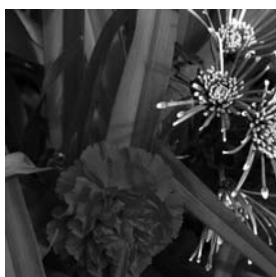
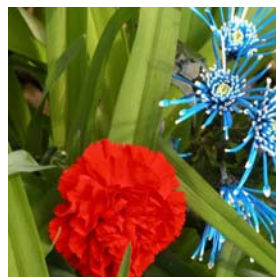




Μεταπτυχιακή Εργασία:

“Ανάλυση Χωρικού και Χρωματικού Φασματικού Περιεχομένου
Φυσιικών Εικόνων”

Σαπουντζής Παναγιώτης



Ηράκλειο 2005

Αφιερώνεται στην
οικογένεια μου

Το κείμενο αυτό αποτελεί την μεταπτυχιακή εργασία του φοιτητή Σαπουντζή Παναγιώτη, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια του διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών “Οπτική και Όραση”, του Πανεπιστημίου Κρήτης. Η εργασία ολοκληρώθηκε υπό την επίβλεψη του Δρ Σ. Πλαΐνη.

Παρουσιάστηκε στο Ηράκλειο στις 3 Οκτωβρίου 2005, ενώπιον τριμελούς επιτροπής η οποία αποτελείτο από τους,

Σ. Πλαΐνη
Δ. Παπάζογλου
Ι. Παλλήκαρη

Ευχαριστώ,

τον επιβλέποντα της εργασίας μου Δρ. Σ. Πλαϊνή. Η μορφή και το περιεχόμενο της εργασίας μου οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην βοήθεια και την υπομονή που επέδειξε. Τον ευχαριστώ που με επέλεξε για να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για τις ευκαιρίες που μου έδωσε να αναπτύξω και να επιδείξω τις ικανότητές μου. Η προσωπική σχέση που επέτρεψε να αναπτυχθεί, έκανε τον χρόνο της συνεργασίας μας ευχάριστο και ιδιαίτερα δημιουργικό,

τον Πρύτανη του Πανεπιστημίου Κρήτης Καθηγητή Ι. Παλλήκαρη για τα σχόλια και την θετική αποδοχή της εργασίας μου,

τον Δρ. Δ. Παπάζογλου για τις διορθώσεις και τις επικοινωνητικές παρατηρήσεις στο κείμενο της εργασίας,

τους Καθηγητές Μ. Ταρουδάκη και Μ. Τσιλιμπάρη για τις χρήσιμες προτάσεις και επισημάνσεις τους,

τους διδάσκοντες του ΠΜΣ Οπτική & Όραση και ιδιαίτερα τους Δρ. Χ. Γκίνη και Α. Παλλήκαρη για τη βοήθεια τους σε δυσκολίες που αντιμετώπισα κατά την ολοκλήρωση της εργασίας μου,

τους συμφοιτητές μου Τρισεύγενη Γιαννακοπούλου και Νίκο Καρυωτάκη για την υπομονετική συμμετοχή τους στις ψυχοφυσικές μετρήσεις που αποτελέσαν μέρος της εργασίας μου.

Περίληψη

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των φυσικών εικόνων εικάζεται πως έχουν παίξει μορφοποιητικό ρόλο στη εξέλιξη του οπτικού συστήματος. Είναι επομένως ιδιαίτερα διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια η ανάλυση των χωρικό-χρωματικών στατιστικών τους καθώς και η διενέργεια ψυχοφυσικών μετρήσεων με χρήση φυσικών εικόνων για την μελέτη της οπτικής επεξεργασίας τους.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο σκέλη. Σκοπός του πρώτου μέρους αποτελεί η συλλογή της απαραίτητης τεχνογνωσίας και η ανάπτυξη εξειδικευμένης μεθοδολογίας για την στατιστική ανάλυση φυσικών εικόνων. Στο δεύτερο σκέλος πραγματοποιούνται μετρήσεις με σκοπό τον προσδιορισμό μιας μετρικής (παραμέτρου) που να περιγράφει με ακρίβεια της επεξεργασία σύνθετων οπτικών ερεθισμάτων από το οπτικό σύστημα.

Η μεθοδολογία/διαδικασία που αναπτύχθηκε αφορά την βαθμονόμηση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής για την λήψη εικόνων με την χρήση μιας σειράς χρωματικών φίλτρων στενής διέλευσης και σπεκτροραδιόμετρου. Επίσης, πραγματοποιείται συγγραφή μιας σειράς υπολογιστικών αλγορίθμων για την ψηφιακή επεξεργασία και την ανάλυση των στατιστικών των βαθμονομημένων φυσικών εικόνων.

Όσο αφορά την μελέτη της επεξεργασίας σύνθετων οπτικών ερεθισμάτων (σύνθετα gratings – που διαφέρουν σε συχνότητα και προσανατολισμό) αυτή επιτυγχάνεται με δύο ψυχοφυσικές δοκιμασίες: (α) την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) για τη μελέτη της οπτικής επεξεργασίας για τιμές contrast κοντά στην ουδό/threshold και (β) τους οπτικούς χρόνους αντίδρασης (visual reaction times) για την αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς σε τιμές contrast υψηλότερες της ουδούς/threshold (suprathreshold).

Τα αποτελέσματα της χωρικό-χρωματικής ανάλυσης των εικόνων έρχονται σε συμφωνία με ευρήματα προηγούμενων μελετών και οι υπολογιστικοί αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν παρατίθενται στο παράρτημα. Τα αποτελέσματα των ψυχοφυσικών μετρήσεων έδειξαν πως η ελάττωση του τοπικού contrast των σύνθετων ερεθισμάτων μπορεί να εξηγήσει ικανοποιητικά τη μείωση της ευαισθησίας του οπτικού συστήματος, κάτι που δεν μπορεί να περιγραφεί με την χρήση της πιο διαδεδομένης μετρικής, του Michelson contrast. Σε συνθήκες όμως suprathreshold το μοντέλο του τοπικού contrast περιγράφει μερικώς την επεξεργασία των σύνθετων ερεθισμάτων. Κάθε μοντέλο όμως που στόχο έχει την εξήγηση της οπτικής επεξεργασίας τέτοιων ερεθισμάτων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες των νευρωνικών καναλιών υπεύθυνων για την ανίχνευση του ερεθίσματος, καθώς και το χρονικό προφίλ αυτών των ερεθισμάτων. Επίσης, παρατηρήθηκε για απλά και σύνθετα ερεθίσματα μεγαλύτερη ευαισθησία σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς (~ 90 μοίρες), τόσο για τιμές contrast κοντά στην ουδό, όσο και τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδούς, γεγονός που επίσης έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα προηγούμενων μετρήσεων.

Συμπερασματικά, η επεξεργασία της φωτεινής αντίθεσης των σύνθετων ερεθισμάτων στην οπτική οδό περιγράφεται ακριβέστερα από τοπικές (local) μεταβολές του contrast και όχι ολικές (global), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την περιγραφή απλών ερεθισμάτων. Η μεγαλύτερη ευαισθησία που παρατηρήθηκε στις μετρήσεις μας για τους οριζόντιους και κάθετους προσανατολισμούς, πιθανόν να σχετίζεται με την παρατήρηση ότι οι αστικές εικόνες, όπως προέκυψε από τη φασματική τους ανάλυση, περιέχουν χωρικές συχνότητες των οποίων η ενέργεια είναι κάθετα και οριζόντια προσανατολισμένη.

Περιεχόμενα

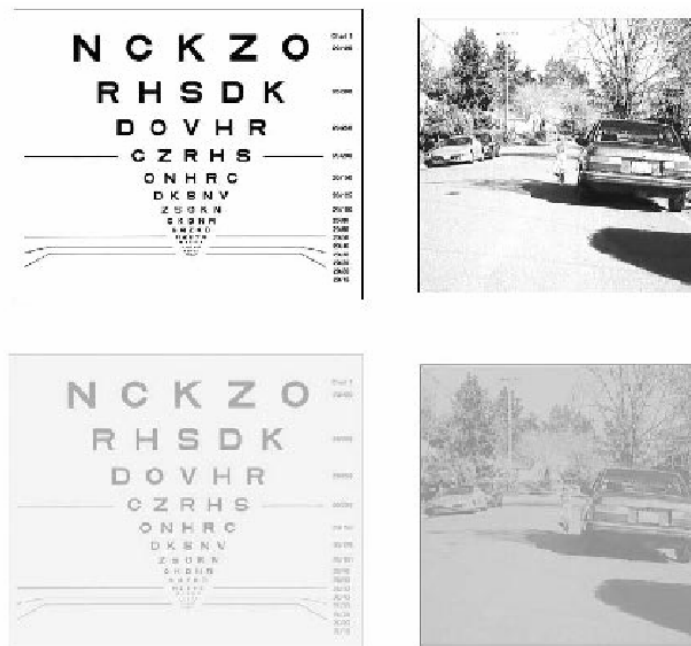
Περίληψη	5
Περιεχόμενα.....	7
1. ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΛΑ GRATINGS ΣΤΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Μελέτη των λειτουργικών χαρακτηριστικών της χωρικής όρασης με χρήση απλών gratings.....	10
1.2.1 Απλά (simple) gratings	10
1.2.2 Ψυχοφυσικές μέθοδοι	12
1.2.3 Μέτρηση ευαισθησίας στην φωτεινή αντίθεση.....	13
1.2.4 Contrast Sensitivity Function (CSF)	13
1.2.5 Κάποιες απλές μαθηματικές έννοιες	15
1.2.6 Χρήση της ανάλυσης Fourier σε μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity).....	18
1.2.7 Πραγματοποιεί το οπτικό σύστημα ανάλυση Fourier της οπτικής εικόνας;	19
1.2.8 Απλοί χρόνοι αντίδρασης (Simple Reaction Times – RTs)	22
1.3 Σύνθετα (compound) gratings.....	25
1.3.1 Τοπικό (Local) Contrast.....	26
1.3.2 Ερεθίσματα δεύτερης-τάξης (second-order stimuli)	28
1.4 Φυσικές σκηνές (Natural Scenes)	31
1.4.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά φυσικών οπτικών σκηνών	32
1.4.2 Έγχρωμη όραση	34
1.4.3 Χρωματικό περιεχόμενο φυσικών εικόνων.....	38
1.5. Σκοπός της εργασίας.....	39
2. ΧΩΡΙΚΟ-ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ	41
2.1 Εισαγωγή	41
2.2 Μεθοδολογία.....	41
2.2.1 Ψηφιακή αναπαράσταση εικόνων.....	41
2.2.2 Βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.....	41
2.2.3 Μετατροπή των εικόνων από τις RGB χρωματικές συντεταγμένες σε LMS.....	48
2.2.3 Μετασχηματισμός Fourier	49
2.2.4 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων	52
2.3 Αποτελέσματα – Χωρική ανάλυση εικόνων.....	53
2.3.1 Δυσδιάστατος μετασχηματισμός Fourier	53
2.3.2 Χαμηλές, μεσαίες και υψηλές χωρικές συχνότητες - Φίλτρα	58
2.3.3 Φασματικό πλάτος (Fourier amplitude).....	61
2.3.4 Η σημασία της φάσης	63
2.4 Χρωματική ανάλυση φυσικών εικόνων	67
2.5 Συζήτηση	69
3. ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ GRATINGS	72
3.1 Εισαγωγή	72
3.2 Μεθοδολογία.....	72
3.2.1 Εξοπλισμός	72
3.2.2 Εξεταζόμενοι.....	73
3.2.3 Ερεθίσματα (απλά και σύνθετα gratings).....	73
3.2.4 Πειραματική διαδικασία	76

3.3 Αποτελέσματα.....	77
3.3.1 Μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity)	77
3.3.2 Οπτικοί Χρόνοι Αντίδρασης (Visual Reaction Times – RTs).....	79
3.4 Συζήτηση	81
3.4.1 Ευαισθησία προσανατολισμού.....	81
3.4.2 Ευαισθησία σε σύνθετα gratings.....	83
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	87
4.1 Εισαγωγή	87
4.2 Χωρικό-χρωματικό περιεχόμενο φυσικών εικόνων	88
4.3 Επεξεργασία σύνθετων gratings. Η σημασία του contrast.....	92
4.4 Μελλοντική εργασία	93
Παράρτημα I	95
Υπολογισμός του αναπτύγματος Fourier τετραγωνικού κύματος, περιόδου X.....	95
Παράρτημα II	97
Φασματικές ευαισθησίες των κωνίων κατά Smith και Pokorny (1975)	97
Παράρτημα III	98
Ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής Nikon Coolpix 5700, κατά τη βαθμονόμηση και τη λήψη εικόνων.....	98
Παράρτημα IV	99
Κώδικες MATLAB.....	99
1. Δημιουργία ενός απλού Gabor grating.....	99
2. Δημιουργία ενός compound grating (mathematical addition).....	99
3α. Συνάρτηση που γραμμικοποιεί μια εικόνα με τις παραμέτρους της κάμερας μας (Aphrodite), του Alex Pappas.....	100
3β. Ρουτίνα που διαβάζει την παραπάνω συνάρτηση	100
4α. Συνάρτηση που γραμμικοποιεί τις εικόνες της βάσης δεδομένων McGill, της Adriana Olmos	101
4β. Συνάρτηση που γραμμικοποιεί και στη συνέχεια μετατρέπει στις LMS χρωματικές συντεταγμένες τις εικόνες της βάσης δεδομένων McGill, της Adriana Olmos	102
5. Συνάρτηση που δημιουργεί ένα εκ περιστροφής σιγμοειδές φίλτρο.....	105
6. Δυσδιάστατος μετασχηματισμός Fourier. Υπολογισμός των amplitude και power spectrum.....	105
7. Συνάρτηση για τον υπολογισμό της μέσης τιμής ορθογωνίου πίνακα, για όλους τους προσανατολισμούς.....	106
8. Υπολογισμός του μονοδιάστατου Fourier amplitude, με άθροιση για όλους τους προσανατολισμούς.....	107
9. Υπολογισμός του μονοδιάστατου Fourier amplitude, με άθροιση για όλους τους προσανατολισμούς, για τα τρία κανάλια χρωματικής εικόνας. Προαιρετικά είναι δυνατή η μετατροπή στις LMS χρωματικές συντεταγμένες.....	108
10. Δημιουργία υβριδικών εικόνων	109
11. Δημιουργία low pass φίλτρων.....	110
12. Δημιουργία φιλτραρισμένων εικόνων.....	111
Παράρτημα V	113
ECVP 2005, abstract.....	113
Βιβλιογραφία.....	115

1. ΑΠΟ ΤΑ ΑΠΛΑ GRATINGS ΣΤΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Για την αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς είναι απαραίτητη η διεξαγωγή ψυχοφυσικών δοκιμασιών. Πιο συγκεκριμένα, η διακριτική ικανότητα του οπτικού συστήματος αξιολογείται στην καθημερινή κλινική πράξη με μια απλή μέθοδο, την στατική οπτική οξύτητα. Η μέτρησή της πραγματοποιείται με την χρήση οπτότυπων, που αποτελούνται από "μαύρα" σύμβολα (γράμματα ή αριθμούς) σε λευκό background (υψηλού contrast) που ελαττώνονται σταδιακά σε μέγεθος. Η οπτική οξύτητα αποτελεί την πρότυπη μέτρηση διακριτικής ικανότητας κυρίως γιατί ο υπολογισμός της είναι απλός, γρήγορος και εύκολα κατανοητός από τους εξεταζόμενους. Η οπτική οξύτητα όμως περιέχει περιορισμένη (μία μόνον) αξιολόγηση της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού στις συνθήκες που πραγματοποιήθηκε η εξέταση και δεν αποτελεί αξιολόγηση της **λειτουργικής όρασης**, δηλαδή της ικανότητας ενός ατόμου να διακρίνει διάφορα αντικείμενα στον περιβάλλοντα χώρο, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στο σχήμα, το μέγεθος και το contrast.



Σχήμα 1.1: Η χρήση ενός οπτοτύπου με γράμματα δεν μπορεί να αντικατοπτρίσει τις πραγματικές οπτικές απαιτήσεις μιας πραγματικής εικόνας. Αυτό γίνεται περισσότερο αισθητό στις περιπτώσεις που ο εξεταζόμενος παρουσιάζει μειωμένη ευαισθησία αντίθεσης (λόγω πχ καταρράκτη).

Για παράδειγμα, οι απαιτήσεις για να διακρίνει κάποιος ένα πρόσωπο μέσα στο πλήθος είναι διαφορετικές από αυτές ή να διαβάσει μια εφημερίδα ή να οδηγήσει σε χαμηλές συνθήκες φωτισμού. Επομένως είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πιο "απαιτητικών" δοκιμασιών, που θα έχουν την δυνατότητα βαθμονόμησης της αξιολόγησης της διακριτικής ικανότητας (και κατ' επέκταση της «ποιοτικής» όρασης) σε πραγματικές συνθήκες με μεγάλη ακρίβεια και για ευρεία κλίμακα φωτεινότητας, χρωματικότητας, μεγεθών και contrast. Μελέτες

έχουν δείξει ότι η αξιολόγηση της όρασης με σύμβολα και αριθμούς δεν προσομοιώνει τις πραγματικές απαιτήσεις της λειτουργικής όρασης (βλ. σχήμα 1.1).

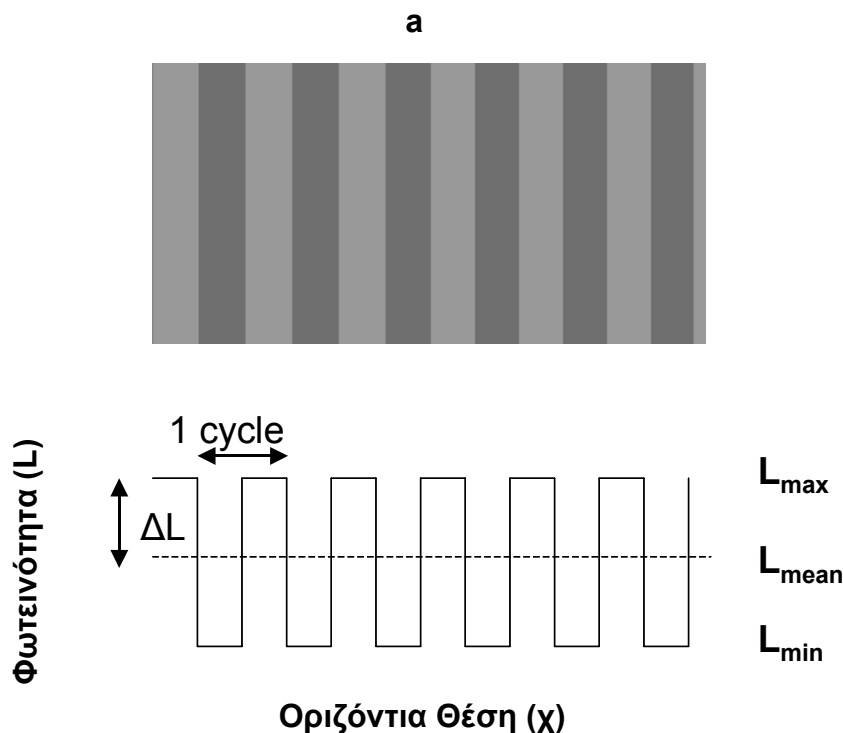
Για την αναγνώριση και την αντίληψη αντικειμένων χρησιμοποιούμε διαφορετικά χαρακτηριστικά της όρασης όπως τη χωρική όραση, τον τρόπο δηλαδή με τον οποίο το οπτικό σύστημα κωδικοποιεί στατικά αντικείμενα, τη χρονική όραση, το πώς δηλαδή αντιλαμβάνομαστε χρονικά μεταβαλλόμενα ερεθίσματα, την έγχρωμη όραση, τον τρόπο δηλαδή με τον οποίο γίνεται η κωδικοποίηση της χρωματικής πληροφορίας, και τέλος τη στερεοσκοπική όραση, το πώς δηλαδή συνδυάζονται οι ελαφρώς διαφορετικές εικόνες των δύο οφθαλμών με αποτέλεσμα την τρισδιάστατη αντίληψη του χώρου.

1.2 Μελέτη των λειτουργικών χαρακτηριστικών της χωρικής όρασης με χρήση απλών gratings

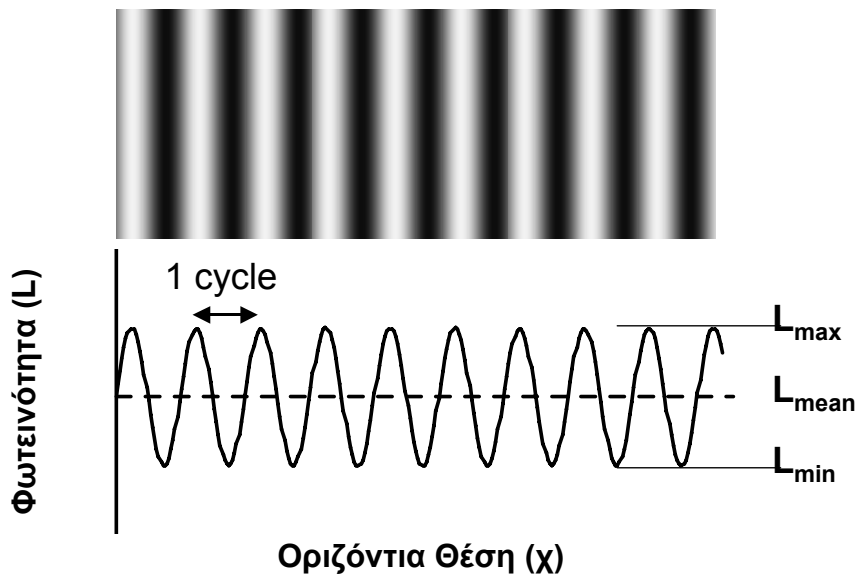
1.2.1 Απλά (simple) gratings

Για τη μελέτη των λειτουργικών χαρακτηριστικών της χωρικής όρασης (spatial vision) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στον τομέα της ψυχοφυσικής η χρήση των gratings. Αυτά είναι ερεθίσματα στα οποία η διαμόρφωση της φωτεινότητας παρουσιάζει κάποια περιοδικότητα και έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά.

Τα gratings αποτελούνται από εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ράβδους. Στο σχήμα 1.2 (a) απεικονίζεται ένα **square wave grating**, όπου η φωτεινότητα (luminance) των pixels παρουσιάζει τετράγωνη (χωρική) διαμόρφωση κατά μήκος της οριζόντιας διάστασης της οθόνης (x), ενώ στο



b



Σχήμα 1.2: Gratings (a) με τετραγωνική χωρική διαμόρφωση και (b) με ημιτονοειδή χωρική διαμόρφωση κατά μήκος της οριζόντιας θέσης (x) της οθόνης. Από κάτω παριστάνεται γραφικά η διαμόρφωση της φωτεινότητας για τις δύο περιπτώσεις. Η φωτεινότητα και των δύο gratings είναι η ίδια, ενώ το contrast είναι χαμηλότερο στο grating με τετραγωνική διαμόρφωση.

(b) απεικονίζεται ένα **sine wave grating**, όπου η φωτεινότητα των pixels διαμορφώνεται ημιτονοειδώς κατά μήκος της οριζόντιας διάστασης της οθόνης (x).

Τα απλούστερα gratings είναι τα ημιτονοειδούς διαμόρφωσης gratings. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι περιέχουν μία μόνο χωρική συχνότητα. Αυτά μπορεί να είναι κάθετα δηλαδή η φωτεινότητα να διαμορφώνεται περιοδικά μόνον στην οριζόντια κατεύθυνση ή να σχηματίζουν κάποια γωνία με τον οριζόντιο άξονα. Η μαθηματική εξίσωση της διαμόρφωσης φωτεινότητας για ένα απλό ημιτονοειδές κάθετο grating είναι:

$$L(x) = L_{mean}[1 + C \sin(2\pi Fx + \phi)]$$

Όπου $L(x)$ η φωτεινότητα στην θέση x , L_{mean} είναι η μέση φωτεινότητα της οθόνης, C contrast, F η χωρική συχνότητα και ϕ η φάση. Επομένως για να περιγραφεί ένα grating είναι απαραίτητος ο καθορισμός των παρακάτω παραμέτρων:

- Της **χωρικής συχνότητας (F, σε cycles/degree)**, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της χωρικής περιόδου (ράβδοι με μικρότερο πάχος παρουσιάζουν μεγαλύτερη χωρική συχνότητα).
- Της **φωτεινότητας** της οθόνης (L_{mean} σε cd/m^2), η οποία αποτελεί την μέση τιμή της διαμόρφωσης (η διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 1.2):

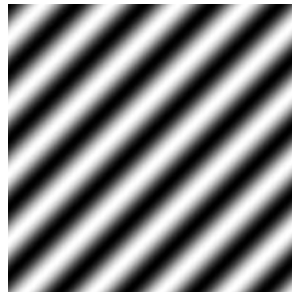
$$L_{mean} = (L_{max} + L_{min}) / 2$$

- Του **Contrast (C)**, αντίθεση φωτεινότητας), το οποίο εκφράζεται συνήθως ποσοστιαία (% C) ή στην λογαριθμική κλίμακα decibel (dB) (contrast σε dB = $20 \log_{10}C$). Σύμφωνα με τον **Michelson** ορίζεται ως εξής:

$$C_M = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min})$$

- Της **φάσης (φ)**, που περιγράφει την οριζόντια μετατόπιση του grating σε σχέση με την αρχή των αξόνων.
- Του **προσανατολισμού**. Στη περίπτωση που το grating δεν είναι κάθετο αλλά σχηματίζει γωνία ω με τον οριζόντιο άξονα (βλ. σχήμα 1.3), η διαμόρφωση της φωτεινότητας μεταβάλλεται κατά μήκος της οριζόντιας x αλλά και τις κατακόρυφης συνιστώσας y . Σε αυτή την περίπτωση η διαμόρφωση της φωτεινότητας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$L(x,y) = L_{\text{mean}}[1 + C \sin\{2\pi F \cos(\omega)y + 2\pi F \sin(\omega)x + \phi\}]$$



Σχήμα 1.3: Grating που σχηματίζει γωνία $\omega = 45^\circ$ με τον οριζόντιο άξονα.

