δυνατότητα υπολογισμού της συχνότητας διαμόρφωσης, αποτελεί σημαντική πληροφορία για την απόφαση εάν ένα φωτιστικό χρήζει περεταίρω διερεύνησης με την χρήση εξειδικευμένων οργάνων, όπως το BTS256.

5.1.2 Διερεύνηση φωτιστικού

Οι αισθητήρες CMOS, παρέχουν την δυνατότητα καταγραφής των τριών βασικών καναλιών χρώματος RGB, Red, Green, Blue. Κατά την διάρκεια μετρήσεων στο PTB, παρατηρήθηκε η δυνατότητα των καμερών, να καταγράψουν την συμπεριφορά του κάθε καναλιού, εντός μιας περιόδου. Μπορούμε δηλαδή, με λεπτομέρεια, να δούμε τους χρόνους έναυσης και τερματισμού που κάθε χρώματος, εντός μιας περιόδου.



Εικόνα 25. Χρόνοι έναυσης φωτιστικού "LED Candle"

Στην παρακάτω **Εικόνα 23**, βλέπουμε την μία περίοδο, ενός φωτιστικού τύπου “LED Candle”, το οποίο διαθέτει έλεγχο PWM. Είναι εμφανής η διαφορετική έναυση του κάθε χρώματος, που αποσκοπεί στην αντίληψη του ανθρώπινου παρατηρητή, ως το χρώμα κίτρινο. Η συγκεκριμένη πληροφορία είναι πολύτιμη. Έχει την δυνατότητα να μας βοηθήσει στην επίλυση προβλημάτων του χειρισμού PWM.

5.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

Οι προοπτικές περαιτέρω έρευνας και εφαρμογών που προέκυψαν κατά τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- Ως επέκταση της εργασίας που έχει γίνει, συνιστάται η συγκρότηση ομάδας εμπειρογνομόνων για τη διερεύνηση αλγορίθμων για τον υπολογισμό του Flicker Percent, του Flicker Index, του SVM και του PstLM. Αυτή θα αποτελέσει ιδανικά από μηχανικούς μικροηλεκτρονικής, μηχανικούς DSP ή άλλες ειδικότητες ηλεκτρολόγων μηχανικών, οι οποίοι μπορούν να προσφέρουν την αντίστοιχη τεχνογνωσία τους. Αυτή η ομάδα θα μπορούσε να συνεργαστεί για την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων ή την τελειοποίηση των υφιστάμενων, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις αυτών των μετρήσεων.
- Επιπλέον, για την άρση των περιορισμών στη λήψη υψηλής ταχύτητας από κάμερες χαμηλού επιπέδου, όπως η κάμερα του Εργαστηρίου Φωτοτεχνίας του ΕΜΠ, η τεχνική του «interleaved sampling» θα μπορούσε να αποτελεί χρήσιμο εργαλείο. Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, μπορούμε να λάβουμε μετρήσεις υψηλότερης ποιότητας από αισθητήρες που μπορεί να έχουν περιορισμένες δυνατότητες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερη ανάλυση και χαρακτηρισμό των πηγών φωτός.