1.2.2 Ψυχοφυσικές μέθοδοι

Πριν τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, όταν έγινε εφικτό για πρώτη φορά να καταγραφούν αποκρίσεις μεμονωμένων νευρώνων με την μέθοδο της ηλεκτροφυσιολογίας, οι ψυχοφυσικές δοκιμασίες αποτελούσαν το μοναδικό «παράθυρο» στη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίον οι αισθητήριες πληροφορίες μεταβιβάζονται και οργανώνονται στο οπτικό σύστημα. Ο Gustav Fechner στα μέσα του 18^{ου} αιώνα ήταν ο πρώτος που αντιλήφθηκε το οπτικό σύστημα ως ένα μαύρο κουτί, συσχετίζοντας τις φυσικές παραμέτρους των οπτικών ερεθισμάτων (input) με την αντιλαμβανόμενη απόκριση (output), δηλαδή με αυτό που εξεταζόμενος αντιλαμβάνεται και αναφέρει. Βέβαια, το πρώτο πρόβλημα προκύπτει από την διαπίστωση ότι το οπτικό σύστημα οργανώνεται από υπό-συστήματα νευρώνων με διαφορετικά ανατομικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά. Η έρευνα συσχέτισης όμως των φυσιολογικών χαρακτηριστικών των νευρώνων και των διαφόρων δομών του οπτικού συστήματος (άλλων ανώτερων θηλαστικών με νευρωνικό σύστημα παρόμοιο του ανθρώπινου, π.χ. μακάκος) με την ανθρώπινη οπτική αντίληψη, δημιούργησε έναν νέο χώρο μελέτης (inner psychophysics) που οδήγησε στην κατανόηση από μέρους μας των νευρωνικών δομών του οπτικού συστήματος.

Για να γίνει κατανοητός ο συσχετισμός των φυσικών χαρακτηριστικών των εικόνων που δεχόμαστε από τον περιβάλλοντα χώρο, με τις φυσιολογικές

λειτουργίες και αποκρίσεις των νευρώνων και επίσης με την αντιλαμβανόμενη απόκριση (που ολοκληρώνεται σε ανώτερα στάδια επεξεργασίας του οπτικού σήματος, στον εγκέφαλο), αναπτύχθηκαν διάφορες λειτουργικές δοκιμασίες της όρασης. Μία τέτοια μέθοδος αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '60 και είναι γνωστή ως **ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης** (contrast sensitivity).

1.2.3 Μέτρηση ευαισθησίας στην φωτεινή αντίθεση.

Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης αποτελεί μια ψυχοφυσική εξέταση της «ποιότητας» της όρασης βασισμένη σε προβαλλόμενα ερεθίσματα – κυρίως gratings – με διαφορετική χωρική συχνότητα, φωτεινότητα και contrast. Κατά την δοκιμασία αυτή προβάλλεται ένα ερέθισμα (grating) συγκεκριμένης χωρικής συχνότητας του οποίου μεταβάλλεται το contrast και ο εξεταζόμενος καλείται να βρει το ελάχιστο contrast C_{min} για το οποίο το grating είναι ορατό. Η **ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (Contrast Sensitivity, CS)** ορίζεται ως το αντίστροφο του ελάχιστου contrast C_{min} . Έτσι $CS=1/C_{min}$. Συνήθως μετράται στην κλίμακα decibel (**CS** σε dB = $-20 \log_{10} C$).

Για την υλοποίηση της δοκιμασίας της ευαισθησίας αντιθέσεων έχουν αναπτυχθεί τελευταία κατάλληλα λογισμικά προγράμματα, ενώ η προβολή των ερεθισμάτων σε οθόνη υψηλής ανάλυσης πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας κάρτας γραφικών υψηλής τεχνολογίας εγκαταστημένης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι λειτουργίες γάμμα της οθόνης (gamma functions) για το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε χρωματικό «κανάλι» μπορούν να βαθμονομηθούν με μεγάλη ακρίβεια με φασματοραδιόμετρο. Με την πραγματοποίηση της διαδικασίας βαθμονόμησης των «χρωματικών καναλιών» της οθόνης, επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων χρωματικότητας (X,Y - του χρωματικού φάσματος CIE) και φωτεινότητάς τους. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η άρτια και ακριβής αξιολόγηση της φωτεινής και χρωματικής ευαισθησίας του κάθε οφθαλμού σε διάφορα ερεθίσματα (με ελεγχόμενο μέγεθος, σχήμα, χρώμα, φωτεινότητα, contrast και κίνηση) και με την χρήση διαφορετικών διαδικασιών αναζήτησης, οι οποίες επιλέγονται και διαμορφώνονται κατάλληλα για την κάθε περίπτωση από το πρόγραμμα.

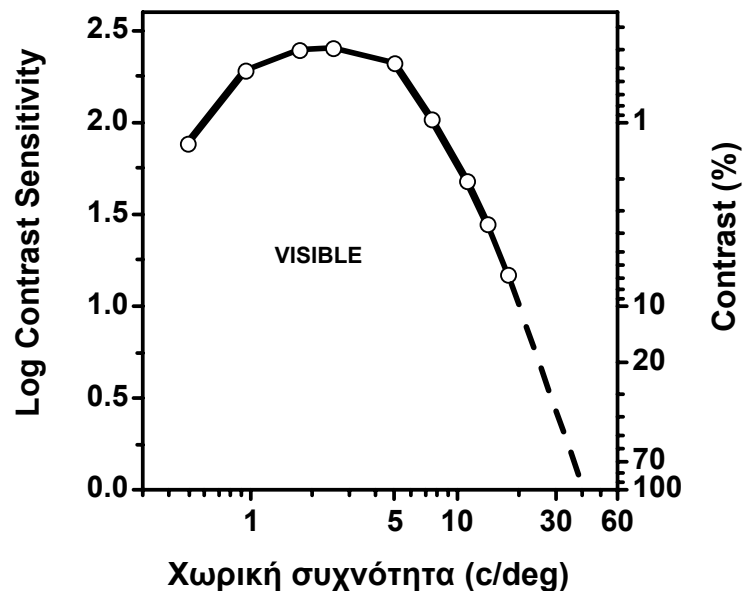
1.2.4 Contrast Sensitivity Function (CSF)

Η γνώση του φάσματος των χωρικών συχνοτήτων από τις οποίες αποτελείται μια εικόνα και της MTF (Modulation Transfer Function, Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης) ενός γραμμικού οπτικού συστήματος επιτρέπει την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος. Αυτή η απλή αρχή από την οπτική Fourier (Fourier optics) επεκτάθηκε στη μελέτη του ανθρώπινου οπτικού συστήματος πριν περίπου 40 χρόνια και ένα βασικό εργαλείο αυτών των μελετών αποτέλεσε η δοκιμασία **ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης**.

Μία δοκιμασία ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης συνήθως περιέχει μετρήσεις ουδούς/threshold για ημιτονοειδή grating μιας σειράς χωρικών συχνοτήτων, μεταξύ 0.5 και 20 c/deg. Το σχήμα 1.4 απεικονίζει μια **τυπική καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (Contrast Sensitivity Function, CSF)**

του ανθρώπου. Η χωρική συχνότητα και η ευαισθησία αντίθεσης (καθώς και το contrast) παριστάνονται σε λογαριθμικούς άξονες.

Η μέγιστη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζεται για χωρικές συχνότητες μεταξύ 3-5 c/deg. Έχει προταθεί ότι αυτό οφείλεται κυρίως στην υψηλή ευαισθησία αντίθεσης που παρουσιάζουν τα κύτταρα M (στον αμφιβληστροειδή και στον έξω γονατώδη πυρήνα, LGN), τα οποία παρουσιάζουν «μεγάλα» σχετικά υποδεκτικά πεδία (σε σύγκριση με τα κύτταρα P). Για χωρικές συχνότητες < 2 c/deg παρατηρείται μια βαθμιαία μείωση στην contrast sensitivity, η οποία έχει νευρωνικά αίτια, και πιο συγκεκριμένα οφείλεται στο φαινόμενο lateral inhibition των νευρώνων. Η μείωση της ευαισθησίας σε χωρικές συχνότητες μεγαλύτερες από 5 c/deg είναι σχεδόν γραμμική και οφείλεται κατά ένα ποσοστό σε οπτικούς λόγους (π.χ. οπτικές εκτροπές) και στο γεγονός ότι λιγότεροι νευρώνες είναι συντονισμένοι σε πολύ υψηλές συχνότητες. Το σημείο στο οποίο η καμπύλη της ευαισθησίας αντίθεσης τέμνει τον άξονα χ, αποτελεί την μέγιστη διακριτική ικανότητα του οφθαλμού (στο σχήμα 4 αυτή είναι περίπου 45 c/deg).



Σχήμα 1.4: Η τυπική καμπύλη ευαισθησίας στην φωτεινή αντίθεση (CSF). Αποτελεί ψυχοφυσικό ανάλογο της MTF (Modulation Transfer Function), γνωστής από την οπτική.

Μία τυπική καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (CSF) καλύπτει περίπου 8 οκτάβες¹ (octaves) οπτικής εμβέλειας χωρικών συχνοτήτων (βλ. σχήμα). Πολλά στοιχεία συνάγουν στο συμπέρασμα ότι η CSF αποτελείται από πολλαπλά, επικαλυπτόμενα χωρικά νευρωνικά κανάλια (με μορφή wavelet) (Blackmore and Campbell, 1969; Tolhurst and Movshon, 1975; De Valois and De Valois, 1988; Billock 2000) καθένα από τα οποία είναι συντονισμένα σε ένα συγκεκριμένο εύρος (περίπου 1-1.5 οκτάβα) χωρικών συχνοτήτων. Συνέπεια των παραπάνω αποτελούν οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στο σχήμα και την ευαισθησία ανάμεσα σε διαφορετικούς

¹ Μία οκτάβα αποτελεί τη διαφορά ανάμεσα σε δύο διαδοχικές δυνάμεις του 2.

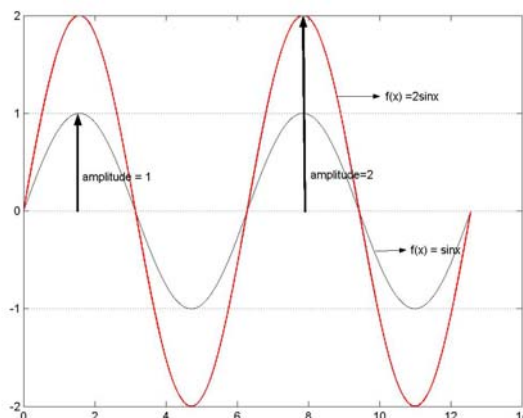
εξεταζόμενους (φυσιολογικοί εξεταζόμενοι μπορεί να παρουσιάζουν ακόμα και διαφορές πολλαπλασιαζόμενες με ένα συντελεστή ίσο με 3, Ginsburg, 1986), αλλά και ανάμεσα στους ίδιους εξεταζόμενους μετά κάποιο χρόνο (Peterzell et al., 1995). Αυτές οι αποκλίσεις προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τη δομή των μηχανισμών που επεξεργάζονται την οπτική πληροφορία (Ginsburg, 1986; Peterzell et al., 1993; Owsley et al. 1983, Peterzell et al., 1995).

Πριν προχωρήσουμε στην μελέτη της ανάλυσης Fourier η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των αποτελεσμάτων ψυχοφυσικών μετρήσεων CSF, πρώτα από τους Campbell και Robson το 1968 και η οποία παρείχε χρήσιμα στοιχεία για τη μελέτη των χωρικών χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος, θα γίνει μια σύντομη εισαγωγή σε μερικές απλές μαθηματικές έννοιες απαραίτητες για την κατανόηση των ιδιοτήτων των περιοδικών συναρτήσεων και του μετασχηματισμού Fourier.

1.2.5 Κάποιες απλές μαθηματικές έννοιες

1.2.5.1 Πλάτος και συχνότητα περιοδικής συνάρτησης

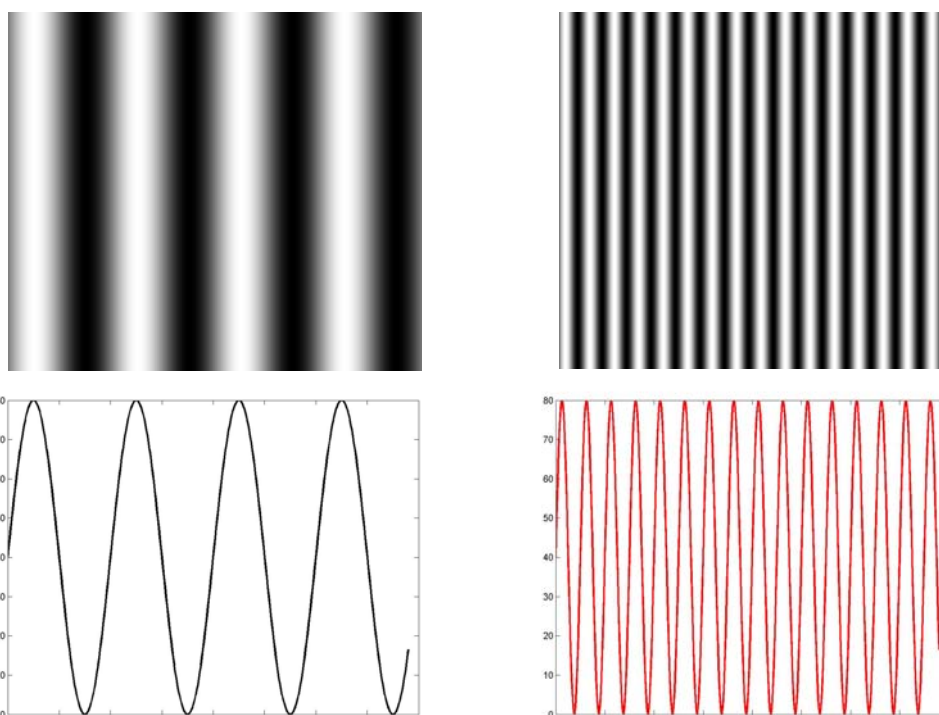
Αν μία περιοδική συνάρτηση πολλαπλασιαστεί εξωτερικά με έναν αριθμό αυτό θα μεταβάλλει την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της. Για παράδειγμα η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η συνάρτηση $\sin(x)$ είναι 1 και -1 αντίστοιχα, ενώ η συνάρτηση $2\sin(x)$ έχει μέγιστη τιμή 2 και ελάχιστη -2.



Σχήμα 1.5: Η συνάρτηση $2\sin(x)$ έχει μέγιστη τιμή 2 και ελάχιστη -2 (κόκκινο), ενώ η συνάρτηση $\sin(x)$ έχει μέγιστη τιμή 1 και ελάχιστη -1 (μαύρο).

Η απόσταση της μέγιστης τιμής μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης από τον οριζόντιο άξονα λέγεται πλάτος της συνάρτησης. Έτσι η συνάρτηση $\sin(x)$ έχει πλάτος (amplitude) 1 ενώ η $2\sin(x)$ έχει πλάτος 2 (σχήμα 1.5). Για ένα grating η μεταβολή του πλάτους μεταφράζεται σε μεταβολή του (Michelson) contrast του grating (βλ. ορισμό του Michelson contrast). Μεγαλύτερο πλάτος για τη διαμόρφωση της φωτεινότητας ενός grating οδηγεί σε μεγαλύτερο contrast για το grating.

Ο πολλαπλασιασμός μίας περιοδικής συνάρτησης εσωτερικά με έναν αριθμό, μεταβάλλει την **συχνότητα (frequency)** της συνάρτησης (το πόσο γρήγορα δηλαδή ταλαντώνεται). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός ο οποίος πολλαπλασιάζει εσωτερικά τη συνάρτηση τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα της. Έτσι η συνάρτηση $\sin(4x)$ έχει μεγαλύτερη συχνότητα από τη $\sin(x)$ (βλ. σχήμα 1.6). Για ένα **grating** μικρότερη συχνότητα μεταφράζεται σε πιο παχιά ράβδους, ενώ μεγαλύτερη συχνότητα σε λεπτότερες ράβδους.

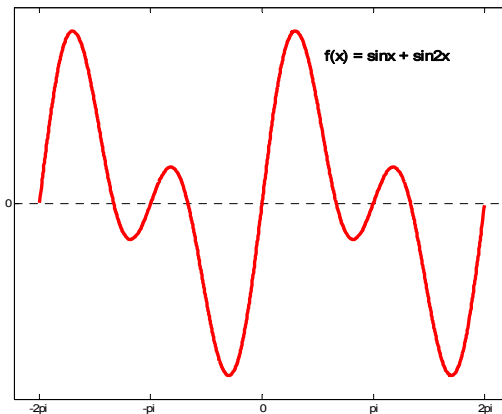


Σχήμα 1.6 : (κάτω) Η συνάρτηση $\sin(4x)$ (κόκκινο) έχει μεγαλύτερη συχνότητα από τη $\sin(x)$ (μαύρο), ταλαντώνεται δηλαδή πιο γρήγορα. Gratings με μεγαλύτερη χωρική συχνότητα (επάνω) παρουσιάζουν ταχύτερη εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών ράβδων.

1.2.5.2 Ανάλυση περιοδικής συνάρτησης σε σειρά Fourier

Το ανάπτυγμα σε σειρά Fourier επιτρέπει την ανάλυση μιας **περιοδικής** συνάρτησης σε άπειρη σειρά **αρμονικών** συναρτήσεων. Αρμονική λέγεται μία συνάρτηση η οποία έχει ημιτονοειδή ή συνημιτονοειδή μορφή. Διαφορετικά λέγεται μη αρμονική.

Έτσι ένα **περιοδικό**, με περίοδο X , αλλά **μη αρμονικό** κύμα (σχήμα 1.7), μπορεί να γραφεί, σύμφωνα με τους κανόνες της ανάλυσης Fourier, ως άθροισμα αρμονικών συναρτήσεων (sine, cosine) που έχουν περίοδο ακέραια υποπολλαπλάσια της περιόδου X του αρχικού κύματος, δηλαδή $X, \frac{X}{2}, \frac{X}{3}$ κ.τ.λ. Η τεχνική αυτή πήρε το όνομα της από τον Γάλλο μαθηματικό **Jean Baptiste Joseph, Baron de Fourier** (1768-1830).



Σχήμα 1.7: Η μη αρμονική, αλλά περιοδική, συνάρτηση $f(x) = \sin x + \sin 2x$.

Πιο συγκεκριμένα, μια περιοδική συνάρτηση $f(x)$ μπορεί να παρασταθεί ως μία σειρά Fourier της μορφής,

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos mkx + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin mkx$$

όπου $k = \frac{2\pi}{X}$, X η περίοδος της συνάρτησης.

Οι συντελεστές A_0, A_m, B_m προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$A_0 = \frac{X}{2} \int_0^X f(x) dx,$$

$$A_m = \frac{2}{X} \int_0^X f(x) \cos mkx dx,$$

$$B_m = \frac{2}{X} \int_0^X f(x) \sin mkx dx$$

Ο προσδιορισμός των παραπάνω συντελεστών, αναφέρεται ως **ανάλυση Fourier**.

Τυχόν συμμετρίες της συνάρτησης που αναλύεται σε σειρά Fourier, μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά τους υπολογισμούς. Έτσι αν η συνάρτηση $f(x)$ είναι άρτια δηλαδή συμμετρική γύρω από τον άξονα yy' τότε η σειρά Fourier θα περιέχει μόνο συνημίτονα (που είναι άρτιες συναρτήσεις). Δηλαδή θα είναι $B_m = 0$ για όλα τα m . Παρόμοια αν η συνάρτηση είναι περιττή δηλαδή είναι συμμετρική ως προς την αρχή των αξόνων τότε η σειρά Fourier θα περιέχει μόνο ημίτονα. Δηλαδή θα είναι $A_m = 0$ για όλα τα m .

Στο **Παράρτημα I** παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανάλυσης σε σειρά Fourier ενός τετραγωνικού κύματος.

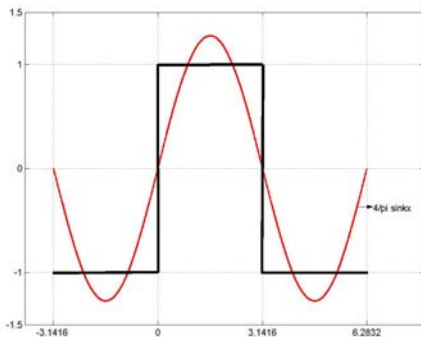
1.2.6 Χρήση της ανάλυσης Fourier σε μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity)

Ένα κύμα τετραγωνικής διαμόρφωσης (square wave), αναπτυσσόμενο σε σειρά Fourier (Παράρτημα Ι), παριστάνεται από την άπειρη σειρά:

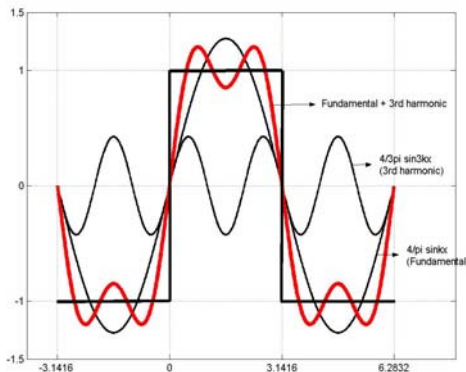
$$\frac{4}{\pi} \left(\sin \kappa \chi + \frac{1}{3} \sin 3\kappa \chi + \frac{1}{5} \sin 5\kappa \chi + \dots \right), \quad \kappa = \frac{2\pi}{X}.$$

Ο όρος της σειράς με τη μικρότερη συχνότητα $\frac{4}{\pi} \sin \kappa \chi$ λέγεται **θεμελιώδης (fundamental)**, ενώ οι υπόλοιποι όροι είναι γνωστοί ως **αρμονικές (harmonics)**. Στη σειρά Fourier του παραδείγματος απουσιάζουν οι άρτιοι όροι και έτσι εμφανίζονται μόνο οι περιττές αρμονικές ($3^{\text{η}}$, $5^{\text{η}}$ κ.τ.λ.).

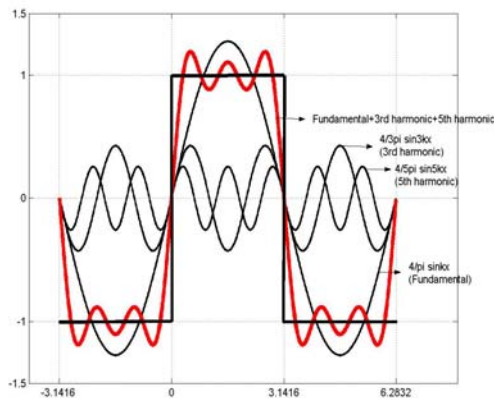
Στο σχήμα 1.8 βλέπουμε πώς η θεμελιώδης συχνότητα προστιθέμενη με τις αρμονικές προσεγγίζουν το τετράγωνο κύμα. Παρατηρούμε ότι το πλάτος του πρώτου όρου της σειράς (θεμελιώδης) είναι $4/\pi$ ενώ τα πλάτη των υπόλοιπων όρων ($3^{\text{η}}$, $5^{\text{η}}$ αρμονική) μειώνονται (είναι $4/3\pi$ για την $3^{\text{η}}$ αρμονική, $4/5\pi$ για την $5^{\text{η}}$ αρμονική κτλ). Για ένα grating αυτό μεταφράζεται σε μείωση του contrast. Ταυτόχρονα αυξάνονται οι συχνότητες των μεγαλύτερων αρμονικών (το χ πολλαπλασιάζεται μεγαλύτερο αριθμό). Η τρίτη αρμονική για παράδειγμα έχει τρεις φορές μεγαλύτερη συχνότητα από την θεμελιώδη και τρεις φορές μικρότερο πλάτος.



(α) Η θεμελιώδης
συχνότητα $\frac{4}{\pi} \sin \kappa \chi$.



(β) Η θεμελιώδης
+ την $3^{\text{η}}$ αρμονική $\frac{4}{3\pi} \sin 3\kappa \chi$

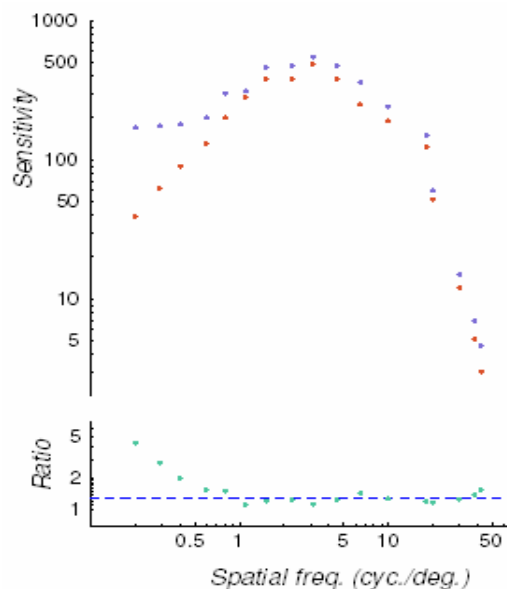


(γ) Η θεμελιώδης + την 3^η
 + την 5^η αρμονική $\frac{4}{5\pi} \sin 5\kappa\chi$

Σχήμα 1.8: Ανάλυση τετραγωνικού κύματος σε σειρά Fourier.

1.2.7 Πραγματοποιεί το οπτικό σύστημα ανάλυση Fourier της οπτικής εικόνας;

Μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα συζήτηση ξεκίνησε, σχετικά με το αν το οπτικό μας σύστημα πραγματοποιεί ανάλυση Fourier του προσλαμβανόμενου ερεθίσματος, μετά τη δημοσίευση της εργασίας των **Fergus Campbell** και **John Robson** (Campbell and Robson 1968), κατά την οποία μετρήθηκε η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) με δύο τύπους grating. Με ένα grating ημιτονοειδούς διαμόρφωσης (sine wave) και με ένα τετραγωνικής διαμόρφωσης (square wave). Τα αποτελέσματα παριστάνονται στο σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Καμπύλες ευαισθησίας αντίθεσης για τετράγωνο (μπλε) και ημιτονοειδές (κόκκινο) grating. Στο κάτω μέρος παριστάνεται η αναλογία τους. Ίση με $4/\pi$ για συχνότητες > 0.8 c/deg.

Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης όταν μετρήθηκε με ένα τετραγωνικής διαμόρφωσης grating ήταν πάντοτε μεγαλύτερη από την ευαισθησία σε

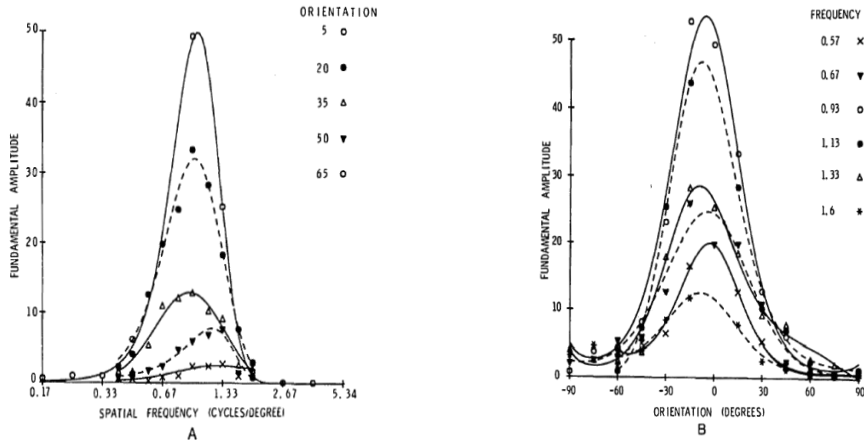
grating ημιτονοειδούς διαμόρφωσης. Μάλιστα για συχνότητες μεγαλύτερες των 0.8 c/deg ο λόγος της ευαισθησίας ήταν σταθερός και ίσος με 4/π.

Αναλύοντας ένα κύμα τετραγωνικής διαμόρφωσης σε σειρά Fourier αυτό γράφεται, $\frac{4}{\pi}(\sin \kappa\chi + \frac{1}{3}\sin 3\kappa\chi + \frac{1}{5}\sin 5\kappa\chi + \dots)$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (Contrast Sensitivity Function, CSF) φθίνει για χωρικές συχνότητες μεγαλύτερες των 3 c/deg (βλ. σχήμα 1.4) αναμένεται η μορφή της CSF για μεγάλες συχνότητες να καθορίζεται από την ευαισθησία στον θεμελιώδη όρο του τετραγωνικού grating, $\frac{4}{\pi}\sin \kappa\chi$ (οι μεγαλύτερες αρμονικές έχουν μεγαλύτερη συχνότητα και μικρότερο πλάτος (μικρότερο contrast) κάτι που τις καθιστά πιο δυσδιάκριτες).

Τα αποτελέσματα του πειράματος των Campbell και Robson δείχνουν ότι το οπτικό σύστημα **πραγματοποιεί σε κάποιο βαθμό μια τέτοια ανάλυση Fourier**, τουλάχιστον για μικρές τιμές contrast, κοντά στην ουδό. Το τετραγωνικό grating προσλαμβάνεται ως ημιτονοειδές με πλάτος 4/π ($\frac{4}{\pi}\sin \kappa\chi$). Για συχνότητες μικρότερες των 0,8 c/deg προφανώς η 3^η αρμονική συνεισφέρει και η ευαισθησία για το τετραγωνικής διαμόρφωσης grating είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία για το ημιτονοειδές grating, με τον λόγο τους να παρεκκλίνει από το 4/π.

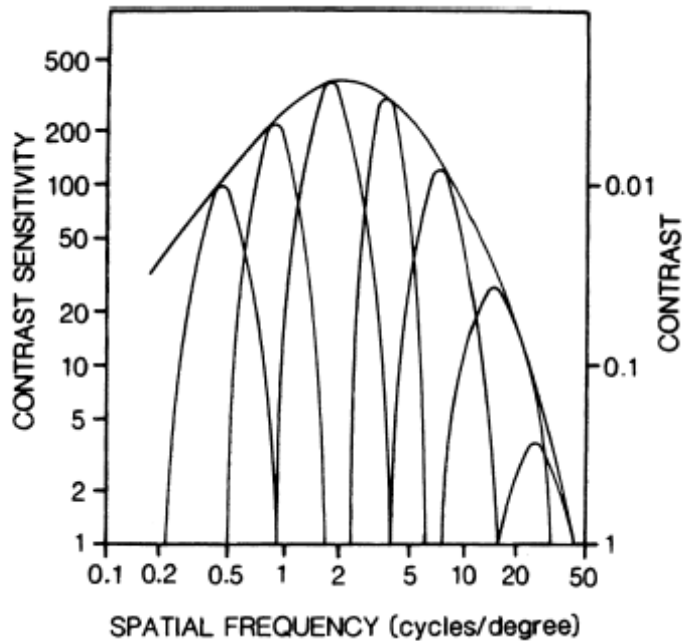
Το ερώτημα που τίθεται λοιπόν είναι εάν το οπτικό μας σύστημα πραγματοποιεί ανάλυση Fourier της προσλαμβανόμενης εικόνας. Αφού κάθε ερέθισμα μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα αρμονικών συνιστωσών (βλ. μετασχηματισμός Fourier) τότε η απόκριση του συστήματος σε αυτό το ερέθισμα θα ήταν ίση με το άθροισμα των αποκρίσεων στις επιμέρους αρμονικές συνιστώσες. Δηλαδή η συμπεριφορά του οπτικού συστήματος θα ήταν γραμμική. Επίσης το δυναμικό της απόκρισής σε κάποιο ερέθισμα, ενός μόνο νευρώνα, θα πρέπει να καθορίζεται αποκλειστικά από τη **συχνότητα** και τον **προσανατολισμό** του ερεθίσματος και μάλιστα κάθε νευρώνας θα πρέπει να αποκρίνεται σε ένα **στενό εύρος συχνοτήτων και προσανατολισμού**.

Μια νευροφυσιολογικών ερευνών έδειξαν ότι τα νευρωνικά κύτταρα του οπτικού φλοιού αποκρίνονται επιλεκτικά σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων και προσανατολισμών. Πιο συγκεκριμένα οι Hubel και Wiesel (1965) παρατήρησαν ότι οι νευρώνες στον πρωτοταγή οπτικό φλοιό V1 ήταν συντονισμένοι σε 10-15 'κανάλια' προσανατολισμών, με αποτέλεσμα κάθε κανάλι να εμφανίζει εύρος $\sim 12^\circ - 15^\circ$. Σήμερα πλέον γνωρίζουμε ότι ενώ τα υποδεκτικά πεδία των νευρώνων στο έξω γονατώδη πυρήνα (LGN) είναι κυκλικά, στον πρωτοταγή οπτικό φλοιό V1 είναι πιο επιμήκη και για το λόγο αυτό παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία (είναι 'συντονισμένα') σε προσανατολισμένα ερεθίσματα, αλλά και σε συγκεκριμένες χωρικές συχνότητες, (βλ. σχήμα 1.10)



Σχήμα 1.10: Αποκρίσεις νευρωνικού κυττάρου σε ερεθίσματα διαφορετικής γωνίας προσανατολισμού για σταθερή χωρική συχνότητα (αριστερά) και διαφορετικής συχνότητας για σταθερή γωνία προσανατολισμού (δεξιά), (Webster, 1985).

Παράλληλα μια σειρά από ψυχοφυσικές μελέτες έδειξαν ότι το οπτικό σύστημα αποτελείται από «παράλληλες» ομάδες νευρώνων που είναι συντονισμένες σε συγκεκριμένες συχνότητες (βλ. σχήμα 1.11) και προσανατολισμούς της οπτικής εικόνας. Οι μηχανισμοί που αποτελούν την βάση αυτής της ανάλυσης ονομάζονται χωρικά **νευρωνικά κανάλια** (neural spatial channels) το εύρος των οποίων υπολογίζεται 1.5 – 2 οκτάβες περίπου.



Σχήμα 1.11: Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί φάκελο που περιέχει μια σειρά από ανεξάρτητα χωρικά νευρωνικά κανάλια, συντονισμένα σε συχνότητες περιορισμένου εύρους (Ginsburg, 1986).

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε πως ενώ τα νευρωνικά κανάλια (στη βιβλιογραφία αναφέρονται και ως **αναλυτές**, (analyzers)) του οπτικού συστήματος **αποκρίνονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος χωρικών συχνοτήτων και προσανατολισμών**, διαδικασία δηλαδή αντίστοιχη της ανάλυσης Fourier, το **εύρος όμως αυτών των καναλιών δεν είναι τόσο**

στενό ώστε να μπορούμε να μιλήσουμε για ανάλυση Fourier με αυστηρά μαθηματική έννοια (Graham 1979). Τα παραπάνω καταρρίπτουν σε κάποιο βαθμό την υπόθεση της γραμμικότητας.

Οι μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) αποτελούν τρόπο αξιολόγησης της όρασης κοντά στην ουδό/threshold. Όμως σε συνθήκες λειτουργικής όρασης, τόσο χαμηλές τιμές contrast σπάνια παρουσιάζονται. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί ψυχοφυσικές δοκιμασίες με σκοπό την αξιολόγηση της όρασης σε contrasts μεγαλύτερα του threshold (suprathreshold), όπως οι contrast matching δοκιμασίες οι οποίες αξιολογούν το φαινομενικό (apparent) contrast αλλά και οι οπτικοί χρόνοι αντίδρασης.

Οι δοκιμασίες contrast matching είναι από τις πιο διαδεδομένες ψυχοφυσικές μεθόδους για την καταγραφή αποκρίσεων σε τιμές contrast μεγαλύτερες από την ουδό/threshold (suprathreshold). Σε μία τέτοια δοκιμασία προβάλλονται στην οθόνη δύο ερεθίσματα (gratings). Το ένα grating έχει σταθερό contrast, ενώ το contrast του δεύτερου grating μεταβάλλεται από τον εξεταζόμενο μέχρι να συμπέσει (φαινομενικά) με το contrast του πρώτου grating.

1.2.8 Απλοί χρόνοι αντίδρασης (Simple Reaction Times – RTs)

Απλός χρόνος αντίδρασης ορίζεται ως **‘το διάστημα από την εμφάνιση ενός ερεθίσματος μέχρι την απόκριση, υπό την προϋπόθεση ότι ο εξεταζόμενος έχει εκπαιδευτεί να αποκρίνεται όσο το δυνατόν ταχύτερα’** (Teichner, 1954). Ο απλός χρόνος αντίδρασης (XA) αποτελείται από τρία σκέλη:

- τη λανθάνουσα περίοδο πρόσληψης και αντίληψης του ερεθίσματος,
- τη μεταβίβαση και διάδοση της νευρικής διέγερσης στα ανώτερα κέντρα επεξεργασίας, και
- το χρόνο για την προετοιμασία και εκτέλεση της κινητικής απόκρισης.

Ο απλός χρόνος αντίδρασης, όπως προτάθηκε από τους Lupp et al. (1978) θα μπορούσε να παρασταθεί υπό τη μορφή μίας απλής εξίσωσης ως,

$$T = T_{\alpha} + T_{\kappa}$$

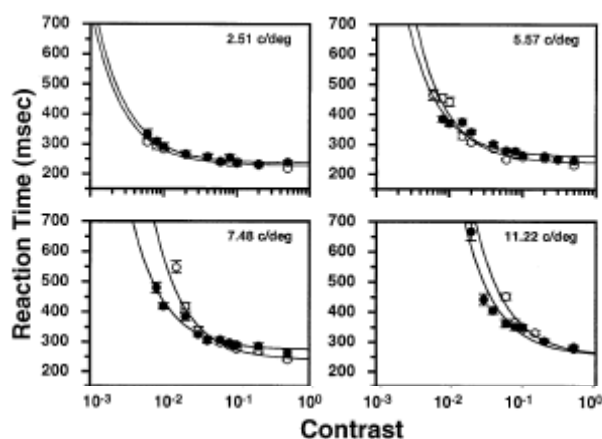
Όπου T είναι ο χρόνος αντίδρασης, T_{α} ο χρόνος αντίληψης του ερεθίσματος και T_{κ} ο απαιτούμενος χρόνος για την κινητική απόκριση. T_{α} είναι το χρονικό διάστημα για να καταστεί το ερέθισμα ανιχνεύσιμο και T_{κ} ο χρόνος από την αντίληψη του ερεθίσματος μέχρι την απόκριση του εξεταζόμενου, π.χ. το πάτημα ενός κουμπιού. Ο χρόνος κινητικής απόκρισης θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητος των χαρακτηριστικών του ερεθίσματος (π.χ. φωτεινότητα, contrast κ.τ.λ.). Έτσι διαφορές ανάμεσα σε χρόνους αντίδρασης, προκύπτουν ως διαφορές στο χρόνο που το ερέθισμα καθίσταται ανιχνεύσιμο.

Δύο παρατηρήσεις σχετικές με τους οπτικούς XA θεωρούνται αδιαμφισβήτητες καθώς προκύπτουν από πληθώρα μελετών (Breitmeyer, 1975; Harwerth and Levi, 1978; Felipe et al., 1993; Menees, 1998). Πρώτον,

καθώς το contrast του ερεθίσματος μειώνεται οι ΧΑ αυξάνονται και δεύτερον, οι ΧΑ είναι μεγαλύτεροι για υψηλές χωρικές συχνότητες ($>10\text{c/deg}$) από ότι είναι για χαμηλές χωρικές συχνότητες ($<2\text{c/deg}$)

Είναι επίσης γνωστό (Murray and Plainis, 2003) ότι οι ΧΑ επηρεάζονται από τα ανατομικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά της νευρωνικής οδού, από τον αμφιβληστροειδή στον οπτικό φλοιό. Δύο κατηγορίες γαγγλιακών κυττάρων προβάλλουν στον έξω γωνιατώδη πυρήνα (LGN) των ανώτερων θηλαστικών. Τα κύτταρα αυτά ονομάζονται Μ και Ρ, και παίρνουν το όνομα τους από τις στοιβάδες του LGN στις οποίες προβάλλουν. Οι νευρωνικοί άξονες των κυττάρων Μ καταλήγουν στις δύο κατώτερες στοιβάδες του LGN τις μεγαλοκυτταρικές (Magnocellular), ενώ οι νευροάξονες των κυττάρων Ρ καταλήγουν στις τέσσερις ανώτερες στοιβάδες του LGN τις μικροκυτταρικές (Parvocellular) στοιβάδες (Williams and Lit 1983; Rodieck et al., 1985). Οι νευρωνικές αυτές οδοί παραμένουν διαχωρισμένες μέχρι τις στοιβάδες του ταινιωτού (striate) φλοιού, όπου εκεί επικαλύπτονται (Lund 1987; Lund and Hadingham, 1995; Nealey and Maunsell, 1994). Αν και οι διαφορές στα χαρακτηριστικά των δύο νευρωνικών οδών είναι πολλές, εδώ θα αναφερθούν οι ιδιότητες που σχετίζονται με τις αποκρίσεις τους στο contrast, καθώς και οι διαφορετικές χρονικές τους αποκρίσεις. Γενικά τα Μ κύτταρα έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) από τα Ρ κύτταρα και οι αποκρίσεις τους στα οπτικά ερεθίσματα είναι ταχύτερες (π.χ. Sclar et al., 1990; Maunsell et al., 1999).

Όταν οι ΧΑ παρασταθούν γραφικά συναρτήσε του contrast, προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του σχήματος 1.12 οι οποίες δείχνουν ότι οι ΧΑ μειώνονται με την αύξηση του contrast. Οι ΧΑ σταθεροποιούνται από μια τιμή contrast και μετά, σε μία συγκεκριμένη χρονική διάρκεια απόκρισης, που καλείται ασυμπτωτικός ΧΑ (τ_0), της παρεμβάλουσας συνάρτησης.



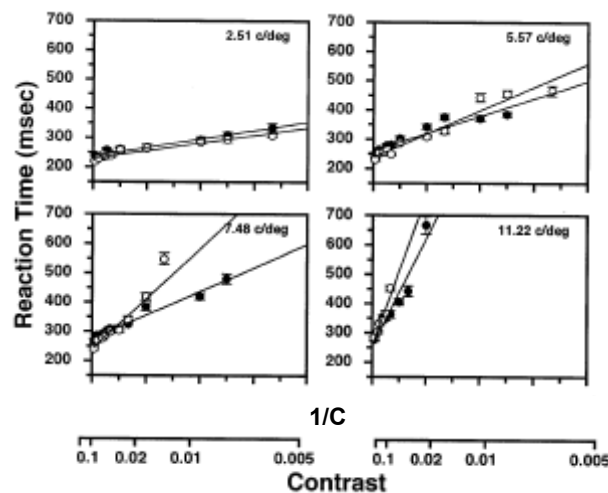
Σχήμα 1.12: Γραφήματα ΧΑ συναρτήσε του contrast για δύο εξεταζόμενους (κύκλοι, τετράγωνα) και διαφορετικές χωρικές συχνότητες. Κάθε σημείο αντιστοιχεί στη μέση τιμή τουλάχιστον 24 μετρήσεων (μέγιστο 32). Ο άξονας των contrasts είναι λογαριθμικός. Η μέση φωτεινότητα της οθόνης ήταν 20 cd/m^2 , (Plainis and Murray, 2000).

Ο ασυμπτωτικός χρόνος αντίδρασης (τ_0) μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται η χωρική συχνότητα του προβαλλόμενου grating. Ερεθίσματα που περιέχουν

μικρότερες χωρικές συχνότητες, έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερους τ_0 . Η μορφή των καμπύλων των ΧΑ συναρτήσεσι του contrast είναι παρόμοια σε κάθε περίπτωση, και μπορεί να περιγραφηί ικανοποιητικαί από τη παρακάτω σχέση:

$$\tau = \tau_0 + k \frac{1}{C},$$

όπου τ ο χρόνος αντίδρασης, τ_0 η ασύμπτωτη, k η κλίση της καμπύλης και C το contrast. Στο σχήμα 1.13 παρουσιάζονται επανασχεδιασμένα τα ίδια δεδομένα, αυτή τη φορά συναρτήσεσι του $1/C$. Η γραμμική σχέση, όπως προκύπτει από τη παραπάνω σχέση, επιβεβαιώνεται για διαφορετικέσ χωρικέσ συχνότητες, και για τουσ δύο εξεταζόμενουσ.



Σχήμα 1.13: Γραφήματα ΧΑ συναρτήσεσι του αντίστροφου του contrast ($1/C$) για δύο εξεταζόμενουσ (κύκλιοι, τετράγωνα) και διαφορετικέσ χωρικέσ συχνότητες, (από Plainis and Murray, 2000).

Όπως φαίνεται στο σχήμα υπάρχει σημαντική διαφορά στην τιμή της κλίσεσ k , για διαφορετικέσ χωρικέσ συχνότητες. Στισ χαμηλέσ χωρικέσ συχνότητες (2.51 c/deg), μικρέσ αλλαγέσ στο contrast έχουν μικρή επίδραση τουσ ΧΑ, η τιμή του k είναι μικρή. Στισ μεσαίεσ χωρικέσ συχνότητες (5.57 και 7.48 c/deg) η τιμή του k είναι μεσαία, ενώ στισ μεγαλύτερεσ χωρικέσ συχνότητες (11.2 c/deg) η τιμή του k είναι μεγαλύτερη, λόγω της μεγαλύτερης επίδρασεσ του contrast τουσ ΧΑ. Πέρα όμως από την εξάρτησεσι της κλίσεσ k από τη χωρική συχνότητα, υπάρχει εξάρτησεσι και από τη φωτεινότητα. Καθώσ ο λογαριθμοσ της φωτεινότητεσ μειώνεται, υπάρχει μια σχεδόν γραμμική αύξεσι του λογαριθμοσ τησ κλίσεσ k , (Plainis and Murray, 2000), δείχνοντασ ότι υπάρχει στενή συσχετίσεσι τησ παραμέτερου αυτήσ με την ορατότητα του ερεθίσματοσ – σε χαμηλέσ φωτεινότητεσ, τα thresholds είναι υψηλά και η δυναμική εμβέλεια είναι μικρή.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.13, μικρέσ τιμέσ τησ κλίσεσ k αντιστοιχούν σε μεγάλη ευαισθησία για το προβαλλόμενο ερέθισμα και αντίστροφα. Το αντίστροφο λοιπόν τησ κλίσεσ $1/k$ αποτελεί μέτρο εκτίμησεσι τησ ευαισθησίασ και αναφέρεται ωσ RT – gain.

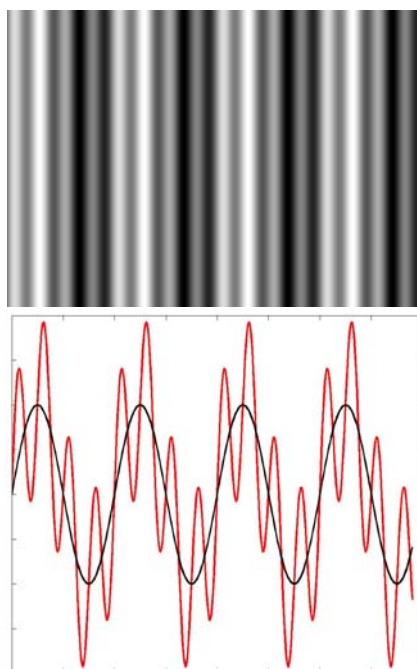
Όσον αφορά τη σχέση των ΧΑ με τη νευροφυσιολογική δομή του οπτικού συστήματοσ, φαίνεται πως οι αποκρίσεσι των M και P νευρώνων

διαχωρίζονται μεταξύ τους, από τις αποκρίσεις τους σε ερεθίσματα χαμηλού contrast (Plainis and Murray, 2000). Οι M νευρώνες είναι ευαίσθητοι σε χαμηλά contrasts και χαμηλές φωτεινότητες, ενώ οι P νευρώνες αποκρίνονται ελάχιστα σε χαμηλότερα contrasts από 0.1. Είναι φανερό από τα σχήματα 1.12, 1.13 ότι οι ΧΑ σε ερεθίσματα χαμηλών χωρικών συχνοτήτων, όπου το σήμα μεταδίδεται από τα Μ κύτταρα, οι χρόνοι αντίδρασης είναι μικροί για contrasts μεγαλύτερα από 0.01, ενώ τα Μ κύτταρα παρουσιάζουν ισχυρότερες αποκρίσεις. Σε υψηλές χωρικές συχνότητες το σήμα μεταδίδεται από τα Ρ κύτταρα και οι χρόνοι αντίδρασης είναι μικροί μόνο για contrasts μεγαλύτερα από 0.1, εκεί δηλαδή που τα Ρ κύτταρα παρουσιάζουν ισχυρές αποκρίσεις. Καθώς το contrast μειώνεται κάτω από 0.1, όταν οι αποκρίσεις των Ρ κυττάρων είναι κάτω από τα επίπεδα του θορύβου, οι ΧΑ αυξάνονται σημαντικά.

Είναι επομένως αντιληπτό ότι οι οπτικοί ΧΑ μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την ευαισθησία του οπτικού συστήματος για τιμές contrast υψηλότερες του threshold/ουδού, όσο τουλάχιστον αφορά τα απλά gratings.

1.3 Σύνθετα (compound) gratings

Η ανάγκη για ακόμα πιο σύνθετα οπτικά ερεθίσματα που μπορούν να προσεγγίσουν καλύτερα τα χαρακτηριστικά των ερεθισμάτων που βρίσκονται στη φύση, οδήγησε στα τέλη της δεκαετίας του '60 στη χρήση gratings τα οποία περιέχουν όχι μόνο μία χωρική συχνότητα αλλά δύο ή περισσότερες. Τα ερεθίσματα αυτά ονομάζονται **σύνθετα (compound) gratings**.



Σχήμα 1.14: Σύνθετο (compound) grating (επάνω) αποτελούμενο από δύο χωρικές συχνότητες $F_1 = 1$ c/deg και $F_2 = 4$ c/deg ($\phi_1 = \phi_2 = 0$). Η γραφική αναπαράσταση διαμόρφωσης της φωτεινότητας (κάτω) για το σύνθετο grating (κόκκινο) και ενός απλού grating (μαύρο) χωρικής συχνότητας $F = 1$ c/deg.

Η τυπική μαθηματική σχέση που περιγράφει τη διαμόρφωση φωτεινότητας ενός κάθετου σύνθετου grating είναι:

$$L(x) = L_{mean}\{1+C[\sin(2\pi F_1x+\phi_1) + \sin(2\pi F_2x+\phi_2)]\}$$

Από το σχήμα 1.14 καθίσταται εμφανές ότι το Michelson contrast του σύνθετου grating είναι μεγαλύτερο από αυτό του απλού, ημιτονοειδούς διαμόρφωσης, grating. Αυτό που θα περίμενε κανείς είναι ότι αυτή η διαφορά του contrast θα καθιστούσε το σύνθετο ερέθισμα σημαντικά πιο ανιχνεύσιμο από τις απλές ημιτονοειδούς διαμόρφωσης συνιστώσες του. Κάτι τέτοιο όμως δεν προκύπτει πειραματικά. Ψυχοφυσικές μελέτες ότι έδειξαν ότι, **το σύνθετο grating είναι ελάχιστα πιο ανιχνεύσιμο από τα απλά gratings** (Graham and Nachmias, 1971; Graham Robson and Nachmias, 1978), παρέχοντας ενδείξεις για την ύπαρξη νευρωνικών καναλιών συντονισμένων σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες (βλ. Κεφάλαιο 3).

1.3.1 Τοπικό (Local) Contrast

Σε ένα σύνθετο grating το Michelson contrast, όπως ορίστηκε παραπάνω, δεν αποτελεί απολύτως αξιόπιστο μέτρο του contrast, αφού για τον υπολογισμό του λαμβάνεται υπόψη μόνο η μέγιστη και η ελάχιστη φωτεινότητα του grating. Σε ένα τέτοιο grating η κυματοειδής μορφή του παρουσιάζει τοπικά μέγιστα και ελάχιστα (βλ. σχήμα 1.14), επηρεάζοντας έτσι το τοπικό (local) contrast του grating και κατά συνέπεια την ανιχνευσιμότητά του. Η σημασία του τοπικού contrast, είναι ακόμα μεγαλύτερη για μία φυσική εικόνα, όπου λαμβάνουν χώρα συνέχεις και απότομες μεταβολές, τόσο της φωτεινότητας όσο και του contrast.

Αρκετές μετρικές έχουν προταθεί για την εκτίμηση του τοπικού contrast αρχικά σε σύνθετα gratings. Αυτές περιέχουν εκτίμηση του τοπικού Michelson contrast ανάμεσα σε γειτονικά μέγιστα και ελάχιστα (Badcock, 1984 a,b), εκτίμηση του τοπικού Michelson contrast ανάμεσα σε γειτονικά μέγιστα (Akutsu and Legge, 1995), χρήση του gradient της φωτεινότητας (Campbell et al., 1981, Hess and Pointer 1987), το εύρος των φωτεινών και σκοτεινών ράβδων (Bennett and Banks, 1991) και άλλα. Μέτρο αξιολόγησης της χρησιμότητας των παραπάνω μετρικών αποτελεί η συσχέτιση τους με τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος, όπως αυτές προκύπτουν από ψυχοφυσικές μετρήσεις.