Το «interleaved sampling» είναι μια τεχνική για την αύξηση του ρυθμού δειγματοληψίας σε πραγματικό χρόνο ενός ψηφιοποιητή. Χρησιμοποιεί πολλαπλούς αναλογικο-σε-ψηφιακό μετατροπείς (ADC) για τη δειγματοληψία της ίδιας κυματομορφής εισόδου, αλλά σε διαφορετικές σχετικές φάσεις. Στη συνέχεια, διαπλέκονται αυτά τα δείγματα για να δημιουργηθεί η κυματομορφή σαν να δειγματοληπτούσε μόνο ένας ADC την κυματομορφή με υψηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας. Στην περίπτωση μας, με την χρήση δύο καμερών Ximea, συνδεδεμένες με εξωτερικό Trigger, σε διαφορά φάσης 180 μοιρών, και ρυθμό δειγματοληψίας 3000FPS έκαστος, θα μπορούμε να δειγματοληπτήσουμε το φωτιστικό με τελικό ρυθμό δειγματοληψίας 6000FPS. Η χρήση μικρότερου ρυθμού δειγματοληψίας από την κάθε κάμερα, θα επεκτείνει τον χρόνο στον οποίο η κάμερα μπορεί αξιόπιστα να λάβει εικόνες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] IEEE, «IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers,» 2015.
- [2] D. Kelly, “Visual Responses to Time-Dependent Stimuli.* I. Amplitude Sensitivity Measurements†”, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 51, no. 4, 1961.
- [3] S. M. Halpin, R. Bergeron, T. M. Blooming, R. F. Burch, L. E. Conrad, and T. S. Key, “Voltage and lamp flicker issues: Should the IEEE adopt the IEC approach?”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 1088–1097, 2003.
- [4] CIE, TN 006:2016, *Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models*.
- [5] J. Roberts and A. Wilkins, “Flicker can be perceived during saccades at frequencies in excess of 1 kHz”, *Lighting Research & Technology*, 2013.
- [6] European Commission, Directorate-General for Energy, “*Commission Regulation (EU) 2019/2020 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for light sources and separate control gears pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulations*”.
- [7] M. Perz, I. Vogels, D. Sekulovski, L. Wang, Y. Tu, and I. Heynderickx, “*Modeling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems*”, *Lighting Research & Technology*, 2015.
- [8] «CIE, “CIE TN 012:2021. Guidance on the Measurement of Temporal Light Modulation of Light Sources and Lighting Systems”, Technical Note 012, Commission Internationale de l’Éclairage, Vienna, AT, 2021».
- [9] IEC, “*IEC TR 63158:2018. Equipment for general lighting purposes – objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment*”, Standard, International Electrotechnical Commission, Geneva, CH, 2018.
- [10] IEC, “*IEC TR 61547-1:2020. Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements – Part 1: Objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method*”, Standard, International Electrotechnical Commission, Geneva, CH, 2020.
- [11] IEC 61000-4-15:2010, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications*, 2010.
- [12] J. Drápela and J. Šležingr, “*A Light-flickermeter–Part I: Design*”, in *Proceedings*.
- [13] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall, third edition ed., 2010.
- [14] W. Mombauer, “Calculating a new reference point for the IEC-flickermeter”, *European Transactions on Electrical Power*, vol. 8, 1998..
- [15] J. Millman, *Microelectronics: Digital and Analog Circuits and Systems*. McGraw-Hill, 5th printing, International student ed., 1983..
- [16] R. Nordlund, «Validation for measurement of Temporal Light Artefacts on LED light sources,» Aalto University, 2022.
- [17] «Konika Banerjee (2023). Light flicker assessment toolbox (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/63445-light-flicker-assessment-toolbox>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 17, 2023.».

- [18] «C. Mirra and P. G. Kendall, “An international study of flicker”, in 10th International Conference on Electricity Distribution, 1989. CIRED 1989, pp. 97–101, Institution of Engineering and Technology, 1989.».
- [19] «“Publishable Summary for 20NRM01 MetTLM Metrology for temporal light modulation.” https://www.mettlm.eu/downloads/20NRM01_MetTLM_First_Publishable_Summary_v01_Accepted.pdf, 2021. Accessed: January 2022.».
- [20] «F. J. Harris, “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform”, Proceedings of the IEEE, 1978».
- [21] A. Sendra και K. Smith, Μικροηλεκτρονικα κυκλώματα, Τόμος Β, Έβδομη έκδοση, Αθήνα: Παπασωτηρίου Εκδόσεις, 2017.
- [22] H. J. Landau, "Sampling, data transmission, and the Nyquist rate," in Proceedings of the IEEE, vol. 55, no. 10, pp. 1701-1706, Oct. 1967, doi: 10.1109/PROC.1967.5962..
- [23] *Konika Banerjee (2023). Stroboscopic effect visibility measure toolbox* (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/59242-stroboscopic-effect-visibility-measure-toolbox>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 21, 2023..
- [24] XIMEA, *MC050CG-SY Specifications*, <https://www.ximea.com/en/products/usb-31-gen-1-with-sony-cmos-xic/mc050cg-sy>, 2022.
- [25] XIMEA, *Camera model frame rate calculator*, <https://www.ximea.com/support/wiki/allprod/Industrial-scientific-camera-sensor-fps-frames-speed-calculator#/camera/MC050CG-SY>, 2022.
- [26] Tektronix, *DPO4000 Series Digital Phosphor Oscilloscopes Datasheet*, <https://www.tek.com/en/datasheet/dpo4000-series-digital-phosphor-oscilloscopes-datasheet>, 2022.
- [27] AimTTi, *TGA1240 Series*, <https://www.aimtti.com/product-category/legacy-products/aim-tga1240series>.
- [28] MathWorks, *Image Acquisition Toolbox*, <https://www.mathworks.com/products/image-acquisition.html>.
- [29] I. Vision, *IDT OS Model 7 Specification Sheet*, https://idtvision.com/support/specifications-sheets/?idt_id=OS7-V3-S3.
- [30] Gigahertz-Optik, *BTS256-EF High Accuracy Flicker Meter and General Lighting Spectral Luxmeter*, <https://www.gigahertz-optik.com/en-us/product/bts256-ef/>.
- [31] «Viso Systems LabFlicker,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.visosystems.com/products/labflicker/>.
- [32] I. Engineering, *Vega Illumination Device*, <https://www.image-engineering.de/products/equipment/illumination-devices/1096-vega>.