Έτσι σε πειράματα contrast matching (Akutsu and Legge, 1995), εξετάστηκε ποιο από τα παραπάνω μοντέλα σχετίζεται καλύτερα με τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος για μια σειρά από διαφορετικά σύνθετα gratings. Κάποια μοντέλα παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για συγκεκριμένους συνδυασμούς gratings και contrasts, αλλά όλες οι παραπάνω μετρικές αποτυγχάνουν να προβλέψουν συνολικά τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος. Σε παρόμοια μελέτη (Tiippana et al., 1994) επιχειρήθηκε η καταγραφή του προσλαμβανόμενου contrast, ενός σύνθετου συνημιτονοειδούς διαμόρφωσης grating σε σχέση με ένα απλό συνημιτονοειδές grating. Τα gratings είχαν διαφορετικά Michelson αλλά το ίδιο

root-mean-square (RMS) contrast. Το RMS contrast δεν είναι τίποτα άλλο από την τυπική απόκλιση των τιμών της φωτεινότητας, και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_{\text{rms}} = \left[\frac{\sum L^2(x, y) - \frac{(\sum L(x, y))^2}{N}}{N} \right]^{1/2}$$

Η χρήση του RMS contrast αν και αποτελεί απλώς μία στατιστική περιγραφή των τιμών της φωτεινότητας, φαίνεται να συσχετίζεται ικανοποιητικά με το προσλαμβανόμενο contrast. Άλλη μια μελέτη contrast matching με χρήση μοτίβων τυχαίου θορύβου (Moulden et. al., 1990), έδειξε ότι το RMS contrast σχετίζεται ικανοποιητικά με τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος.

Όσον αφορά το τοπικό contrast των φυσικών εικόνων, αν και η σημασία του είναι προφανώς σημαντική, λίγες μελέτες έχουν ασχοληθεί μέχρι στιγμής με την εύρεση μίας μετρικής που να περιγράφει ικανοποιητικά το τοπικό contrast των φυσικών σκηνών. Η μετρική, που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στις μελέτες με ημιτονοειδή gratings, το Michelson contrast, δεν περιγράφει επαρκώς το contrast των φυσικών εικόνων, αφού λαμβάνει υπόψη μόνο τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της εικόνας. Έτσι ένα μόνο φωτεινό ή σκοτεινό pixel μπορεί να μεταβάλλει τη τιμή του Michelson contrast.

Πέρα από το root-mean-square (RMS) contrast, το οποίο είναι εύκολο να υπολογιστεί και αποτελεί καλή πρόβλεψη του τόσο του προσλαμβανόμενου contrast σύνθετων gratings (Tiippana et al., 1994), όσο και μοτίβων τυχαίου θορύβου (Moulden et. al., 1990) όταν διαιρεθεί με τη μέση φωτεινότητα της εικόνας, μία ακόμα μετρική που έχει προταθεί είναι το band-limited contrast (Peli, 1990). Είναι αποτέλεσμα της προσπάθειας να ληφθεί υπόψη η ένταση ενός σημείου μιας εικόνας και η τοπική μέση φωτεινότητα σε αυτό το σημείο υπολογίζοντας μία ποσότητα που καλείται τοπικό (local) contrast C_L . Αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας τη φωτεινότητα L_b κάθε σημείου μιας band-pass φιλτραρισμένης εκδοχής της εικόνας με τη φωτεινότητα L_l του αντίστοιχου σημείου μιας low-pass φιλτραρισμένης εκδοχής της εικόνας (η διαίρεση με το μηδέν αποφεύγεται, αγνοώντας τα σημεία με μηδενικό παρονομαστή).

$$C_L(x, y) = \frac{L_b(x, y)}{L_l(x, y)}$$

Παράγεται με αυτό τον τρόπο ένας πίνακας με τιμές τοπικού contrast (ίσος σε διαστάσεις με την αρχική εικόνα), η μέση τιμή των οποίων δίνει το band-limited contrast της εικόνας:

$$C_{bl} = \overline{C_L(x, y)}$$

Η σύγκριση των παραπάνω μετρικών σε contrast matching μετρήσεις, με χρήση φυσικών εικόνων ως ερεθίσματα, αυτή τη φορά (Bex and Makous, 2001) έδειξαν πως το προσλαμβανόμενο (apparent) contrast περιγράφεται καλύτερα από τη χρήση του RMS contrast, ενώ δεν φαίνεται να υπάρχει εμφανής σχέση του προσλαμβανόμενου contrast με το band-limited contrast.

Φαίνεται λοιπόν ότι η χρήση του RMS contrast είναι καταλληλότερη τόσο για εικόνες που περιέχουν ευρύ φάσμα συχνοτήτων (broad-band), όσο και για σύνθετα gratings και εικόνες που περιέχουν θόρυβο.

Η χρήση gratings, σαν αυτά που περιεγράψαμε μέχρι τώρα, αποκάλυψαν πολλά από τα χαρακτηριστικά του οπτικού συστήματος. Τέτοια ερεθίσματα όμως συνεχίζουν να απέχουν από τις εικόνες που το οπτικό σύστημα επεξεργάζεται στη καθημερινή ζωή. Ο οπτικός κόσμος απλουστευμένα πολλές φορές χαρακτηρίζεται από τοπικές μεταβολές της φωτεινότητας. Για αυτό και το κύριο χαρακτηριστικό των ερεθισμάτων που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα ήταν ότι παρουσίαζαν διαμόρφωση της φωτεινότητας τους. Παρόλα αυτά στον φυσικό κόσμο διακρίνουμε εύκολα αντικείμενα από το background τους με βάση άλλα χαρακτηριστικά πέραν της αλλαγής στη φωτεινότητα. Στην παρακάτω εικόνα για παράδειγμα οι αναποδογυρισμένες βάρκες ξεχωρίζουν από το background λόγω διαφορών στην φωτεινότητα, αλλά η λεπτή διαμόρφωση βλάστηση διακρίνεται από τη τραχύτερη διαμόρφωση ράμπα από μεταβολές στο contrast και την υφή (texture).

Στα τέλη της δεκαετίας του '80 αναζητηθήκαν ερεθίσματα τα οποία δεν παρουσίαζαν μόνο μεταβολές στη διαμόρφωση της φωτεινότητας αλλά και μεταβολές στη διαμόρφωση του contrast. Τέτοια ερεθίσματα είναι γνωστά ως **δεύτερης-τάξης** (second-order stimuli).

1.3.2 Ερεθίσματα δεύτερης-τάξης (second-order stimuli)

Τα απλά οπτικά ερεθίσματα των οποίων οι ιδιότητες μπορούν να χαρακτηριστούν ως μεταβολές της φωτεινότητας αναφέρονται ως πρώτης-τάξης ερεθίσματα (*first-order stimuli*). Ένα τέτοιο πρώτης-τάξης ερέθισμα είναι ένα ημιτονοειδούς διαμόρφωσης grating (σχήμα 1.15, αριστερά). Σε ένα τέτοιο ερέθισμα, όπως προαναφέρθηκε, η φωτεινότητα διαμορφώνεται σε μια διάσταση και περιγράφεται πλήρως από τον προσανατολισμό του ερεθίσματος, τη χωρική συχνότητα, τη χωρική φάση και το contrast.

Οπτικά ερεθίσματα που παρουσιάζουν μεταβολές σε παραμέτρους του ερεθίσματος, εκτός της φωτεινότητας, όπως το contrast αναφέρονται ως ερεθίσματα δεύτερης-τάξης (second-order stimuli) ή σε άλλες περιπτώσεις ως 'μη-Fourier' (non-Fourier) ερεθίσματα (Chubb and Sperling, 1988, Cavanagh and Mather, 1989). Ένα παράδειγμα τέτοιου ερεθίσματος είναι το contrast-envelope grating του σχήματος 1.15 (δεξιά). Αποτελείται από ένα ημιτονοειδές grating υψηλής χωρικής συχνότητας (carrier), του οποίου το contrast μεταβάλλεται από ένα ημιτονοειδές grating μικρής χωρικής συχνότητας (envelope). Στο παράδειγμα carrier και envelope έχουν τον ίδιο προσανατολισμό αλλά αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο. Να σημειωθεί ότι το envelope-grating δεν καθορίζεται από μεταβολές στη φωτεινότητα, αλλά από μεταβολές στην αλλαγή της φωτεινότητας δηλ. στα δεύτερης τάξης στατιστικά – το ρυθμό μεταβολής, του ρυθμού μεταβολής της φωτεινότητας.

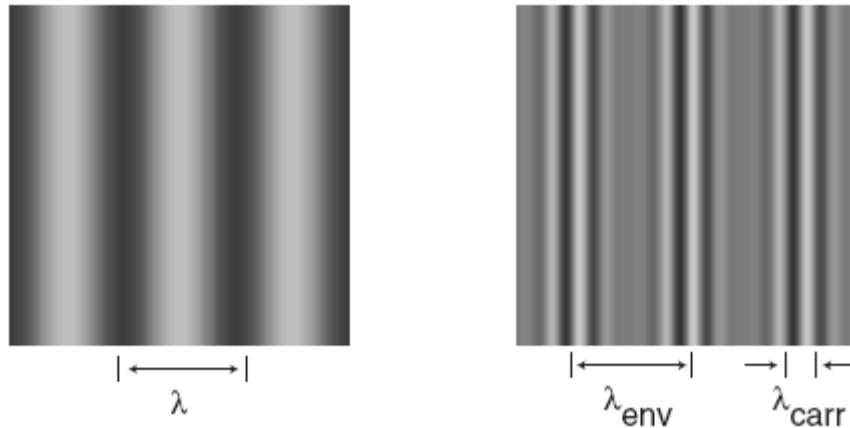


Εικόνα 1.1: Από τις φυσικές σκηνές στα αναλυτικά ερεθίσματα: Αντικείμενα διακρίνονται το ένα από το άλλο από διαφορές στη φωτεινότητα αλλά και από μεταβολές στο contrast και την υφή (texture). (Η φωτογραφία είναι του Goose Cove, από Baker and Mareschal, 2001)

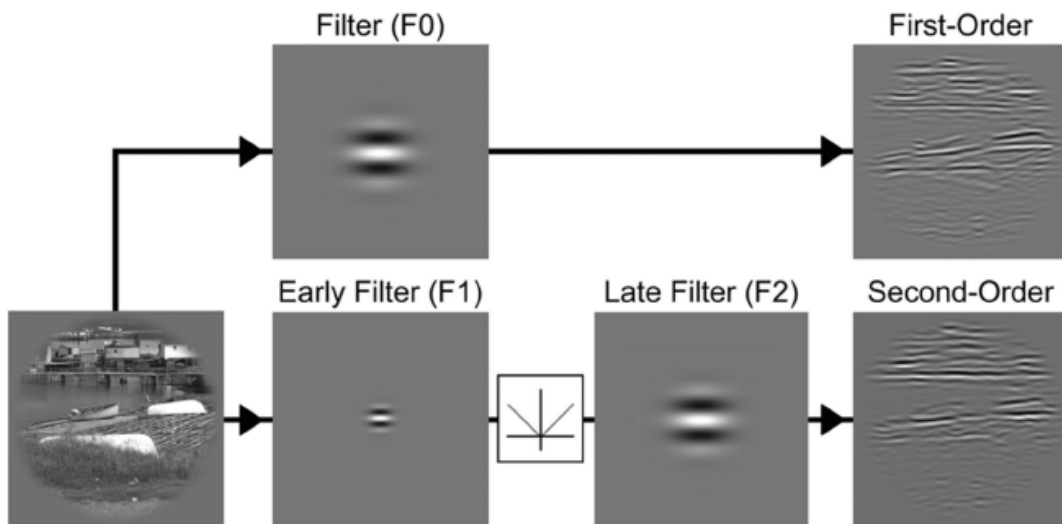
Υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι η επεξεργασία τέτοιων ερεθισμάτων δεύτερης-τάξης πραγματοποιείται από διαφορετικούς μηχανισμούς. Στα πρώτα στάδια της οπτικής επεξεργασίας, πολλοί νευρώνες του οπτικού φλοιού συμπεριφέρονται ως γραμμικά φίλτρα και είναι συντονισμένα σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς και χωρικές συχνότητες όπως προκύπτει από νευροφυσιολογικές (Hubel and Wiesel, 1962; De Valois et al., 1982) και ψυχοφυσικές (Campbell and Robson, 1968; Blakemore and Campbell, 1969) μελέτες. Τα υποδεκτικά πεδία αυτών των νευρώνων έχουν απλό προφίλ που μπορούν να μοντελοποιηθούν με χρήση ενός φίλτρου Gabor (Daugman 1985; Field, 1994; Ringach, 2002). Το σήμα αυτών των φίλτρων μεταβάλλεται όταν μεταβάλλονται οι ιδιότητες έστω και ενός σημείου μιας εικόνας, όπως μεταβολές στη φωτεινότητα ή στο χρώμα (πρώτης-τάξης χαρακτηριστικά).

Τα δεύτερης-τάξης χαρακτηριστικά μιας εικόνας (contrast, texture), των οποίων η ανίχνευση απαιτεί τη σύγκριση ανάμεσα σε δύο τουλάχιστον σημεία της εικόνας, μεταβιβάζονται από μηχανισμούς εξειδικευμένους για την ανάλυση αυτών των χαρακτηριστικών (Ledgeway and Smith, 1984; Sutter et al., 1995, Schofield and Georgeson, 1999). Ενώ λοιπόν οι πρώτης-τάξης πληροφορία μπορεί να εξαχθεί από ένα στάδιο φιλτραρίσματος (σχήμα 1.16 επάνω), τα περισσότερα μοντέλα επεξεργασίας δεύτερης τάξης (Landy and Berger, 1991; Landy and Graham 2003) προτείνουν ένα μοντέλο (σχήμα 1.16 κάτω) όπου αρχικά ένα φίλτρο (bandpass για υψηλές χωρικές συχνότητες) ανιχνεύει τις 'μικρές' λεπτομέρειες (texture, local contrast). Στη συνέχεια παρεμβάλλεται ένα στάδιο μη-γραμμικότητας που αποδιαμορφώνει (demodulates) το φιλτραρισμένο από το πρώτο στάδιο σήμα με σκοπό την ενίσχυση των περιοχών που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις στις αποκρίσεις τους. Τέλος ένα δεύτερο φίλτρο (bandpass για χαμηλές χωρικές

συχνότητες) ανιχνεύει μεγαλύτερης κλίμακας μεταβολές στην υφή (texture), όπως μεταβολές στο contrast, τη χωρική συχνότητα ή τον προσανατολισμό. Το μοντέλο αυτό είναι γνωστό στη βιβλιογραφία ως filter-rectify-filter (FRF) μοντέλο.



Σχήμα 1.15: Ημιτονοειδούς διαμόρφωσης grating (αριστερά) του οποίου ο προσανατολισμός και η χωρική συχνότητα ($1/\lambda$) προσδιορίζονται από μεταβολές στη φωτεινότητα. Contrast envelope grating (δεξιά) που αποτελείται από ένα carrier - grating υψηλής χωρικής συχνότητας ($1/\lambda_{carr}$) και του οποίου το contrast μεταβάλλεται από ένα envelope - grating χαμηλής χωρικής συχνότητας ($1/\lambda_{env}$). Προσανατολισμός και χωρική συχνότητα του envelope είναι χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης, προσδιορίζονται δηλαδή από μεταβολές του contrast και όχι της φωτεινότητας. (Baker and Mareschal, 2001)



Σχήμα 1.16: Παράδειγμα του πρώτης-τάξης (επάνω) μοντέλου και του filter-rectify-filter (FRF) μοντέλου (κάτω). Το μοντέλο πρώτης-τάξης συνελίσσει (convolves) την εικόνα με ένα απλό Gabor (Gaussian) φίλτρο, με σκοπό την ανίχνευση μεταβολών στη φωτεινότητα. Το δεύτερης-τάξης μοντέλο συνελίσσει την εικόνα με ένα υψηλής συχνότητας Gabor φίλτρο (F1), του οποίου η μη-γραμμικά διορθωμένη απόκριση συνελίσσεται με ένα δεύτερο φίλτρο Gabor (F2) το οποίο έχοντας μικρότερη χωρική συχνότητα, ανιχνεύει μεταβολές στην υφή. Το πρώτης-τάξης φιλτράρισμα ανιχνεύει αλλαγές στη φωτεινότητα στο κύτος της βάρκας και την αποβάθρα, ενώ το δεύτερης-

τάξης φιλτράρισμα ανιχνεύει μεταβολές στο contrast και στην υφή στις ίδιες περιοχές. Για αυτό το συνδυασμό φίλτρων οι δύο εικόνες των αποκρίσεων παρουσιάζουν συσχέτιση (correlation) ίση με 0.44, (από Johnson και Baker, 2004).

Για ένα contrast-envelope grating, για παράδειγμα, το πρώτο φίλτρο θα ανίχνευε το carrier ενώ το δεύτερο το envelope. Ένα τέτοιο μοντέλο υποστηρίζεται από νευροφυσιολογικές (Baker and Mareschal, 2001 (review) και ψυχοφυσικές (Kingdom and Keeble, 1991; Graham et al., 1993; Graham and Wolfson, 2001) μελέτες.

Πολλά διαφορετικά ερεθίσματα έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς ανάλογα με τα προς μελέτη χαρακτηριστικά της όρασης. Έτσι έχουν δημιουργηθεί ερεθίσματα που απομονώνουν υψηλότερης τάξης στατιστικά χαρακτηριστικά ή που αποτελούνται από τυχαία κατανεμημένο θόρυβο (fractals). Η χρήση τέτοιων ερεθισμάτων μας έχει αποκαλύψει πολλές από τις ιδιότητες του οπτικού συστήματος.

1.4 Φυσικές σκηνές (Natural Scenes)

Η δημιουργία και η εξέλιξη ενός νευρωνικού συστήματος κατευθύνεται από τρεις βασικούς παράγοντες. (α) Τις λειτουργίες που ένας οργανισμός πρέπει να επιτελέσει, (β) τις υπολογιστικές δυνατότητες και περιορισμούς των νευρώνων και (γ) το περιβάλλον στο οποίο ο οργανισμός ζει. Θεωρητικές μελέτες και μοντέλα νευρωνικής επεξεργασίας έχουν επηρεαστεί περισσότερο από τα δύο πρώτα. Πρόσφατες εξελίξεις σε στατιστικά μοντέλα, σε συνδυασμό με ισχυρά υπολογιστικά εργαλεία, έχουν αυξήσει το ενδιαφέρον για το ρόλο που παίζει το περιβάλλον στο καθορισμό της δομής και της λειτουργίας των νευρώνων και γενικότερα του οπτικού μας συστήματος.

Μια σειρά από μελέτες για το πώς το ανθρώπινο οπτικό σύστημα κωδικοποιεί και διαβιβάζει την αμφιβληστροειδική εικόνα συνηγορεί για το ρόλο των φυσικών εικόνων ως διαμορφωτικού παράγοντα. Κωδικοποιώντας, κατά τη διαδικασία της εξέλιξης, τα πιο σημαντικά ερεθίσματα (τροφή, εχθρούς, συντρόφους) το πιο αποτελεσματικό οπτικό σύστημα θα επιβιώσει. Με βάση αυτή τη θεώρηση, τα στατιστικά χώρο-χρωματικά (spatio-chromatic) χαρακτηριστικά των φυσικών σκηνών θα πρέπει να έχουν καθορίσει τα χαρακτηριστικά των πρωίμων οπτικών οδών, έτσι ώστε να περιοριστεί η διαβίβασή περιττών πληροφοριών και να διαχωριστεί το χρήσιμο σήμα από το θόρυβο. Για τον έλεγχο αυτής της υπόθεσης υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι. Η πιο άμεση προσέγγιση είναι η εξέταση των νευρωνικών αποκρίσεων, όταν το ερέθισμα είναι κάποια φυσική σκηνή. Μια δεύτερη προσέγγιση αποτελεί η μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών των φυσικών εικόνων και η συσχέτιση τους με τις αποκρίσεις των νευρώνων.

Πρώτος ο Barlow (Barlow, 1961, 1972) πρότεινε ότι ο χωρικός συντονισμός των νευρώνων του οπτικού συστήματος, έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποβάλλει περιττές πληροφορίες και να διαχωρίζει το πραγματικό σήμα από το θόρυβο. Τα τελευταία 30 χρόνια έχει διατυπωθεί πληθώρα αποδείξεων που υποδηλώνουν ότι το οπτικό σύστημα έχει βελτιστοποιηθεί στο να μεταδίδει μέγιστη πληροφορία των φυσικών εικόνων ή ερεθισμάτων με

στατιστικά χαρακτηριστικά παρόμοια με εκείνα των φυσικών σκηνών. Αυτή η ιδιαίτερα δημοφιλής παρατήρηση, υποστηρίζεται από μελέτες σχετικά με τα φασματικά χαρακτηριστικά των κωνίων (πχ Regan et al., 2001), τα χωρικά (υποδεκτικά πεδία) χαρακτηριστικά των αμφιβληστροειδικών νευρώνων καθώς και των νευρώνων του οπτικού φλοιού (Atick and Redlich, 1992; van Hateren, 1993; Baddeley et al., 1997; Chatworthy et al., 2003) και ψυχοφυσικές μετρήσεις με χρήση φυσικών εικόνων (Webster and Miyahara, 1997; Webster and Mollon, 1997; Parraga et al., 1998; Parraga et al., 2000).

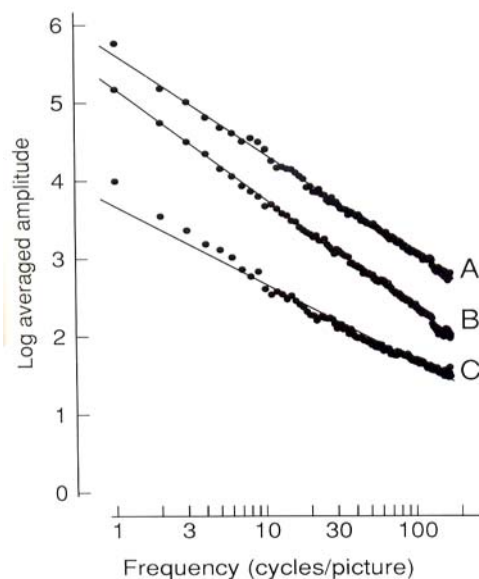
Για να γίνει επομένως συσχέτιση μεταξύ των γνωστών χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος, από νευροφυσιολογικές και ψυχοφυσικές μελέτες με το χωρικό-χρωματικό περιεχόμενο των φυσικών εικόνων είναι απαραίτητη η μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών των εικόνων αυτών.

1.4.1 Στατιστικά χαρακτηριστικά φυσικών οπτικών σκηνών

Προηγούμενες μελέτες των στατιστικών των φυσικών σκηνών έχουν ασχοληθεί κυρίως με το **φασματικό πλάτος (Fourier amplitude)** των σκηνών αυτών (βλ. μετασχηματισμός Fourier, 2.2.3). Έχει αποδειχθεί (Field, 1987; Burton and Moorhead, 1987, Parraga et al., 1998) ότι εικόνες φυσικών σκηνών έχουν παρόμοια δεύτερης τάξης χαρακτηριστικά. Οι χωρικές συχνότητες των φυσικών εικόνων δεν αντιπροσωπεύονται εξ ίσου. Το Fourier amplitude των σκηνών αθροιζόμενο σε όλες τις κατευθύνσεις (orientations) ακολουθεί τον παρακάτω εκθετικό νόμο:

$$\text{Amplitude}(f) \propto f^{-a} ,$$

δηλαδή όταν παρασταθεί γραφικά συναρτήσει της χωρικής συχνότητας, σε λογαριθμικούς άξονες σχεδόν γραμμικά με κλίση a καθώς η χωρική συχνότητα f αυξάνεται (βλ. σχήμα 1.17) .



Σχήμα 1.17: Το Fourier amplitude, τριών φυσικών αχρωματικών εικόνων, συναρτήσει της χωρικής συχνότητας, σχεδιασμένο σε λογαριθμικούς άξονες. Οι κλίσεις, τα a , των τριών ευθειών είναι 1.28, 1.42, 1.00 αντίστοιχα, (Tolhurst et al., 1991).

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές της κλίσης a για μία σειρά από μελέτες αχρωματικών (grayscale) εικόνων. Σε όλες αυτές τις μελέτες λήφθηκαν εικόνες ‘φυσικών σκηνών’ (ο ορισμός ποικίλει, αλλά συνήθως αποκλείστηκαν ‘αστικά περιβάλλοντα’). Αν και οι μελέτες αυτές περιέχουν ευρύ φάσμα μεθοδολογιών όλες παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά την τιμή της κλίσης a .

<i>Μελέτη</i>	<i>Αριθμός εικόνων</i>	<i>a ±SD</i>
Burton and Moorehead ('87)	19	1.05 ± 0.12
Field and Brady ('97)	20	1.10 ± 0.14
Parraga et al. ('98)	29	1.11 ± 0.13
Webster and Miyahara ('97)	48	1.13
Thomson and Foster ('97)	82	1.13
Field ('93)	85	1.10
Van Hateren ('92)	117	1.06 ± 0.18
Tolhurst et al. ('92)	135	1.20 ± 0.13
Schaaf and Van Hateren ('96)	276	0.94 ± 0.21
Dong and Attick ('95)	320	1.15
Σταθμισμένη μέση τιμή	1176	1.08

Πίνακας 1.1: Δεύτερης τάξης (f^{-a}) στατιστικά, δειγμάτων φυσικών εικόνων.

Γενικά στην βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί τιμές για την κλίση a σε φυσικές εικόνες μεταξύ 0.7 και 1.6. Η τιμή της κλίσης a αυτή υποστηρίζεται πως έχει μεγάλη σημασία για τον τρόπο που το ανθρώπινο οπτικό σύστημα εξελίχθηκε, αφού μπορεί και επεξεργάζεται βέλτιστα χωρικές πληροφορίες φυσικών σκηνών, στις οποίες η κλίση a έχει τη συγκεκριμένη τιμή (Parraga et al., 2000) και υπάρχουν θεωρητικοί λόγοι γιατί θα πρέπει να υπάρχει ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή της κλίσης a και στα προφίλ των υποδεκτικών πεδίων του οπτικού φλοιού (Field, 1987). Ουσιαστικά μία σχέση ανάμεσα στο περιεχόμενο μιας σκηνής και στην απόκριση του οπτικού συστήματος θα μεγιστοποιούσε το λόγο του σήματος προς το θόρυβο.

Παρόλα αυτά η συνάρτηση ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (CSF) με μια πρώτη ματιά δεν φαίνεται να είναι συμβατή με τον εκθετικό νόμο των φυσικών εικόνων. Η μορφή της CSF (band-pass) δηλώνει ότι το οπτικό σύστημα είναι πιο ευαίσθητο στις μεσαίες χωρικές συχνότητες, ενώ ο εκθετικός νόμος των φυσικών εικόνων δηλώνει ότι οι χαμηλές χωρικές συχνότητες περιέχουν περισσότερη ενέργεια, είναι δηλαδή πιο ‘σημαντικές’ για το σχηματισμό της φυσικής σκηνής. Όπως τόνισε ο Atick (Atick, 1992) μια CSF συμβατή με τον f^{-a} νόμο θα μετέδιδε πολύ θόρυβο. Σε αντίθεση πρότεινε ένα μοντέλο όπου προέβλεπε ένα αρχικό στάδιο καταστολής του θορύβου και έτσι καταλήγει σε μία αναγνωρίσιμη μορφή CSF. Παρόλα αυτά υιοθέτησε ένα μοντέλο ‘γραμμικού’ απλού νευρωνικού κυττάρου (simple-cell) του πρωτοταγούς οπτικού φλοιού V1, ενώ υπάρχουν ενδείξεις τα κύτταρα αυτά επιτελούν πιο πολύπλοκη, μη-γραμμική επεξεργασία (Koch, 1997). Περαιτέρω ανάλυση

(π.χ. με μετρήσεις των στατιστικών συσχέτισης (correlation statistics) (βλ. Billock, 1999), ίσως ρίξει περισσότερο φως στα παραπάνω.

Η χρήση φυσικών σκηνών για τη διενέργεια ψυχοφυσικών μελετών παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, καθώς πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά μιας φυσικής σκηνής, που δεν είναι πάντα εφικτό να απομονωθούν, (φωτεινότητα, τοπικό (local) contrast, χρωματικότητα, σκιές, ακμές (edges) κ) είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος. Παρά τις προαναφερθείσες δυσκολίες η χρήση των φυσικών σκηνών για τη διενέργεια ψυχοφυσικών μετρήσεων καθώς και η μελέτη των στατιστικών τους ιδιοτήτων είναι εξαιρετικά διαδεδομένα τα τελευταία χρόνια και σίγουρα αποτελεί το μέτρο για την αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφορά, σε όσο το δυνατόν, πραγματικές συνθήκες.

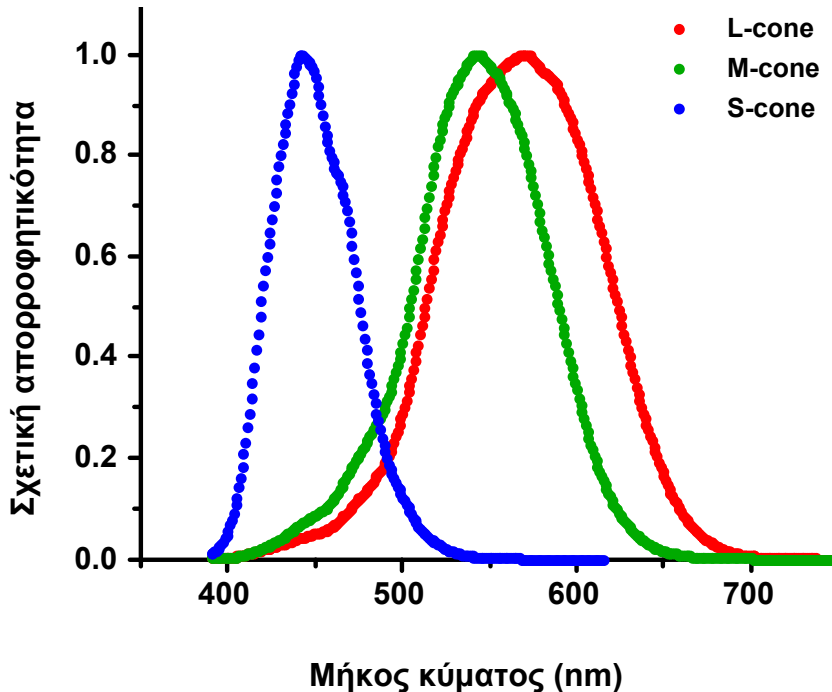
Τα ερεθίσματα στα οποία έγινε αναφορά μέχρι τώρα ήταν μονοχρωματικά αλλά ο οπτικός κόσμος είναι πολυχρωματικός. Για αυτό στη συνέχεια θα γίνει μια εισαγωγή στην έγχρωμη όραση καθώς και στα στατιστικά χαρακτηριστικά έγχρωμων φυσικών εικόνων.

1.4.2 Έγχρωμη όραση

Η **τριχρωματική θεωρία**, η οποία αποτελεί τη βάση της έγχρωμης όρασης, προτάθηκε από τον Thomas Young το 1802. Πρότεινε ότι για την επίτευξη οποιασδήποτε απόχρωσης απαιτείται προσθετική ανάμιξη τριών βασικών χρωμάτων. Αυτά τα τρία βασικά χρώματα είναι το **κόκκινο**, το **πράσινο** και το **μπλε**. Η αυτή θεωρία αναβίωσε αργότερα από τον Helmholtz (1852), ο οποίος διαπίστωσε ότι υπάρχουν τρεις τύποι φυσιολογικών «μηχανισμών» υπεύθυνοι για την αντίληψη όλων των χρωμάτων.

Είναι σήμερα γνωστό ότι αυτούς οι τρεις αυτοί μηχανισμοί αποτελούνται από τρεις τύποι κωνίων που βρίσκονται στον αμφιβληστροειδή των ανώτερων θηλαστικών, οι οποίοι αποκρίνονται κατά προτίμηση σε διαφορετικά μήκη κύματος. Ο κάθε τύπος κωνίων περιέχει μια οπτική χρωστική (φωτοχρωστική), ευαίσθητη σε διαφορετικό τμήμα του χρωματικού φάσματος, από όπου προκύπτει και η ονομασία τους: τα **S-κωνία** ευαίσθητα σε φωτόνια μικρού μήκους κύματος- short wavelength), τα **M-κωνία** (ευαίσθητα σε φωτόνια μεσαίου μήκους κύματος - medium wavelength) και τα **L-κωνία** (ευαίσθητα σε φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος - long wavelength). Οι χρωστικές των κωνίων αποτελούνται από μια πρωτεΐνη, την οψίνη και μια φωτοευαίσθητη ουσία, την ρετινάλη. Καθεμία από τις τρεις χρωστικές των κωνίων περιέχει διαφορετική οψίνη. Στο σχήμα παρουσιάζονται οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας των τριών φωτοχρωστικών, οι οποίες καθορίζουν την πιθανότητα απορρόφησης ενός φωτονίου ως συνάρτηση του μήκους κύματος του. Από την στιγμή που απορροφηθούν κάποια φωτόνια (και μετατραπούν μέσω μιας σύνθετης φωτοχημικής αντίδρασης σε ηλεκτρική απόκριση), η απόκριση του κωνίου εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των φωτονίων που απορροφήθηκαν και όχι από το μήκος κύματος των απορροφημένων φωτονίων: μια αρχή γνωστή ως **univariance** (Rushton, 1972). Αυτό συνεπάγεται ότι, μια αύξηση του αριθμού των φωτονίων είναι πιθανόν να προκληθεί είτε από αύξηση της έντασης του φωτεινού

ερεθίσματος, είτε από αλλαγή του μήκους κύματος, είτε και από τα δύο (π.χ. αύξηση της απόκρισης ενός L-κωνίου σημαίνει ότι το μήκος κύματος του φωτεινού ερεθίσματος πλησίασε την «κορυφή» του φάσματος απορρόφησης του L-κωνίου ή ότι το ερέθισμα αυξήθηκε σε φωτεινότητα ή και τα δύο).



Σχήμα 1.18: Φασματικές καμπύλες ευαισθησίας των τριών φωτοχρωστικών όπως μετρήθηκαν από τους Stockman και Sharpe (2000). Φωτόνια διαφορετικού μήκους κύματος παρουσιάζουν διαφορετικές πιθανότητες να απορροφηθούν από τις τρεις κατηγορίες κωνίων. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα φάσματα απορρόφησης παρουσιάζουν μεγάλο εύρος (οι καμπύλες των L- και M- κωνίων εκτείνονται σε όλο το ορατό φάσμα), ενώ τα L-κωνία παρουσιάζουν μέγιστη απορροφητικότητα σε μήκη κύματος που «φαίνονται» κίτρινα. Για αυτό προτείνεται να αποφεύγεται η κατηγοριοποίηση των κωνίων ως μπλε, πράσινα και κόκκινα.

Τα ηλεκτρικά σήματα (που σχετίζονται με την έγχρωμη όραση) μεταδίδονται από τους τρεις τύπους κωνίων στις στιβάδες των αμφιβληστροειδικών κυττάρων, στα οριζόντια και στα γαγγλιακά κύτταρα, τα οποία στη συνέχεια μεταφέρουν τις πληροφορίες μέσω του οπτικού νεύρου στον έξω γονατώδη πυρήνα (LGN) και στον οπτικό φλοιό. Πρώτος ο Hering, το 1878, πρότεινε ότι, μετά από το στάδιο επεξεργασίας του χρώματος στους φωτοϋποδοχείς, υπάρχει ένα δεύτερο στάδιο χρωματικής επεξεργασίας στο οποίο οι αποκρίσεις των κωνίων συνδυάζονται ('κωδικοποιώντας' το άθροισμά ή την διαφορά τους). Αυτή η θεωρία έγινε γνωστή ως **color opponent theory (θεωρία χρωματικής ανταγωνιστικότητας)** και βασίζεται στον ανταγωνισμό που παρουσιάζεται στην αντίληψη μεταξύ κόκκινου-πράσινου, και μπλε-κίτρινου χρώματος. Οι DeValois et al. (1966) ήταν οι πρώτοι που περιέγραψαν κύτταρα στην οπτική οδό ανώτερων θηλαστικών, τα οποία, για παράδειγμα, «αναστέλλονταν» από το κόκκινο και «διεγείρονταν» από το πράσινο φως. Ηλεκτροφυσιολογικές και ψυχοφυσικές μελέτες αργότερα επιβεβαίωσαν τις αρχικές παρατηρήσεις.

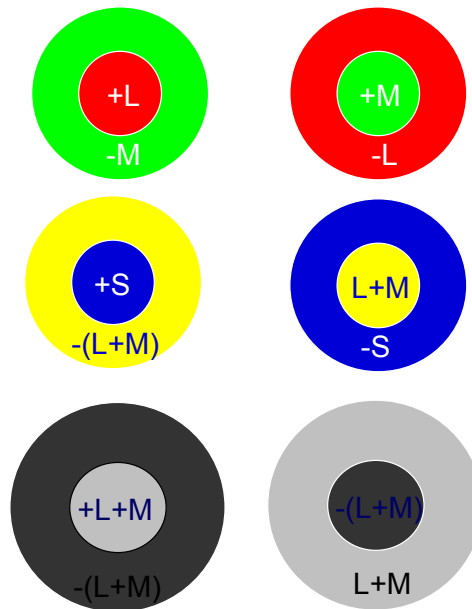
Στον άνθρωπο και τα άλλα ανώτερα θηλαστικά έχουν διαπιστωθεί τρεις διαφορετικές (και κατά κάποιον τρόπο παράλληλοι) οδοί, που μεταβιβάζουν τις οπτικές πληροφορίες από τον αμφιβληστροειδή στο φλοιό μέσω του οπτικού νεύρου. Η κωδικοποίηση στο οπτικό νεύρο είναι πολύ αποτελεσματική, κυρίως επειδή τα ηλεκτρικά σήματα που μεταφέρονται στις οδούς είναι καλά διαχωρισμένα το ένα από το άλλο, όχι μόνο στις φυσιολογικές (και κατ' επέκταση χρωματικές) ιδιότητές τους αλλά επίσης στο ανατομικό υπόστρωμά τους, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν τρεις κατηγορίες αμφιβληστροειδικών γαγγλιακών κυττάρων:

- Μία πρώτη κατηγορία μεγάλων σε μέγεθος γαγγλιακών κυττάρων με χονδρούς νευρίτες, που ονομάζονται **parasol κύτταρα**, οι νευροάξονες των οποίων προβάλλουν στις 2 κατώτερες στιβάδες του έξω γονατώδη πυρήνα (LGN), τις μεγαλοκυτταρικές (Magnocellular, MC) στιβάδες. Αυτά τα κύτταρα αποτελούν περίπου το 10% του συνολικού πληθυσμού των γαγγλιακών κυττάρων και μεταφέρουν κυρίως πληροφορίες για την αντίθεση φωτεινότητας (διάκριση φωτός από το σκοτάδι) αθροίζοντας τις αποκρίσεις των L- και M-κωνίων, με τον εξής τρόπο: τα υποδεκτικά πεδία των MC (αλλά και των parasol) κυττάρων αποτελούνται από τις ανταγωνιστικές περιοχές τους (το κέντρο και την περιφέρεια). Η κεντρική περιοχή ενός γάγγλιου φωτεινού κέντρου (ON-center), η οποία αποκαλείται **+(L+M)**, διεγείρεται από τις αθροιστικές αποκρίσεις των L και M κωνίων. Η περιφέρειά του, που αποκαλείται **-(L+M)**, αναστέλλεται από τις αποκρίσεις των L και M κωνίων (βλ. σχήμα). Σε αντίθεση, ένα γάγγλιο σκοτεινού κέντρου (OFF-center), αναστέλλεται **[-(L+M)]** στο κέντρο του και διεγείρεται **+[L+M]** στην περιφέρειά του. Τα κύτταρα MC έχουν υψηλή ευαισθησία στην αντίθεση φωτεινότητας αλλά παρουσιάζουν μηδαμινή χρωματική επιλεκτικότητα.

- Μία δεύτερη κατηγορία μικρών γαγγλιακών κυττάρων με λεπτούς νευρίτες, που ονομάζονται **midget κύτταρα**, τα οποία προβάλλουν στις μικροκυτταρικές (Parvocellular, PC) στιβάδες του LGN. Αυτά τα κύτταρα είναι πολυάριθμα (αποτελούν περίπου το 80% του συνόλου των γαγγλιακών κυττάρων) και ειδικά στο κέντρο της ωχράς (όπου υπάρχει μεγάλη ευκρίνεια) η κεντρική περιοχή του υποδεκτικού τους πεδίου σχηματίζεται από ένα L ή ένα M κωνίο. Η δομή των υποδεκτικών τους πεδίων είναι ανταγωνιστική, δηλαδή η περιφέρειά τους αποτελείται από ανταγωνιστικά κωνία. Ως αποτέλεσμα έχουμε δύο υποκατηγορίες, τα **+L-M** και τα **-L+M**, τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες για τον κόκκινο-πράσινο χρωματικό ανταγωνισμό, συγκρίνοντας την δραστηριότητα των L και M κωνίων. Εντούτοις, έχουν χαμηλή ευαισθησία στην αντίθεση φωτεινότητα σε σχέση με τα parasol / MC κύτταρα.

- Μία τρίτη κατηγορία εξειδικευμένων γαγγλιακών κυττάρων, των **small bistratified** κυττάρων τα οποία ανακαλύφθηκαν πρόσφατα, και αποτελούν μια ξεχωριστή οδό προβάλλοντας στις λεπτές koniocellular (KC) στιβάδες στο LGN (οι οποίες βρίσκονται ανάμεσα από τις στιβάδες PC, στις **μεσοπετάλιες ζώνες**). Η κεντρική περιοχή των υποδεκτικών τους πεδίων διεγείρεται από τις αποκρίσεις των S κωνίων ενώ η περιφέρεια αναστέλλεται από συνδυαστικές αποκρίσεις των L και M κωνίων **+[S-(L+M)]** οι οποίες μεταφέρονται στα **small**

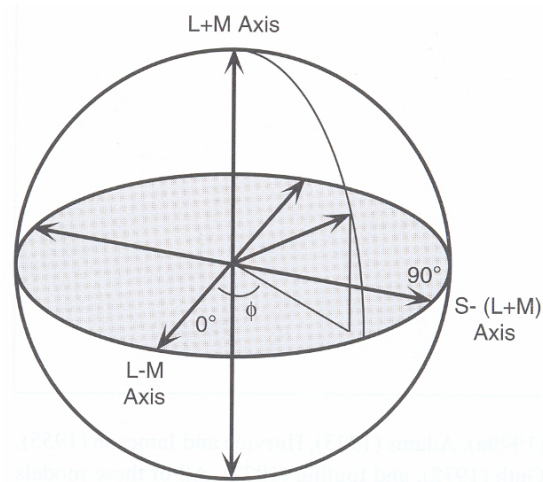
bistratified κύτταρα μέσω των διπλών και ίσως των οριζόντιων κυττάρων. Ως αποτέλεσμα τα S-κωνία μεταφέρουν πληροφορίες σχετικές με τον κίτρινο-μπλε χρωματικό ανταγωνισμό, ενώ παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ευαισθησία στην αντίθεση φωτεινότητας. Να σημειωθεί ότι δεν έχει βρεθεί ακόμη κάποιο κύτταρο στην στιβάδα των γάγγλιων που να παρουσιάζει δομή υποδεκτικού πεδίου $-S+(L+M)$.



Σχήμα 1.19: Υποδεκτικά πεδία των τριών τύπων γαγγλιακών κυττάρων: (επάνω) midget κύτταρα «κόκκινου» (+L-M) και «πράσινου» (+M-L) κέντρου (μέση) small bistratified κύτταρα «μπλέ» [+S(-(L+M))] και «κίτρινου» (αυτά τα κύτταρα δεν έχουν εντοπιστεί ακόμη) κέντρου και (κάτω) parasol κύτταρα φωτεινού (+L+M) και σκοτεινού [-(L+M)] κέντρου.

Οι Wyszecki και Stiles (1982) πρότειναν μία σειρά από νευρωνικά μοντέλα, βασισμένοι στην ιδέα ότι η τριχρωματικότητα στο αρχικό στάδιο των φωτουποδοχέων, συνδυάζεται με μηχανισμούς τέτοιους, που κωδικοποιούν τα σήματα των φωτουποδοχέων, σε δύο σήματα που μεταφέρουν τη χρωματική πληροφορία και σε ένα που μεταφέρει την αχρωματική. Όλα αυτά τα μοντέλα μοιάζουν στο ότι αποδίδουν αλγεβρικά βάρη στα σήματα των L-, M- και S- κωνίων, ώστε να προκύψουν τρεις ορθογώνιοι δευτέρης-, και σε κάποιες περιπτώσεις, υψηλότερης, τάξης μηχανισμοί.

Το χρωματικό διάγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση ψυχοφυσικών (Krauskopf et al., 1982) και ηλεκτροφυσιολογικών (Derrington et al., 1984) μελετών παριστάνεται στο σχήμα 1.20. Το διάγραμμα αυτό αποτελεί επέκταση στις τρεις διαστάσεις του χρωματικού διαγράμματος που πρότειναν οι MacLeod και Boyton (1979). Είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να αναπαριστά μετρήσεις στις οποίες ο εξεταζόμενος προσαρμόζεται σε ίσης-ενέργειας λευκό φόντο, το οποίο αντιστοιχεί στην αρχή των αξόνων. Οι άξονες εκφράζουν τα βάρη τα οποία αποδίδονται στα κωνία από τους μηχανισμούς που αποκρίνονται μοναδικά κατά μήκος κάθε άξονα. Έτσι οι άξονες είναι οι L-

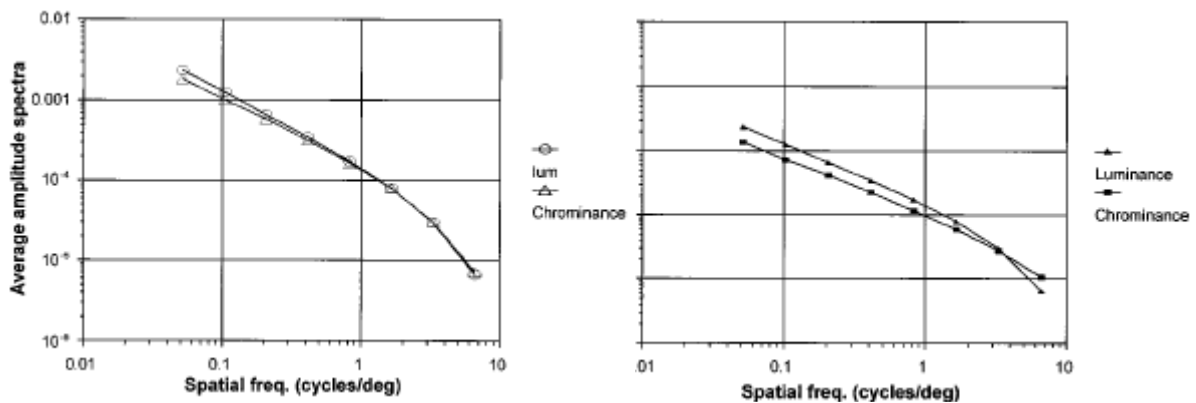


Σχήμα 1.20: Χρωματικό διάγραμμα

M, S-(L+M) και L+M. Ο L+M άξονας ονομάζεται και 'άξονας της φωτεινότητας', επειδή ο μηχανισμός ο οποίος αναφέρει αλλαγές της φωτεινότητας, αποτελεί το άθροισμα των αποκρίσεων των L- και M-κωνίων.

1.4.3 Χρωματικό περιεχόμενο φυσικών εικόνων

Όσον αφορά το χρωματικό περιεχόμενο των φυσικών σκηνών έχει αποδειχθεί ότι ισχύει ο ίδιος εκθετικός νόμος (Parraga et al., 1998, 2002) με τις αχρωματικές εικόνες. Στις μελέτες αυτές υπολογίστηκαν θεωρητικά οι αποκρίσεις L, M και S κωνίων με χρήση των συναρτήσεων απορρόφησης των κωνίων όπως υπολογίστηκαν από τους Smith και Pokorny (1975) και παρουσιάζονται στο Παράρτημα II.



Σχήμα 1.21: Fourier amplitude για τη φωτεινότητα και τη χρωματικότητα 29 εικόνων με χρήση του γραμμικού (αριστερά) και του μη-γραμμικού (δεξιά) ορισμού για την εκτίμηση της χρωματικότητας (από Parraga et al., 1998).

Η φωτεινότητα (luminance) μιας σκηνής, υπολογίστηκε αθροίζοντας τις αποκρίσεις των L και M κωνίων, **L+M**. Οι αποκρίσεις του χρωματικού (κόκκινο-πράσινου) καναλιού υπολογίστηκε με δύο τρόπους. Με τον κλασικό

γραμμικό ορισμό **L-M** και με τον μη-γραμμικό **(L-M)/(L+M)**. Η χρήση του μη-γραμμικού ορισμού παρουσιάζει δύο πλεονεκτήματα. Πρώτον από καταγραφές των απλών νευρωνικών κυττάρων (simple-sells) του πρωτοταγούς οπτικού φλοιού V1, φαίνεται πως τα απλά αυτά κύτταρα μπορούν να υπολογίζουν πολύπλοκους, μη-γραμμικούς συνδυασμούς των εισόδων τους (Koch, 1997). Δεύτερον ο μη-γραμμικός ορισμός αναπαριστά έγχρωμα αντικείμενα με τρόπο τέτοιο που να μην επηρεάζεται από τις σκιές που υπάρχουν στις φυσικές σκηνές.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 1.21. Το Fourier amplitude του χρωματικού καναλιού παρουσιάζει παρόμοια μορφή με αυτού της φωτεινότητας και για τους δύο ορισμούς, όπως και οι τιμές της κλίσης a . Αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.

Κλίση a	Γραμμικός ορισμός χρωματικότητας	Μη-γραμμικός ορισμός χρωματικότητας
Φωτεινότητα	1.11 ± 0.13	1.11 ± 0.13
Χρωματικότητα	1.06 ± 0.11	0.94 ± 0.12

Πίνακας 1.2: Μέσες τιμές της κλίσης a για τη φωτεινότητα και τη χρωματικότητα με χρήση των δύο ορισμών χρωματικότητας.

1.5. Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο σκέλη. Σκοπός του πρώτου είναι η βαθμονόμηση μιας ψηφιακής μηχανής (Nikon Coolpix 5700), σύμφωνα με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε από τους C. Alejandro Parraga και Tom Troscianko στο Τμήμα Πειραματικής Ψυχολογίας του Πανεπιστημίου του Bristol. Στόχο της βαθμονόμησης αποτελεί η αφαίρεση της συνάρτησης γάμμα (gamma function), ώστε η ψηφιακή εικόνα που λαμβάνεται να αποτελεί γραμμικό ανάλογο της φυσικής σκηνής. Η γραμμικοποίηση των ψηφιακών φυσικών εικόνων επιτρέπει στη συνέχεια την ανάλυση των στατιστικών χαρακτηριστικών τους και τη διενέργεια ψυχοφυσικών μετρήσεων, χρησιμοποιώντας τες ως ερεθίσματα. Το επόμενο βήμα όσον αφορά τη μελέτη των φυσικών εικόνων αποτελεί η στατιστική ανάλυση των χωρικό-χρωματικών χαρακτηριστικών τους, με χρήση του μετασχηματισμού Fourier και του υπολογιστικού πακέτου MATLAB. Επειδή η σημασία του τοπικού (local) contrast είναι σημαντική τόσο για τα σύνθετα τεχνητά ερεθίσματα (compound gratings) όσο και για τις ακόμα πιο σύνθετες φυσικές εικόνες, αναζητήθηκε μία μετρική τοπικού contrast, αρχικά για σύνθετα gratings και στη συνέχεια για τις φυσικές εικόνες, η οποία να σχετίζεται με τον τρόπο ανίχνευσης και κωδικοποίησης του contrast από το οπτικό σύστημα. Όσον αφορά τα χρωματικά χαρακτηριστικά των φυσικών εικόνων, με χρήση των καμπύλων φασματικής ευαισθησίας των κωνίων, κατά τους Smith και Pokorny (1975), υπολογίστηκαν, η θεωρητική απόκριση των κωνίων για τις εικόνες αυτές και επιβεβαιώθηκε ο ίδιος εκθετικός νόμος για πλήθος χρωματικών συνθηκών. Η πρόοδος που επετεύχθη στα παραπάνω, επιτρέπει την διεξαγωγή πρωτοποριακής έρευνας στο μέλλον, σχετικά με τις αποκρίσεις του

οπτικού συστήματος σε διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας, καθώς και την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του οδικού 'οπτικού περιβάλλοντος'.

Το δεύτερο σκέλος της εργασίας αφορά τη διενέργεια ψυχοφυσικών μετρήσεων για μία σειρά απλών και σύνθετων gratings. Πιο συγκεκριμένα θα μετρηθεί η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) για απλά και σύνθετα gratings και για διαφορετικούς προσανατολισμούς. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς κοντά στο threshold. Στη συνέχεια, για τα ίδια ερεθίσματα, θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις απλών οπτικών χρόνων αντίδρασης (RTs), για διαφορετικούς προσανατολισμούς. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς σε contrasts υψηλότερα του threshold (suprathreshold). Τα σύνθετα gratings που θα χρησιμοποιηθούν, δημιουργήθηκαν με τρόπο τέτοιο ώστε να έχουν το ίδιο Michelson contrast με τα απλά gratings, αλλά το τοπικό contrast τους ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερο. Στόχος των παραπάνω μετρήσεων είναι η εύρεση μίας μετρικής για την περιγραφή του τοπικού contrast των σύνθετων gratings, η οποία να περιγράφει ικανοποιητικά τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος, αλλά και η καταγραφή της ευαισθησίας προσανατολισμού των νευρώνων του οπτικού συστήματος, τόσο κοντά στο threshold αλλά και πάνω από αυτό. Αυτό θα δώσει περισσότερες απαντήσεις σχετικά με το πώς το contrast των φυσικών εικόνων επηρεάζει την αντίληψη τους.

2. ΧΩΡΙΚΟ-ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Η χρήση των φυσικών εικόνων για τη διεξαγωγή ψυχοφυσικών μετρήσεων, καθώς και η μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών τους, απαιτεί προεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής με την οποία λαμβάνονται οι εικόνες και την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων αυτών, διαδικασία γνωστή ως *image processing*.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύχθηκε μια τυποποιημένη και εξειδικευμένη μέθοδος, καθώς και υπολογιστικοί αλγόριθμοι για την ανάλυση των οπτικών χαρακτηριστικών σύνθετων φυσικών εικόνων. Η επεξεργασία των εικόνων και η ανάλυση των χωρικών και χρωματικών χαρακτηριστικών τους καθίσταται δυνατή με τη βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.

2.2 Μεθοδολογία

2.2.1 Ψηφιακή αναπαράσταση εικόνων

Όσο αφορά την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων, μία εικόνα μπορεί να παρασταθεί ως μια δυσδιάστατη συνάρτηση $f(x, y)$ ή ένας δυσδιάστατος πίνακας, όπου x, y είναι χωρικές συντεταγμένες, ενώ η τιμή της f σε ένα ζεύγος συντεταγμένων (x, y) ονομάζεται ένταση (*intensity*) και αντιστοιχεί στην ένταση της φωτεινότητας σε αυτό το σημείο. Ένα ζεύγος συντεταγμένων x, y αντιστοιχεί στη θέση ενός στοιχείου του πίνακα. Η θέση αυτή ονομάζεται *pixel*. Ο όρος *διαβάθμιση του γκρι* (*grey level*) περιγράφει την ένταση μονοχρωματικών εικόνων. Για παράδειγμα μία μονοχρωματική εικόνα 8-bit περιέχει 256 διαβαθμίσεις του γκρι (από 0 μέχρι 255). Μια χρωματική εικόνα από την άλλη, αποτελεί συνδυασμό ξεχωριστών δυσδιάστατων εικόνων. Για παράδειγμα στο RGB χρωματικό σύστημα, μια έγχρωμη εικόνα αποτελείται από τρεις (κόκκινη, πράσινη και μπλε) ξεχωριστές εικόνες, και επομένως οι τιμές της φωτεινότητας αποθηκεύονται σε τρεις δυσδιάστατους πίνακες .

2.2.2 Βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής

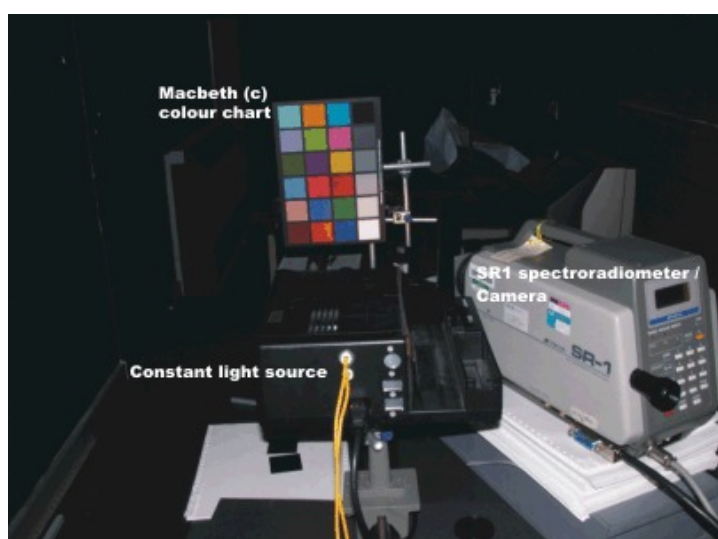
Η βαθμονόμηση έχει ως σκοπό την εκτίμηση και στη συνέχεια την αφαίρεση της συνάρτησης γάμμα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής, έτσι ώστε η συσχέτιση των αποκρίσεων των αισθητήρων της κάμερας, με την εισερχόμενη φωτεινότητα να είναι γραμμική. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για τη διενέργεια ψυχοφυσικών μετρήσεων, αφού οι τιμές της φωτεινότητας της εικόνας η οποία προβάλλεται ως ερέθισμα πρέπει να αποτελούν γραμμικό ανάλογο των τιμών της φωτεινότητας της εξωτερικής σκηνής, όσο και για την ανάλυση των στατιστικών χαρακτηριστικών των εικόνων, αφού επιτρέπει την αξιόπιστη ανάλυση των χωρικών και χρωματικών ιδιοτήτων τους.

Η μέθοδος βαθμονόμησης της ψηφιακής μηχανής αναπτύχθηκε στο τμήμα Πειραματικής Ψυχολογίας του Πανεπιστημίου του Bristol, από τους C. Alejandro Parraga και Tom Troscianko (2003). Η συνάρτηση που συσχετίζει

τις αποκρίσεις καθενός από τους RGB αισθητήρες της κάμερας με την εισερχόμενη φωτεινότητα (συνάρτηση γάμμα) δεν είναι γραμμική. Σκοπός της βαθμονόμησης είναι η εκτίμηση της συνάρτησης γάμμα (gamma function) και η αφαίρεση της. Η βαθμονόμηση έγινε για την ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Nikon Coolpix 5700. Οι ρυθμίσεις της κάμερας φαίνονται στο Παράρτημα III.

2.2.2.1 Εκτίμηση της συνάρτησης γάμμα

Η διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης γάμμα έχει ως εξής. Μία συνεχής πηγή φωτός (Tugstent-holgen lamp (Osram HLX 64657FGX-24V,250W)) συνδεδεμένη σε σταθεροποιητή τάσης (DC power supply, type SP020-Vinculum products), φωτίζει έναν έγχρωμο πίνακα Macbeth (Macbeth (c) chart-Kollmorgen Instruments Corporation), που αποτελείται από 24 τετράγωνα διαφορετικής ανακλαστικότητας, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο της δέσμης φωτός. Ένα σπεκτροραδιόμετρο (ΣΡ), (Topcon Model SR1, το εύρος της φασματικής ακτινοβολίας είναι μεταξύ 380-760nm) στοχεύει στο κέντρο καθενός από τα γκρι τετράγωνα του πίνακα και μετρά τη φωτεινότητα του (βλ. εικόνα 2.1). Η απόσταση του ΣΡ από τον πίνακα είναι τέτοια ώστε η μέτρηση να λαμβάνεται από το κέντρο κάθε τετραγώνου, χωρίς να περιλαμβάνονται οι γωνίες του (στην περίπτωση που το ΣΡ έχει δύο μεγέθη διαφραγμάτων χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο, που στην περίπτωση μας ήταν 2°).

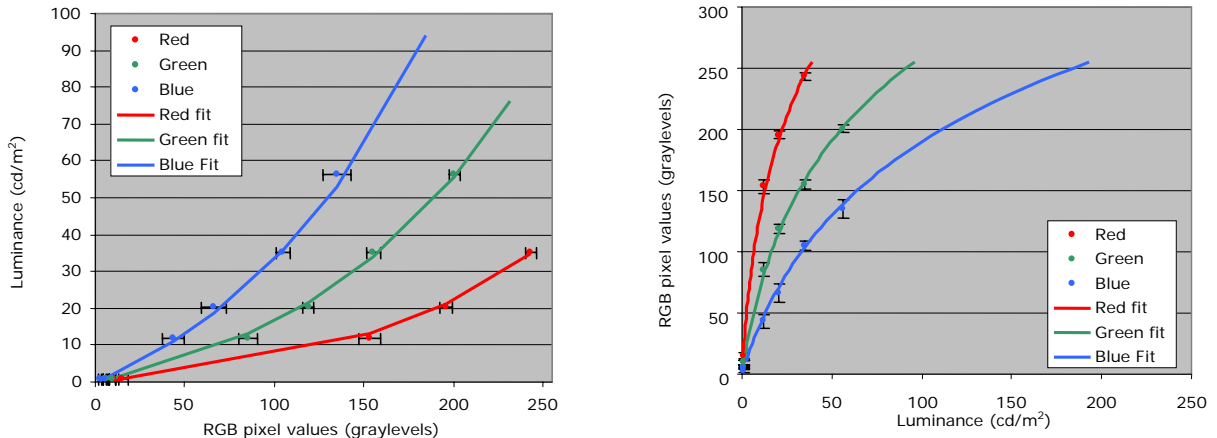


Εικόνα 2.1: Εξοπλισμός για τη μέτρηση της συνάρτησης γάμμα της κάμερας. Σκοτεινό δωμάτιο, Τμήμα Πειραματικής Ψυχολογίας, Πανεπιστήμιο του Bristol.

Στη συνέχεια το ΣΡ αντικαθίσταται από τη κάμερα, έτσι ώστε η θέση των εστιακών τους σημείων να ταυτίζονται και λαμβάνεται φωτογραφία καθενός από τα γκρι τετράγωνα του πίνακα. Η κάμερα ρυθμίζεται στη μέγιστη μεγέθυνση (maximum zoom, $f = 7.4$) και οι εικόνες λαμβάνονται για διάφορους χρόνους έκθεσης (integration times, $IT=4,2,1,1/2,1/4$)². Αυτό που θα πρέπει να προσεχθεί είναι τα τετράγωνα του πίνακα να βρίσκονται στο κέντρο της εικόνας ώστε να αποφευχθούν παραμορφώσεις λόγω εκτροπών από την

² Στην περίπτωση μας λήφθηκαν μετρήσεις φωτεινότητας με το ΣΡ για όλα τα τετράγωνα του πίνακα και φωτογραφήθηκε ολόκληρος ο πίνακας με $IT_s=1/2,1/4$.

περιφέρεια της κάμερας. Επιλέγεται το κεντρικό τμήμα (~10x10 pixels) κάθε φωτογραφημένου τετραγώνου και υπολογίζεται η μέση τιμή (και η τυπική απόκλιση) για καθεμία από τις R,G,B τιμές φωτεινότητας. Το μέγεθος του κεντρικού τμήματος επιλέγεται ώστε να αντιστοιχεί στη διάμετρο του διαφράγματος του ΣΡ. Οι τιμές για τις R,G,B αποκρίσεις παριστάνονται γραφικά (βλ. σχήμα 2.1) συναρτήσεως της φωτεινότητας.



Σχήμα 2.1: Οι συναρτήσεις γάμμα για τους RGB αισθητήρες της κάμερας. Η φωτεινότητα συναρτήσεως των RGB τιμών (αριστερά) και οι τιμές RGB συναρτήσεως της φωτεινότητας (δεξιά).

Όταν η φωτεινότητα L παρασταθεί γραφικά συναρτήσεως των RGB τιμών s (σχήμα 2.1, αριστερά), τα σημεία παρεμβάλλονται από μια συνάρτηση γάμμα:

$$L = a(b^s + 1), \text{ (Εξ. 2.1)}$$

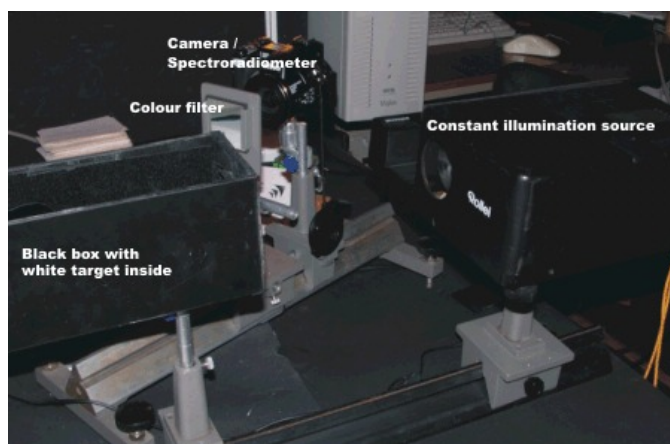
όπου a , b ελεύθερες παράμετροι. Το a αποτελεί εκτίμηση της κλίσης ή του gain της συνάρτησης και το b της επιτάχυνσης. Επιλέγεται μία μοναδική τιμή για το b ώστε να αποτελεί τη βέλτιστη παρεμβολή και για τις τρεις RGB καμπύλες. Στην περίπτωση της δικής μας κάμερας η τιμή του b είναι ίση με 1.01 Τα gains των RGB αισθητήρων (παράμετρος a) επιρεάζονται από την επιλογή 'white balance' της κάμερας. Όταν η επιλογή ρυθμίζεται στο 'cloudy' τα gains συμπεριφέρονται έτσι ώστε μια ουδέτερη γκρι επιφάνεια, εκτεθειμένη σε εξωτερικό φωτισμό, να παράγει παρόμοια αποτελέσματα και για τους τρεις RGB αισθητήρες. Αν το εξωτερικό φως έχει όμως ομοιόμορφο φάσμα, ο προβολέας πυρακτώσεως που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις μας, περιέχει περισσότερα υψηλά μήκη κύματος. Αν οι RGB τιμές των pixel παρασταθούν συναρτήσεως της φωτεινότητας (σχήμα 2.1, δεξιά), το βάρος στα μεγαλύτερα μήκη κύματος έχει ως αποτέλεσμα την $R>G>B$ διάταξη των καμπύλων.

Με δεδομένο ότι ο προβολέας πυρακτώσεως δεν έχει επίπεδο φάσμα, οι gain παράμετροι πρέπει να διορθωθούν ώστε να εξισωθούν με τις RGB αποκρίσεις σε ομοιόμορφο φάσμα φωτός. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται πώς υπολογίζονται οι συναρτήσεις φασματικής ευαισθησίας των RGB αισθητήρων και πώς εκτιμάται για κάθε αισθητήρα ο λόγος της

απόκρισης σε ομοιόμορφο φάσμα φωτός προς την απόκριση στον φωτισμό που χρησιμοποιήθηκε, και πώς χρησιμοποιείται ο λόγος αυτός για τον υπολογισμό των gains (παράμετρος a).

2.2.2.2 Εκτίμηση της φασματικής ευαισθησίας των αισθητήρων της φωτογραφικής μηχανής

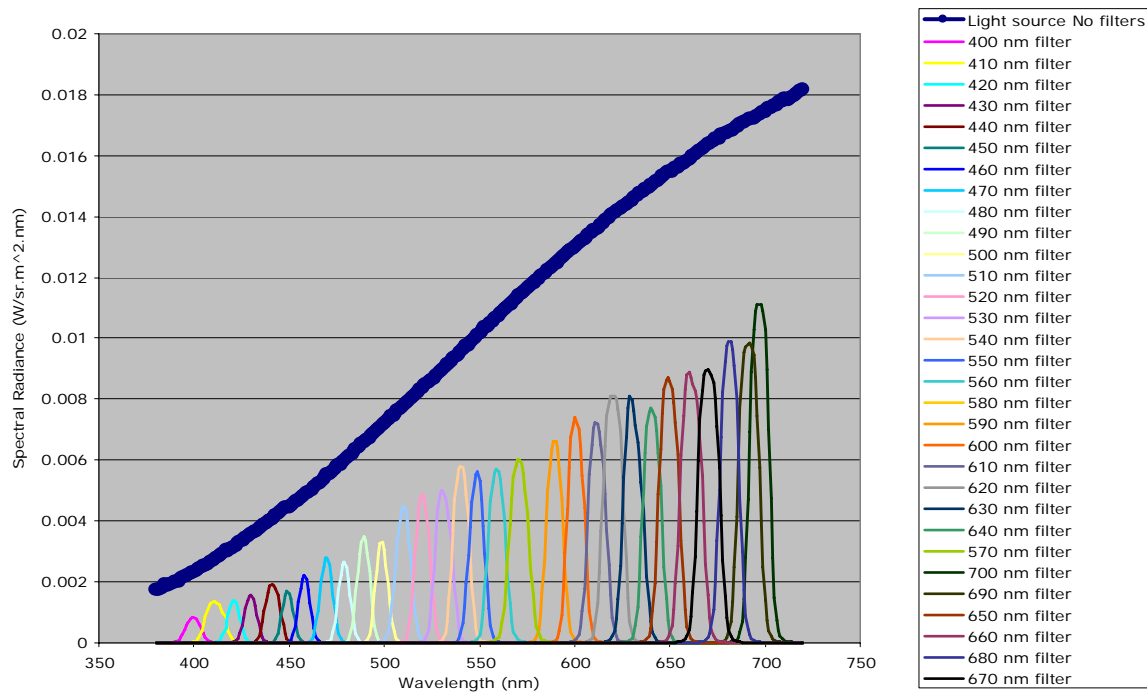
Οι φασματικές ευαισθησίες των αισθητήρων της κάμερας στο ορατό φάσμα (400 – 700 nm) μετρώνται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο 31 χρωματικών φίλτρων (Ealing Electro-Optics, Watford) με περιορισμένο φάσμα διέλευσης (από 400 μέχρι 700 nm με μέγιστο διέλευσης ανά 10 nm). Ο προβολέας φωτίζει ένα μαύρο κουτί στο οποίο έχουν ανοιχτεί δύο οπές. Μια εμπρόσθια ώστε να εισέρχεται το φως του προβολέα και μία πλάγια ώστε να λαμβάνονται οι μετρήσεις με το ΣΡ και οι φωτογραφίες με την κάμερα. Στο εσωτερικό του κουτιού είναι τοποθετημένος ένας λευκός στόχος μέγιστης ανάκλαστικότητας και το κουτί έχει επενδυθεί εσωτερικά με μαύρο βελούδο ώστε να αποφευχθεί η ανάκλαση από τα τοιχώματα. Ο στόχος αποτελείται από κυανοκρυλική (cyanocrylate) κολλώδη πούδρα (παρόμοια με το πρότυπο λευκό Kodak-Eastman) που παρουσιάζει 99% ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα. Η ουσία αυτή παράγει ένα Λαμπερτιανό (Lambertian) προφίλ διάχυσης του φωτός και παρουσιάζει προσεγγιστικά ομοιόμορφη συνάρτηση ανάκλασης στο ορατό φάσμα. Ένα μαύρο πανί τοποθετείται ανάμεσα στον προβολέα και την κάμερα ή το ΣΡ που φτάνει μέχρι το κουτί.



Εικόνα 2.2: Εξοπλισμός για τη μέτρηση της φασματικής ευαισθησίας της φωτογραφικής μηχανής.
Σκοτεινό δωμάτιο, Τμήμα Πειραματικής Ψυχολογίας, Πανεπιστήμιο του Bristol.

Το ΣΡ στοχεύει στο κέντρο του λευκού στόχου με το μικρό διάφραγμα (0.2°), ώστε να κεντραριστεί καλά και στη συνέχεια λαμβάνεται μέτρηση με το μεγάλο διάφραγμα (2°) ώστε να καλύπτεται ο λευκός στόχος και χωρίς κανένα φίλτρο μπροστά από το ΣΡ. Τοποθετούνται με τη σειρά τα φίλτρα μπροστά από το ΣΡ (βλ. εικόνα 2.2) και λαμβάνονται μετρήσεις, ενώ στο τέλος λαμβάνεται μια τελική μέτρηση χωρίς φίλτρο. Στο σχήμα 2.2 παριστάνεται γραφικά η ακτινοβολία του προβολέα πυρακτώσεως, αφού ανακλαστεί στο λευκό στόχο και μετρηθεί μετά το πέρασμα από τα φίλτρα. Έπειτα λαμβάνονται μία σειρά από φωτογραφίες, αντικαθιστώντας το ΣΡ με τη φωτογραφική μηχανή (τα

εστιακά τους σημεία πρέπει να βρίσκονται στην ίδια θέση). Οι φωτογραφίες λαμβάνονται με τη μέγιστη μεγέθυνση (max zoom) της κάμερας.



Σχήμα 2.2: Φασματική ακτινοβολία των 31 φίλτρων για τη πηγή φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε. Η παχιά γραμμή παρουσιάζει το φασματικό περιεχόμενο του φωτός όπως μετρήθηκε χωρίς φίλτρο.

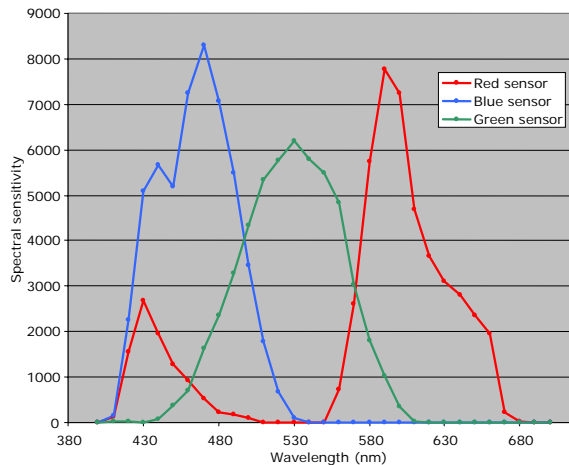
Αρχικά λαμβάνεται μία φωτογραφία του στόχου χωρίς φίλτρο και η κάμερα ρυθμίζεται στο 'aperture priority, A' όπου ο χρήστης επιλέγει το μέγεθος του διαφράγματος³ ($f=7.4$) και η κάμερα ρυθμίζει αυτόματα τον χρόνο έκθεσης (integration time). Για τις φωτογραφίες με τα πρώτα έξι φίλτρα ρυθμίζεται από τον χρήστη ο χρόνος έκθεσης, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1, με το f να μεταβάλλεται αυτόματα. Οι υπόλοιπες φωτογραφίες λαμβάνονται με $f = 7.4$ (μέγιστο) και επιτρέποντας στο χρόνο έκθεσης να μεταβάλλεται, ενώ στο τέλος λαμβάνονται άλλες δύο εικόνες (με $f = 7.4$), μια χωρίς κανένα φίλτρο και μία με το καπάκι της μηχανής, ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχουν φωτεινά pixels, τα οποία στη συνέχεια αφαιρούνται.

Filter peak (nm)	Integration Time	
	T (sec)	1/T
400	8.00	0.125
410	4.00	0.25
420	1.00	1.00
430	0.50	2.00
440	0.50	2.00
450	0.25	4.00

Πίνακας 2.1: Χρόνος έκθεσης για τις λήψεις με τα έξι πρώτα φίλτρα.

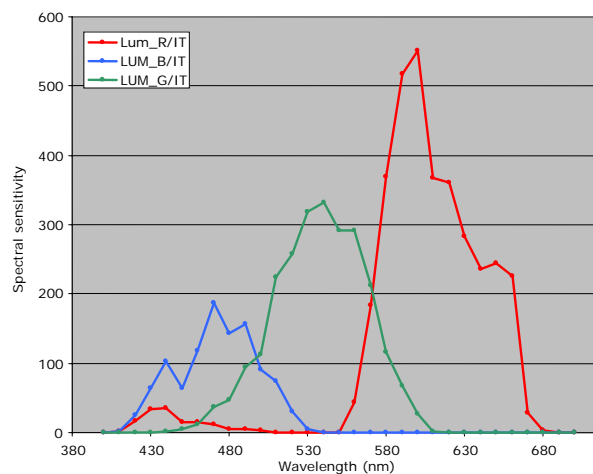
³ Μεγάλο διάφραγμα ισοδυναμεί με μικρό f-number και αντίστροφα.

Στη συνέχεια οι RGB τιμές του κεντρικού τμήματος των εικόνων αθροίζονται, όπως παραπάνω, και καταγράφεται ο χρόνος έκθεσης (IT) για κάθε εικόνα. Οι RGB τιμές με και χωρίς τα φίλτρα, διορθώνονται από τη συνάρτηση γάμμα (Εξ. 2.1), με την παράμετρο a να έχει την ίδια τιμή για τους τρεις αισθητήρες και στη συνέχεια διαιρείται με τη χρόνο έκθεσης. Η τιμή a στην περίπτωση μας είναι ίση με 1.21. Η τιμή αυτή αποτελεί την τιμή που λαμβάνει η παράμετρος a για τον πράσινο αισθητήρα $a_G = 1.21$.



Σχήμα 2.3: Φασματική ευαισθησία των RGB αισθητήρων της κάμερας.

Οι διορθωμένες από τη συνάρτηση γάμμα RGB τιμές διαιρούνται με τις μετρήσεις ακτινοβολίας για να υπολογιστούν οι φασματικές ευαισθησίες των RGB αισθητήρων, για το μήκος κύματος κάθε φίλτρου. Με χρήση αριθμητικών μεθόδων, τα χωρία κάτω από τις RGB καμπύλες εξισώνονται ώστε να παραχθούν ίσες αποκρίσεις με αυτές σε φως ομοιόμορφου φάσματος. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 2.3.



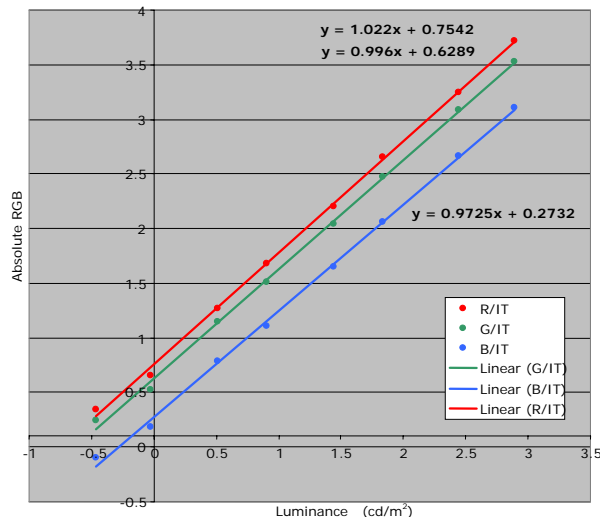
Σχήμα 2.4: Φασματικές ευαισθησίες των RGB αισθητήρων για το φωτισμό που χρησιμοποιήθηκε.

Για αντισταθμιστεί η χρήση του προβολέα πυρακτώσεως αντί για λευκό φως, οι RGB ευαισθησίες (σχήμα 2.3) πολλαπλασιάζονται με το φάσμα του ανακλώμενου φωτός από το λευκό στόχο. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο

σχήμα 2.4. Από το σχήμα 2.4 υπολογίζονται οι gain παράμετροι, τα a , ως οι λόγοι των εμβαδών των χωρίων που περικλείονται από τις καμπύλες του κόκκινου και μπλε αισθητήρα $\sum R$, $\sum B$, προς το εμβαδόν του χωρίου που περικλείεται από τη καμπύλη του πράσινου αισθητήρα $\sum G$.

Για τον κόκκινο λοιπόν αισθητήρα η παράμετρος a υπολογίζεται ως, $a_R = \frac{\sum R}{\sum G}$, και για τον μπλε αισθητήρα $a_B = \frac{\sum B}{\sum G}$. Στην περίπτωση μας οι παράμετροι είχαν τις τιμές, $a_R = 0.8341$ και $a_B = 1.8751$.

Για να ελεγχθεί το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης λήφθηκαν μετρήσεις με το ΣΡ από το κέντρο του λευκού στόχο. Μπροστά στο ΣΡ τοποθετήθηκαν neutral density (ND) φίλτρα (με τιμές 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 λογαριθμικές μονάδες) και μετρήθηκε η φωτεινότητα μέσα από κάθε φίλτρο. Έπειτα το ΣΡ αντικαταστάθηκε από την κάμερα και από το κεντρικό κομμάτι κάθε εικόνας υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για κάθε RGB αισθητήρα.



Σχήμα 2.5: Η σχέση μεταξύ των RGB τιμών (διαιρεμένες με τον χρόνο έκθεσης) και της φωτεινότητας σε λογαριθμικούς άξονες.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται το γράφημα σε λογαριθμικούς άξονες της εξόδου (output) της κάμερας συναρτήσει της φωτεινότητας. Οι τιμές αυτές διορθώθηκαν από τη συνάρτηση γάμμα, με χρήση των παραμέτρων που υπολογίστηκαν παραπάνω και διαιρέθηκαν με χρόνο έκθεσης για κάθε εικόνα. Όπως φαίνεται οι κλίσεις των γραμμών είναι κοντά στη μονάδα και η μορφή τους είναι γραμμική.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αισθητήρες της φωτογραφικής μηχανής φτάνουν σε κορεσμό για τιμές φωτεινότητας των pixels, μικρότερες του 5 και μεγαλύτερες του 250. Επομένως οι γραμμικοποιημένες τιμές δεν ευσταθούν σε αυτές τις περιπτώσεις.

2.2.3 Μετατροπή των εικόνων από τις RGB χρωματικές συντεταγμένες σε LMS

Οι γραμμικοποιημένες RGB εικόνες μπορούν να μετατραπούν σε εικόνες που προσομοιώνουν τις αποκρίσεις των L, M και S κωνίων του ανθρώπινου οπτικού συστήματος. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι γραμμικός και πραγματοποιείται με τη χρήση ενός πίνακα, ο οποίος μετασχηματίζει τις **[R, G, B]** τιμές στις αντίστοιχες **[L, M, S]**.

$$[L, M, S]^T = \mathbf{T} * [R, G, B]^T, \text{όπου}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_4 & t_5 & t_6 \\ t_7 & t_8 & t_9 \end{bmatrix}.$$

Ο πίνακας **T** υπολογίζεται από τις φασματικές ευαισθησίες των αισθητήρων της κάμερας και από τη φασματική ευαισθησία των κωνίων όπως υπολογίστηκε από τους Smith και Pokorny (1975) (Παράρτημα II). Οι συναρτήσεις Smith και Pokorny προσαρμόστηκαν ώστε να είναι συμβατές με ψυχοφυσικές μετρήσεις και μαθηματικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί είναι οι παρακάτω:

- Η μέγιστη ευαισθησία σε μήκη κύματος των μηχανισμών L-M και S-(L+M)/2 πρέπει να είναι κοντά στα 580 και τα 506 nm αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή L(580 nm) πρέπει προσεγγιστικά να ισούται με την M(580 nm), και ότι η τιμή S(506 nm) πρέπει να ισούται προσεγγιστικά με το συνδυασμό των τιμών L(506 nm) και M(506 nm).
- Οι γραμμές του πίνακα μετασχηματισμού **T** πρέπει να έχουν ως άθροισμα τον ίδιο αριθμό. Αυτό είναι απαραίτητο, ώστε οι χρωματικές συντεταγμένες ενός λευκού αντικειμένου να παραμένουν ίδιες μετά το μετασχηματισμό.

Αφού οι δύο περιορισμοί δεν είναι δυνατόν να ικανοποιούνται ταυτόχρονα, επιλέγονται κατάλληλα τέτοια βάρη, ώστε να ικανοποιείται η δεύτερη συνθήκη με σφάλμα 2%. Οι συντελεστές του πίνακα **T** υπολογίζονται ως εξής (η άθροιση γίνεται από 400 μέχρι 700 nm):

$$t_1 = \sum(R_i * L_i) \quad t_2 = \sum(G_i * L_i) \quad t_3 = \sum(B_i * L_i)$$

$$t_4 = \sum(R_i * M_i) \quad t_5 = \sum(G_i * M_i) \quad t_6 = \sum(B_i * M_i)$$

$$t_7 = \sum(R_i * S_i) \quad t_8 = \sum(G_i * S_i) \quad t_9 = \sum(B_i * S_i)$$

2.2.3 Μετασχηματισμός Fourier

2.2.3.1 Μονοδιάστατος μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier (Fourier transform) αποτελεί μία γενίκευση της ανάλυσης σε σειρά Fourier, μόνο που ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί να εφαρμοστεί και σε μη περιοδικές συναρτήσεις. Ο συνεχής μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε απολύτως ολοκληρώσιμη συνάρτηση⁴, ενώ στη διακριτή περίπτωση μπορεί να μετασχηματιστεί οποιοδήποτε σύνολο σημείων.

Αν μία συνάρτηση εξαρτάται από μία χωρική μεταβλητή x , ο μετασχηματισμός Fourier την μετατρέπει σε συνάρτηση (χωρικής) συχνότητας f ($f = x^{-1}$). Αν η μεταβλητή της μετασχηματιζόμενης συνάρτησης είναι χρονική (t), ο μετασχηματισμός Fourier την μετατρέπει σε συνάρτηση χρονικής συχνότητας ($\omega = t^{-1}$). Με απλά λόγια ο μετασχηματισμός Fourier δείχνει από ποιες συχνότητες αποτελείται η μετασχηματιζόμενη συνάρτηση και πόσο ισχυρές είναι αυτές.

Ο μονοδιάστατος μετασχηματισμός Fourier μιας διακριτής συνάρτησης $f(x)$, $x=0,1,2,\dots,M-1$, ορίζεται ως:

$$F(f) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-i2\pi fx/M}, \quad f=0,1,2,\dots,M-1.$$

Ο μετασχηματισμός Fourier μιας πραγματικής συνάρτησης $\phi(x)$, είναι συνήθως **μιγαδική συνάρτηση** (της συχνότητας f), έχει δηλαδή τη μορφή,

$$F(f) = R(f) + iI(f)$$

όπου $R(f)$ και $I(f)$ είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της $F(f)$ αντίστοιχα. Μπορούμε να εκφράσουμε την $F(f)$ σε εκθετική μορφή δηλαδή,

$$F(f) = \text{Amplitude}(f) e^{i\text{Phase}(f)}$$

όπου,

$$\text{Amplitude}(f) = |F(f)| = \sqrt{R^2(f) + I^2(f)} \quad \text{και} \quad \text{Phase}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{I(f)}{R(f)} \right].$$

Το μέτρο $|F(f)|$ ονομάζεται **φασματικό πλάτος (amplitude spectrum ή Fourier amplitude)**, η φάση $\text{Phase}(f)$, **φασματική φάση (phase spectrum)**, ενώ η ποσότητα $|F(f)|^2$ **φασματική ισχύς (power spectrum)**.

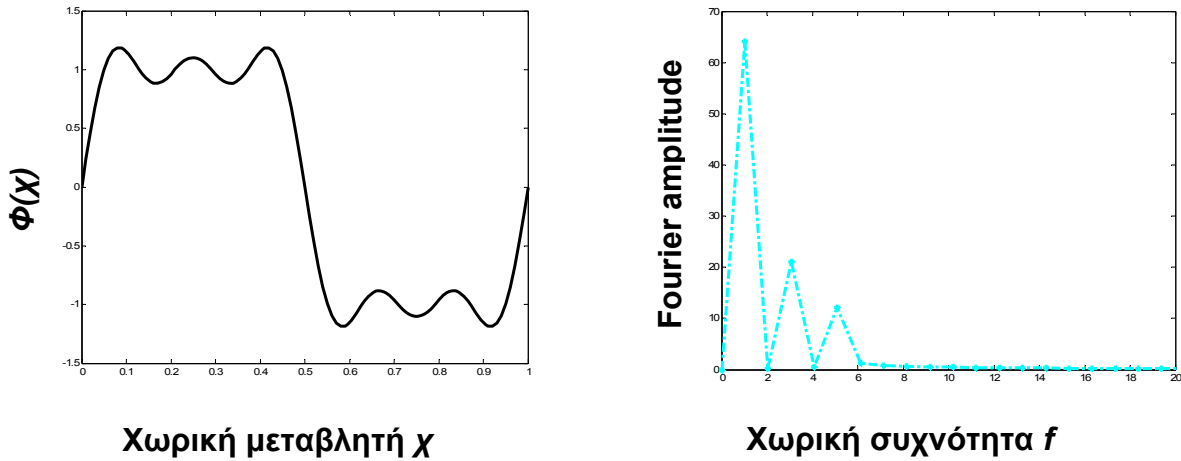
Παραδείγματα

1) Έστω η συνάρτηση, $\phi(x) = \frac{4}{\pi} (\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x)$, της οποίας οι όροι αποτελούν τις τρεις πρώτες αρμονικές του τετραγωνικού κύματος του Παραρτήματος I (για $\kappa = 1$). Κάθε όρος της παραπάνω συνάρτησης έχει

⁴ Αν u η μετασχηματιζόμενη συνάρτηση τότε πρέπει, $\int_{-\infty}^{\infty} |u(x)| dx < \infty$.

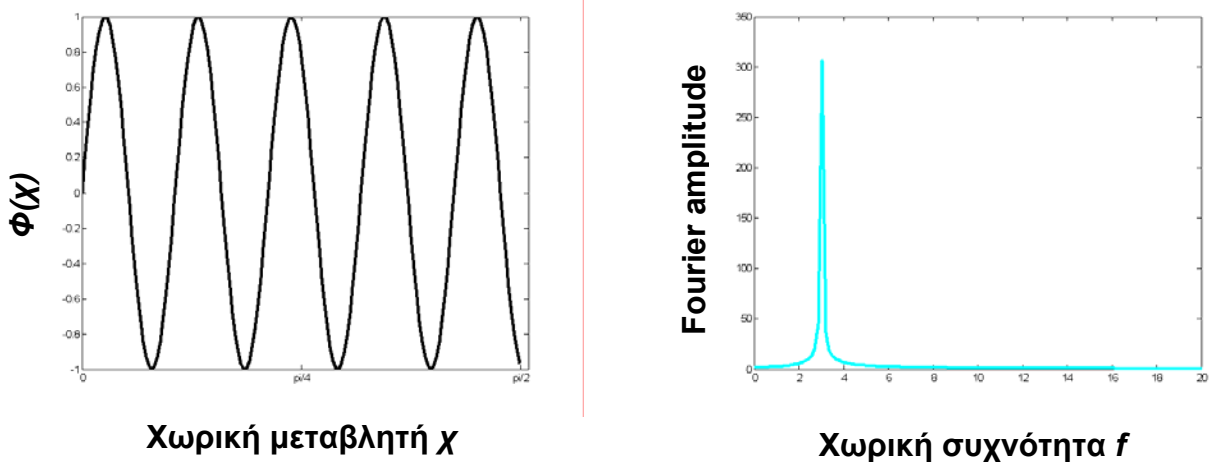
διαφορετική συχνότητα, με τον πρώτο όρο να περιέχει την μικρότερη συχνότητα (θεμελιώδη) και να έχει το μεγαλύτερο πλάτος. Αυτό καθιστά τον πρώτο όρο τον πιο 'ισχυρό' από τους τρεις, και παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην προσέγγιση του τετραγωνικού κύματος.

Η συνάρτηση f και η γραφική αναπαράσταση του φασματικού πλάτους συναρτήσει της χωρικής συχνότητας παρουσιάζονται στο σχήμα 2.6:



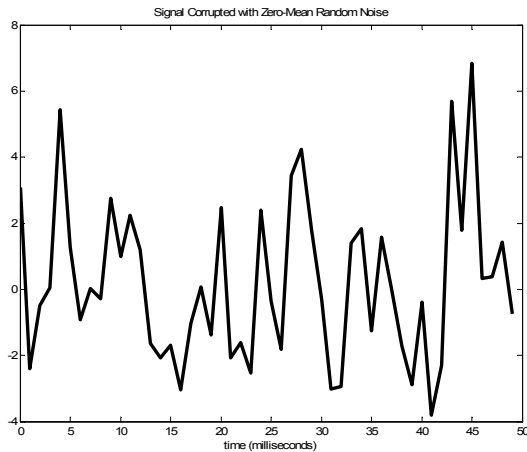
Σχήμα 2.6.

Στα αριστερά είναι σχεδιασμένη η συνάρτηση $\phi(x)$ η οποία αποτελείται από τρεις διαφορετικές συχνότητες. Δεξιά φαίνεται ο Fourier μετασχηματισμός όπου $f = x^{-1}$ η χωρική συχνότητα. Ο μετασχηματισμός φανερώνει ότι η αρχική συνάρτηση αποτελείται από τρεις διαφορετικές συχνότητες 'ισχυρότερη' εκ των οποίων είναι η πρώτη. 2) Η γραφική αναπαράσταση του φασματικού πλάτους συναρτήσει της χωρικής συχνότητας μιας απλής ημιτονοειδούς συνάρτησης, της $\phi(x) = \sin(2\pi 3x)$, η οποία αποτελείται από μία μοναδική συχνότητα ίση με 3 παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7. Έτσι το φασματικό πλάτος παρουσιάζει ένα μοναδικό μέγιστο στο σημείο $f = 3$.

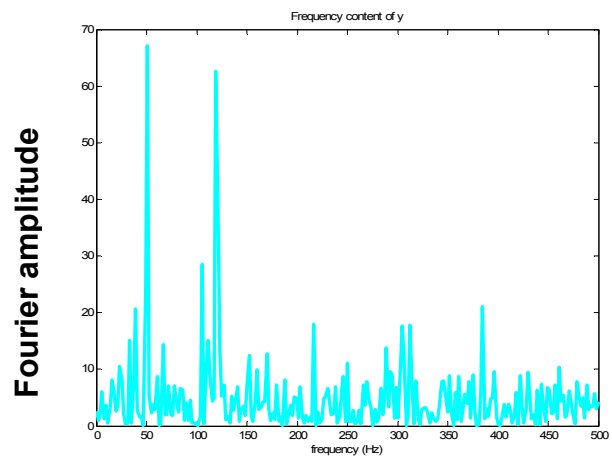


Σχήμα 2.7

3) Αν θεωρήσουμε τώρα ένα χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα, το οποίο αποτελείται από τη συνάρτηση $\sin(2\pi 50t) + \sin(2\pi 120t)$, στην οποία έχει προστεθεί τυχαία θόρυβος. Η γραφική αναπαράσταση του σήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8, αριστερά και δεξιά ο μετασχηματισμός Fourier.



Χρονική μεταβλητή t (sec)

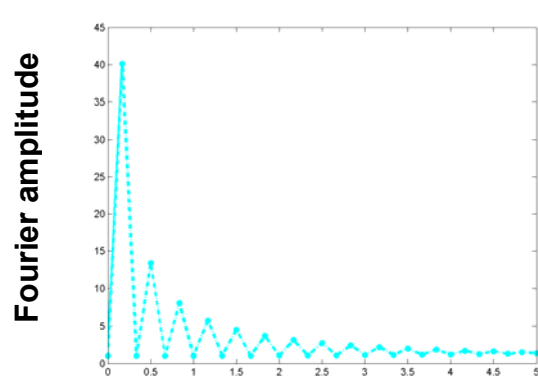
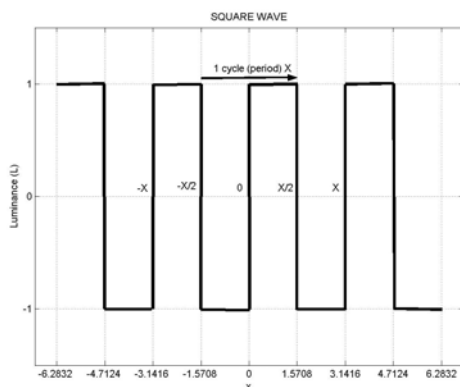


Χρονική συχνότητα ω (Hz)

Σχήμα 2.8.

Είναι εμφανές ότι λαμβάνοντας κάποιος ένα σήμα, όπως το παραπάνω (αριστερά), είναι αδύνατον να βγάλει κάποιο συμπέρασμα για το περιεχόμενο του σήματος. Ο μετασχηματισμός Fourier όμως του σήματος παρουσιάζει δύο κύρια μέγιστα. Το πρώτο στα 50Hz και το δεύτερο στα 120Hz. Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό σήμα αποτελείται από δύο βασικές συχνότητες (50,120Hz) ενώ το υπόλοιπο είναι θόρυβος.

4) Τέλος στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται ο μετασχηματισμός Fourier ενός τετραγωνικού κύματος, το οποίο αναλύεται στη σειρά $\frac{4}{\pi} (\sin \kappa\chi + \frac{1}{3} \sin 3\kappa\chi + \frac{1}{5} \sin 5\kappa\chi + \dots)$. Περιέχει δηλαδή τη θεμελιώδη συχνότητα



Χωρική συχνότητα f

Σχήμα 2.9.

και μία άπειρη σειρά συχνοτήτων, όπως άλλωστε φαίνεται κι από το γράφημα του μετασχηματισμού.

Πέρα από το συνεχή μετασχηματισμό Fourier, ορίζεται και ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform) για ένα σύνολο από διακριτά σημεία. Στα περισσότερα υπολογιστικά πακέτα ο μετασχηματισμός Fourier υλοποιείται με έναν πιο αποδοτικό υπολογιστικά αλγόριθμο η βασική δομή του οποίου αναπτύχθηκε το 1965 από τους Cooley and Tukey. Ο αλγόριθμος αυτός είναι γνωστός ως **Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform – FFT)**. Στη μονοδιάστατη περίπτωση αν ο μετασχηματισμός Fourier έχει υπολογιστική πολυπλοκότητα $O(n^2)$ ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier έχει υπολογιστική πολυπλοκότητα $O(n \log_2 n)$. Αν ο αριθμός των σημείων n είναι για παράδειγμα 1024, τότε ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier είναι 70 φορές πιο γρήγορος.

2.2.4 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων

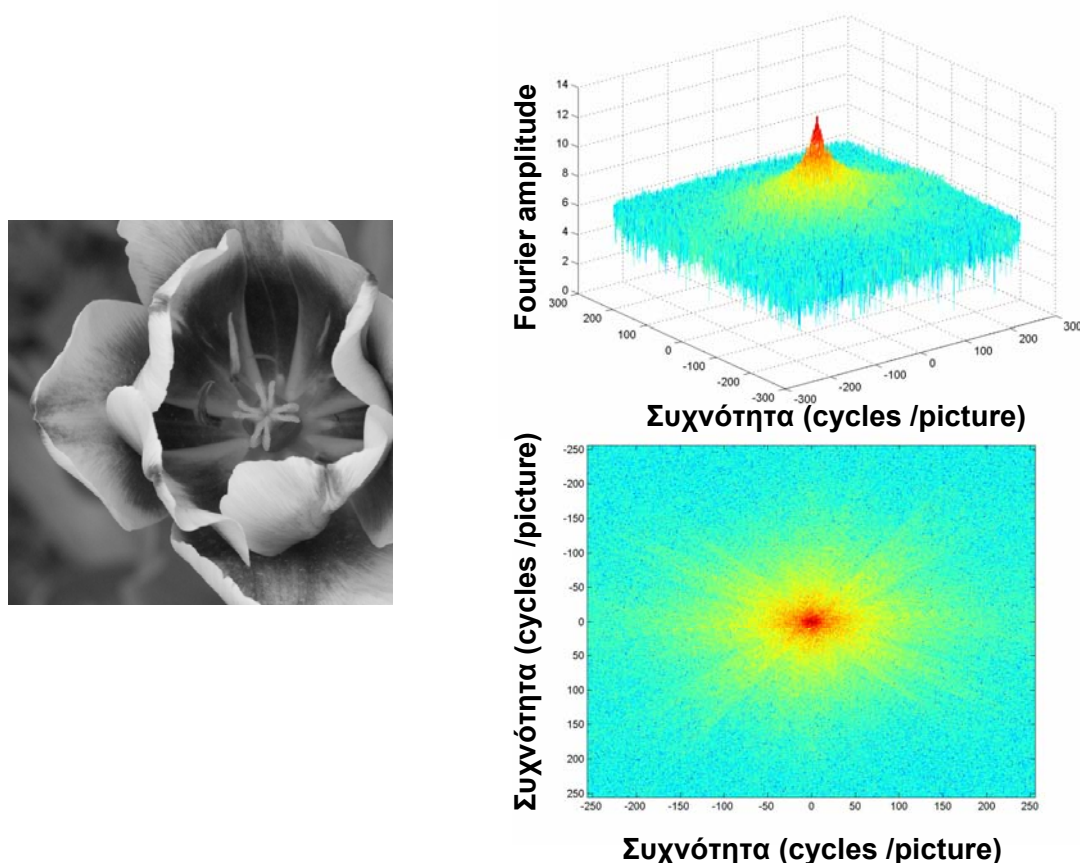
Το μέγεθος των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 512 x 512 pixels. Κάποιες από τις αρχικές εικόνες είχαν μέγεθος 768 x 576 και επελέγησαν από ένα σύνολο 850 ψηφιακών φωτογραφιών της βάσης δεδομένων του Πανεπιστημίου McGill (Olmos and Kingdom, 2004) Οι εικόνες ελήφθησαν με την ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Nikon Coolpix 5700, την ίδια που διαθέτει το εργαστήριο μας και η βαθμονόμηση της έγινε στο Πανεπιστήμιο του Bristol σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Πριν τον μετασχηματισμό Fourier των εικόνων εφαρμόστηκε σε αυτές ένα εκ-περιστροφής σιγμοειδές φίλτρο το οποίο περιγράφεται παρακάτω. Στις μονοδιάστατες αναπαραστάσεις του Fourier amplitudes το dc component αφαιρέθηκε. Για τον υπολογισμό των υβριδικών εικόνων της ενότητας 2.3.4 δεν εφαρμόστηκε κανενός είδους φίλτρο.

Η επεξεργασία των εικόνων έγινε με χρήση του υπολογιστικού πακέτου MATLAB (Version 6.5, Release 13 © The MathWorks Inc.). Το MATLAB (MATrix LABoratory) είναι ένα διαδραστικό σύστημα το οποίο είναι δομημένο με πίνακες οι οποίοι δεν απαιτούν διαστατοποίηση. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη λύσεων σε τεχνικά υπολογιστικά προβλήματα, ειδικά σε προβλήματα που περιέχουν αναπαραστάσεις με χρήση πινάκων (όπως η ψηφιακή επεξεργασία εικόνων), σε χρόνο πολύ μικρότερο από αυτόν που θα απαιτούσε η ανάπτυξη προγράμματος σε μια μη-διαδραστική, βαθμωτή γλώσσα προγραμματισμού όπως η FORTRAN ή η C. Το MATLAB συνοδεύεται από μια οικογένεια λύσεων-συγκεκριμένων εφαρμογών, που ονομάζονται toolboxes. Το Image Processing Toolbox είναι μια συλλογή συναρτήσεων MATLAB που επεκτείνουν τις δυνατότητες του περιβάλλοντος MATLAB στην επίλυση προβλημάτων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων και με χρήση του οποίου πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των εικόνων. Οι κώδικες MATLAB που χρησιμοποιήθηκαν στους παρακάτω υπολογισμούς παρατίθενται στο αντίστοιχο παράρτημα.

2.3 Αποτελέσματα – Χωρική ανάλυση εικόνων

2.3.1 Δυσδιάστατος μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier μίας εικόνας⁵, καταλήγει σε ένα πίνακα μιγαδικών αριθμών, ίσου σε διαστάσεις με τον πίνακα που αναπαριστά την εικόνα. Η γραφική αναπαράσταση του φασματικού πλάτους (Fourier amplitude) γίνεται σε σύστημα τριών αξόνων, όπου οι τιμές του x και y άξονα αναπαριστούν τη θέση του στοιχείου στον πίνακα, ενώ η τιμή του κατακόρυφου άξονα z αντιστοιχεί στο μέτρο του φασματικού πλάτους, δηλαδή την ενέργεια κάθε χωρικής συχνότητας (βλ. σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10: Μετασχηματισμός Fourier μιας φυσικής εικόνας (αριστερά) η τρισδιάστατη (δεξιά-πάνω) και δυσδιάστατη (δεξιά-κάτω) αναπαράσταση του μετασχηματισμού.

Είναι παρόλα αυτά πιο βολικό οπτικά να αναπαριστάται το φασματικό πλάτος με τη μορφή δυσδιάστατης εικόνας (σχήμα 2.10 δεξιά-κάτω), όπου οι δύο άξονες αντιστοιχούν στις οριζόντιες και κατακόρυφες χωρικές συχνότητες (συνήθως μετρημένες σε cycles/pixels ή cycles/picture ή pixels^{-1}), ενώ το μέτρο του φασματικού πλάτους φανερώνεται από το χρωματικό χάρτη της εικόνας.

⁵ Μια αχρωματική εικόνα μπορεί να θεωρηθεί ως δυσδιάστατος πίνακας, κάθε στοιχείο του οποίου αναπαριστά την τιμή της φωτεινότητας (από 0-μαύρο μέχρι 255-λευκό) στο συγκεκριμένο pixel.

Η δυσδιάστατη αναπαράσταση του φασματικού πλάτους περιγράφει την ενέργεια των χαμηλών συχνοτήτων στη περιφέρεια και των υψηλών συχνοτήτων στο κέντρο. Είναι όμως σύνηθες και οπτικά πιο βολικό η ενέργεια των χαμηλών συχνοτήτων να αναπαρίσταται στο κέντρο και των υψηλών συχνοτήτων στη περιφέρεια (όπως στο σχήμα 2.10). Να σημειωθεί όμως ότι αυτό γίνεται για δική μας ευκολία και δεν αποτελεί ιδιότητα του μετασχηματισμού Fourier⁶. Όπως λοιπόν φαίνεται στο σχήμα 2.10, η ενέργεια των μηδενικών χωρικών συχνοτήτων αναπαρίστανται στο κέντρο (0,0) με τη τιμή του φασματικού πλάτους στο σημείο αυτό να ισούται με:

$$F(0,0) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y), \text{ όπου } M,N \text{ οι διαστάσεις του μετασχηματισμού. Η}$$

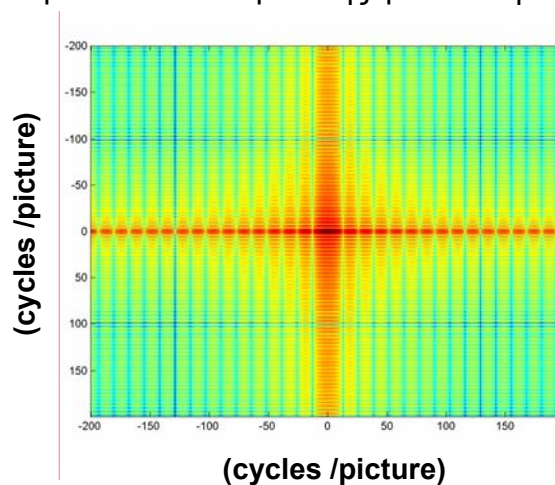
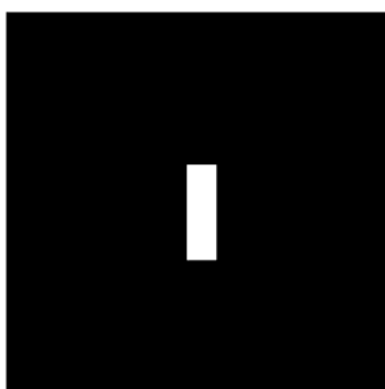
τιμή αυτή αποτελεί τη μέση τιμή της αρχικής συνάρτησης $f(x,y)$. Με άλλα λόγια αν $f(x,y)$ είναι μία εικόνα, το μέτρο του φασματικού πλάτους στην αρχή των αξόνων ισούται με τη μέση τιμή των τιμών φωτεινότητας της εικόνας. Επειδή και οι δύο συχνότητες είναι μηδέν στο σημείο αυτό, το $F(0,0)$ συχνά καλείται dc component του φάσματος. Ο όρος είναι δανεισμένος από τη μηχανική όπου dc είναι τα αρχικά των λέξεων direct current (ρεύμα μηδενικής συχνότητας).

Παραδείγματα:

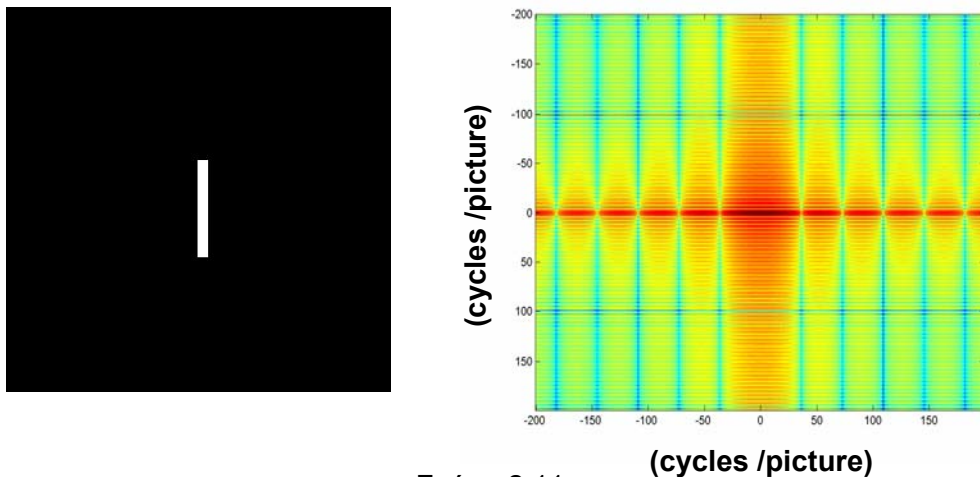
Ο δυσδιάστατη αναπαράσταση του φασματικού πλάτους φανερώνει αρκετά από τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιζόμενων εικόνων. Αρχικά ας εξετάσουμε τους μετασχηματισμούς δύο απλών binary (οι τιμές των pixel είναι 0-μαύρο ή 1-λευκό) εικόνων (βλ. σχήμα 2.11).

Σε όλα τα παρακάτω σχήματα αριστερά παρουσιάζεται η αρχική εικόνα και δεξιά η δυσδιάστατη αναπαράσταση του φασματικού πλάτους της εικόνας αυτής.

Στα σχήμα 2.11, το μέγιστο στα κέντρα και των δύο αναπαραστάσεων του μετασχηματισμού, αποτελεί το άθροισμα όλων των τιμών της φωτεινότητας.



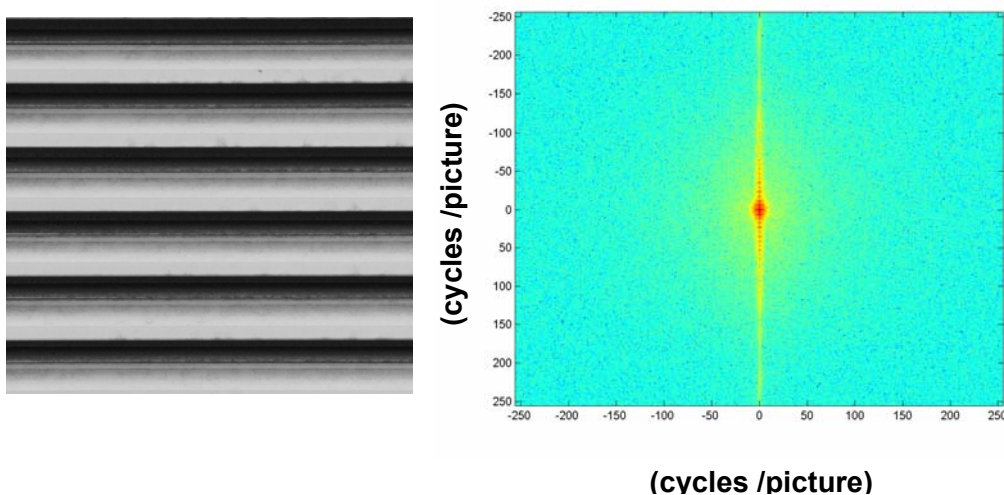
⁶ Ο μετασχηματισμός αυτός πραγματοποιείται πολλαπλασιάζοντας την αρχική εικόνα με τον όρο, $(-1)^{x+y}$, όπου x,y οι συντεταγμένες της εικόνας ή με χρήση της συνάρτησης fftshift της MATLAB.



Σχήμα 2.11.

Και στις δύο περιπτώσεις είναι εμφανές πως στις υψηλές οριζόντιες συχνότητες υπάρχει μεγαλύτερη ενέργεια από ότι στις υψηλές κατακόρυφες συχνότητες. Αυτό αποτελεί συνέπεια του ότι οι οριζόντιοι παλμοί, στις δύο αρχικές εικόνες, είναι πιο στενοί από τους κατακόρυφους. Στενότεροι παλμοί όμως περιέχουν περισσότερες υψηλες συχνότητες από τους ευρύτερους. Η διαφορά φαίνεται επίσης μεταξύ των δύο εικόνων, όπου στη δεύτερη περίπτωση η μπάρα έχει μικρότερο πλάτος.

Εικόνες στις οποίες κυριαρχούν υψηλές συχνότητες και οι οποίες εμφανίζονται σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς δίνουν στην αναπαράσταση του φασματικού πλάτους συγκεκριμένη μορφή. Η εικόνα του σχήματος 2.12 αποτελείται από οριζόντιες έντονα προσανατολισμένες μεταλικές ράβδους.

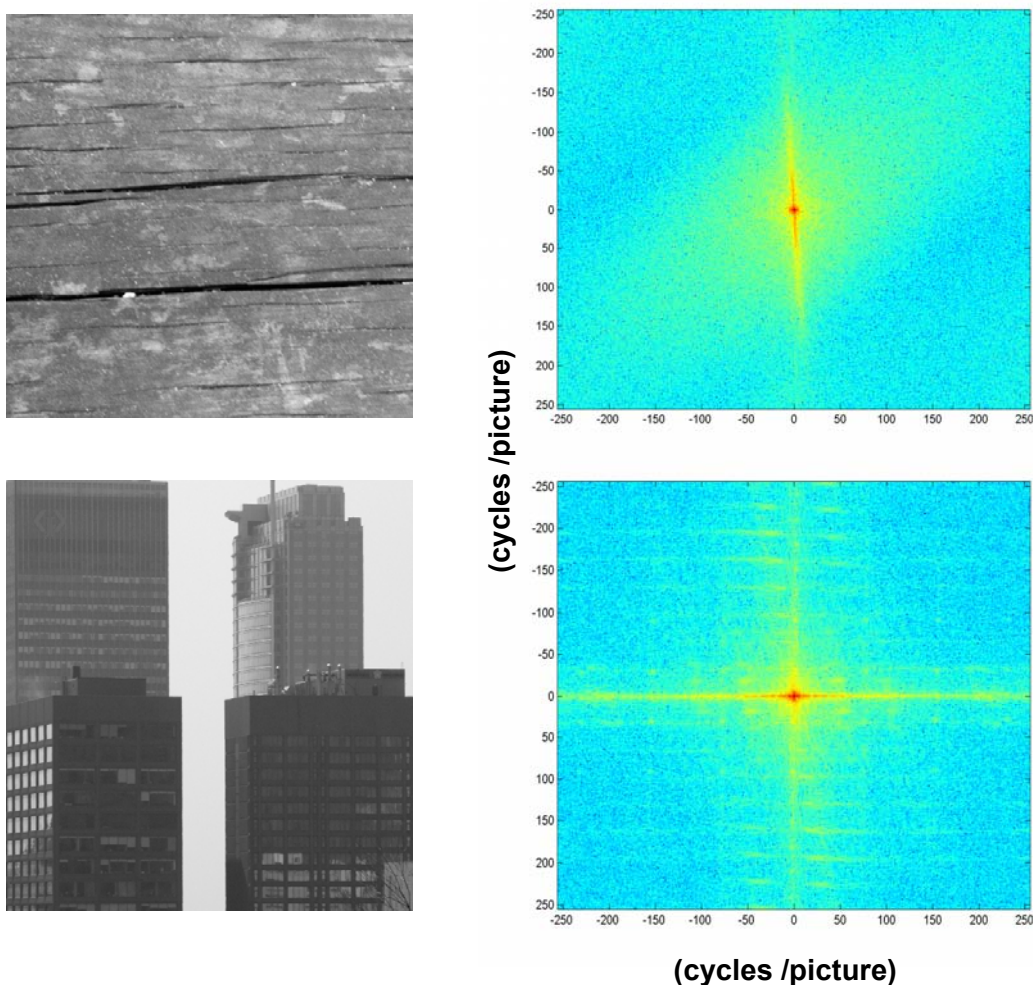


Σχήμα 2.12

Η δομή που παρουσιάζει η εικόνα του μετασχηματισμού αποκαλύπτει πως η αρχική εικόνα περιέχει μεσαίες και υψηλές συχνότητες οι οποίες εμφανίζονται κάθετα προσανατολισμένες. Ο προσανατολισμός των συχνοτήτων στην εικόνα του μετασχηματισμού εξηγείται με τον ίδιο τρόπο όπως παραπάνω. Οι

μεταλικές ράβδοι στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι στενές και επομένως περιέχουν πιο πολλές υψηλές χωρικές συχνότητες.

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζονται οι μετασχηματισμοί Fourier δύο εικόνων οι οποίες περιέχουν έντονα προσανατολισμένες μεσαίες και υψηλές χωρικές συχνότητες. Στην πρώτη περίπτωση οι ρωγμές του ξύλου σχηματίζουν μικρή γωνία με τον οριζόντιο χωρικό άξονα, και για ίδιο λόγο που περιγράφηκε παραπάνω οι συχνότητες που έχουν μεγαλύτερο φασματικό πλάτος, σχηματίζουν μικρή γωνία με τον κατακόρυφο άξονα των συχνοτήτων. Στην αστική εικόνα τα κτήρια παρουσιάζουν μεσαίες και υψηλές συχνότητες έντονα προσανατολισμένες στην οριζόντια καθώς και στη κατακόρυφη διεύθυνση, κάτι που επίσης φανερώνεται στην εικόνα του μετασχηματισμού.

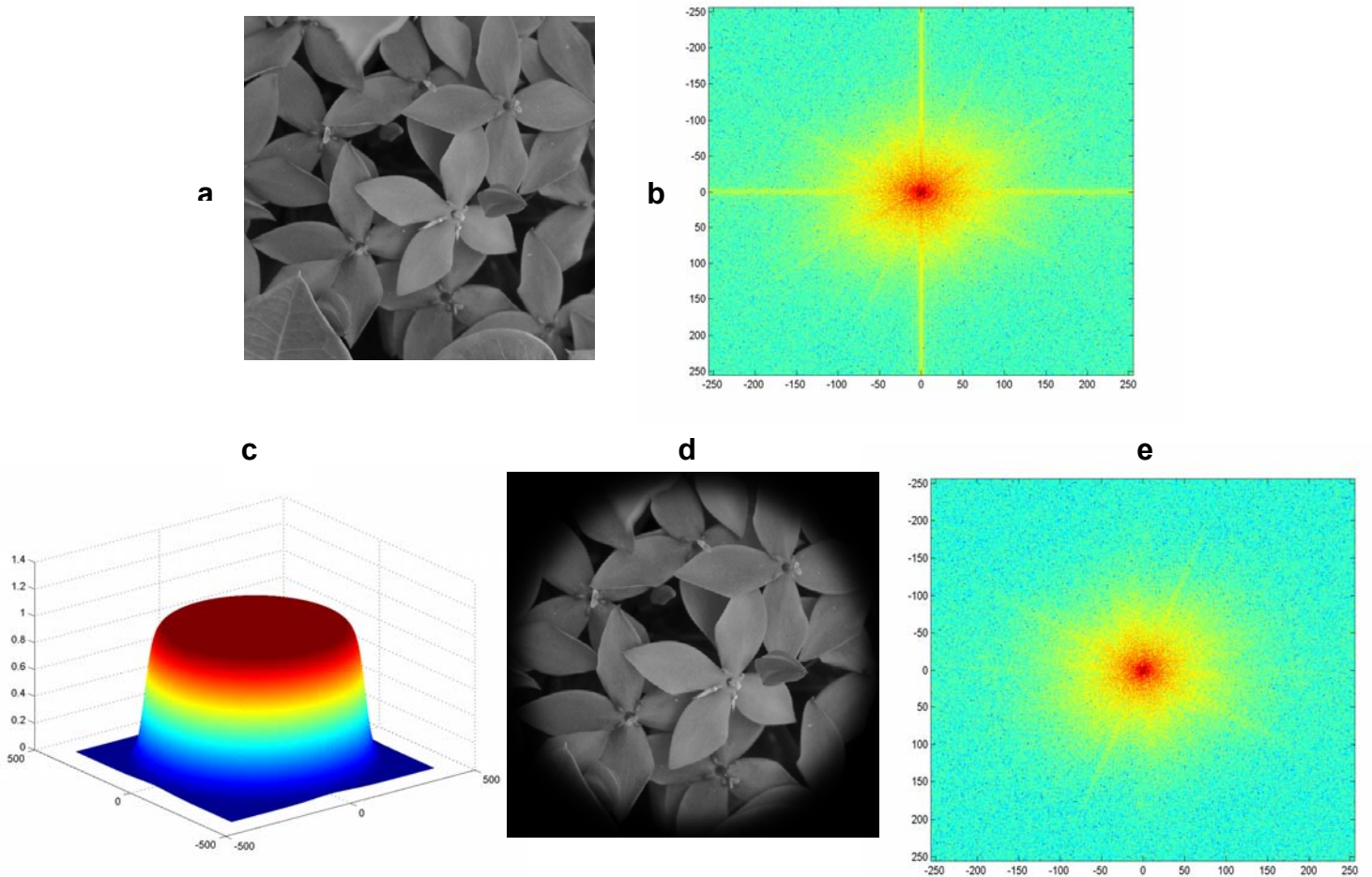


Σχήμα 2.13.

2.3.1.1 Windowing

Πριν μετασχηματιστεί η εικόνα, πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε γραμμή και στήλη της, μια συνάρτηση (window function), η οποία βαθμιαία θα ελαττώνει τις τιμές της φωτεινότητας στα σύνορα της εικόνας στο μηδέν. Διαφορετικά η απότομη μετάβαση στα άκρα της εικόνας θα εισάγει υψηλής συχνότητας συνιστώσες στην εικόνα του μετασχηματισμού (βλ. σχήμα 2.14b) και κατά τον

αντίστροφο μετασχηματισμό θα εισαχθεί μία παραμόρφωση στην εικόνα που ονομάζεται ringing (βλ. σχήμα 2.16). Οι υψηλές συχνότητες λοιπόν που εισέρχονται στην εικόνα του μετασχηματισμού στην κάθετη και οριζόντια διεύθυνση, είναι αποτέλεσμα της πεπερασμένης διάστασης του μετασχηματισμού και πρέπει να αφαιρεθούν.



Σχήμα 2.14: Ο πεπερασμένης διάστασης μετασχηματισμός Fourier της αρχικής εικόνας (a), εισάγει τεχνητές, υψηλής συχνότητας συνιστώσες στην εικόνα του μετασχηματισμού (b). Όταν η εικόνα πολλαπλασιαστεί με μια εκ περιστροφής συμμετρική σιγμοειδή windowing συνάρτηση (c) το κεντρικό τμήμα της εικόνας παραμένει ανεπηρέαστο, ενώ η τιμές της φωτεινότητας στα περιθώρια της εικόνας γίνονται μηδέν (d). Ο μετασχηματισμός της εικόνας τότε (e) είναι απαλλαγμένος από τις τεχνητές υψηλές συχνότητες.

Η επιλογή μιας κατάλληλης windowing συνάρτησης, γίνεται ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι συνιστώσες υψηλής συχνότητας εκτός της συνάρτησης, ενώ παράλληλα να διατηρηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της εικόνας. Για αυτό το λόγο αναζητείται μία συνάρτηση της οποίας το κεντρικό μέγιστο θα είναι όσο το δυνατόν πιο πλατύ, ενώ ταυτόχρονα θα μεταβαίνει ομαλά στο μηδέν, στα σύνορα της εικόνας. Αρκετές διαφορετικές windowing συναρτήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στην πράξη, όπως τα Hamming, Gaussian, Kaiser windows και άλλα. Τη πιο δημοφιλή επιλογή αποτελεί το Hamming window, που χρησιμοποιείται στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές.

Στην περίπτωση μας η windowing συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 2.14c. Αποτελεί μία εκ περιστροφής συμμετρική σιγμοειδή συνάρτηση και χρησιμοποιήθηκε λόγω της επίπεδης μορφής που παρουσιάζει στο κέντρο (εκεί έχει την τιμή 1), αφήνοντας το μεγαλύτερο τμήμα της εικόνα ανεπηρέαστο, ενώ η μετάβαση στο μηδέν γίνεται εκθετικά. Σε όλους τους μετασχηματισμούς Fourier που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, μια τέτοια συνάρτηση έχει εφαρμοστεί.

2.3.2 Χαμηλές, μεσαίες και υψηλές χωρικές συχνότητες - Φίλτρα

Οι χωρικές συχνότητες μιας εικόνας καθορίζουν με διαφορετικό τρόπο το περιεχόμενο της ενώ παίζουν σημαντικό ρόλο στην αντίληψη της (βλ. παρακάτω). Οι υψηλές χωρικές συχνότητες σχετίζονται με τα άκρα και τις ακμές μιας εικόνας, τις απότομες δηλαδή μεταβολές στις τιμές της φωτεινότητας. Όταν φιλτραριστούν οι υψηλές χωρικές συχνότητες η εικόνα διατηρεί το περιεχόμενο της, δείχνει όμως θολή (blurred) αφού έχουν αφαιρεθεί οι ακμές της (βλ. σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15: Αρχική εικόνα (αριστερά), χαμηλές και μεσαίες χωρικές συχνότητες (κέντρο), μεσαίες και υψηλές χωρικές συχνότητες (δεξιά).

Έχει μάλιστα αναφερθεί πως σε πειράματα χρόνων αντίδρασης όπου είχε ζητηθεί από τον εξεταζόμενο να αναγνωρίσει όσο το δυνατόν ταχύτερα το περιεχόμενο εικόνων οι οποίες περιείχαν διαφορετικές χωρικές συχνότητες, γρηγορότερα γινόταν η αναγνώριση των εικόνων οι οποίες περιείχαν υψηλές συχνότητες (Parathomas et al., ECVP poster, 2005). Το αποτέλεσμα δείχνει αναμενόμενο, αφού οι ακμές και τα άκρα μιας εικόνας, καθιστούν το περιεχόμενο της πιο εύκολα αναγνωρίσιμο. Από την άλλη έχει αναφερθεί σε πειράματα ηλεκτροφυσιολογίας (πχ Derrington and Lennie, 1984) ότι οι νευρώνες της οπτικής οδού αποκρίνονται περισσότερο σε μεσαίες χωρικές συχνότητες.

Η απομάκρυνση χωρικών συχνοτήτων από μία εικόνα πραγματοποιείται με χρήση φίλτρων στο χώρο των συχνοτήτων (αφού δηλαδή μετασχηματιστεί κατά Fourier). Το πιο απλό φίλτρο για την απομάκρυνση των υψηλών χωρικών συχνοτήτων, αποτελεί το ιδανικό lowpass φίλτρο (ideal lowpass filter), που έχει την ιδιότητα να 'κόβει' όλες τις υψηλής συχνότητας συνιστώσες του μετασχηματισμού Fourier που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη, από μια ορισμένη απόσταση D_0 από το κέντρο του μετασχηματισμού. Το φίλτρο αυτό περιγράφεται από τη σχέση:

$$H(u, v) = \begin{cases} 1, & D(u, v) \leq D_0 \\ 0, & D(u, v) > D_0 \end{cases}$$

Όπου D_0 είναι μία ορισμένη θετική ποσότητα (λέγεται και cutoff συχνότητα) και $D(u, v)$ είναι η απόσταση του σημείου (u, v) από το κέντρο του ορθογωνίου των συχνοτήτων. Αν το μέγεθος της εικόνας είναι $M \times N$, γνωρίζουμε ότι ο μετασχηματισμός έχει το ίδιο μέγεθος, επομένως το κέντρο του ορθογωνίου των συχνοτήτων είναι το $(u, v) = (M/2, N/2)$. Σε αυτή τη περίπτωση η απόσταση του σημείου (u, v) από το κέντρο του μετασχηματισμού είναι:

$$D(u, v) = [(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2]^{1/2}.$$



Σχήμα 2.16: Φαινόμενα ringing από φιλτράρισμα με ιδανικό lowpass φίλτρο με cutoff συχνότητα $D_0=30$.

Η ονομασία 'ιδανικό' φίλτρο δηλώνει 'κόβει' ότι όλες οι συχνότητες που βρίσκονται εκτός του κύκλου με ακτίνα D_0 , παρόλα αυτά το φίλτρο αυτό έχει μόνο θεωρητική αξία και σπάνια χρησιμοποιείται στην πράξη αφού συνοδεύεται με φαινόμενα ringing (βλ. σχήμα 2.16). Τα φίλτρα που συνήθως χρησιμοποιούνται στη πράξη είναι τα Butterworth και Gaussian φίλτρα, τα οποία και περιγράφονται παρακάτω.

Η συνάρτηση που περιγράφει ένα Butterworth lowpass φίλτρο τάξης n , με cutoff συχνότητα σε απόσταση D_0 από το κέντρο του μετασχηματισμού είναι,

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v) / D_0]^{2n}},$$

όπου η ποσότητα $D(u, v)$ περιγράφεται όπως παραπάνω. Σε αντίθεση με το ιδανικό φίλτρο, το Butterworth φίλτρο δεν παρουσιάζει μια απότομη ασυνέχεια, που διαχωρίζει τις συχνότητες που 'κόβονται' από αυτές που 'περνάνε'. Butterworth φίλτρα τάξης $n = 1$, δεν παρουσιάζουν φαινόμενα ringing. Τέτοια φαινόμενα είναι αμελητέα σε φίλτρα τάξης 2, αλλά μπορούν να γίνουν εμφανέστερα σε φίλτρα μεγαλύτερης τάξης. Να σημειωθεί ότι το προφίλ του Butterworth φίλτρου για $n = 1$ δεν παρουσιάζει αρνητικές τιμές, ενώ για $n = 2$ εμφανίζονται μικρές αρνητικές τιμές. Γενικά ένα Butterworth φίλτρο τάξης 2 αποτελεί ικανοποιητικό συμβιβασμό, ανάμεσα σε αποτελεσματικό φιλτράρισμα και φαινόμενα ringing.

Το Gaussian lowpass φίλτρο περιγράφεται από τη σχέση:

$$H(u, v) = \exp(-D^2(u, v) / 2D_0^2),$$

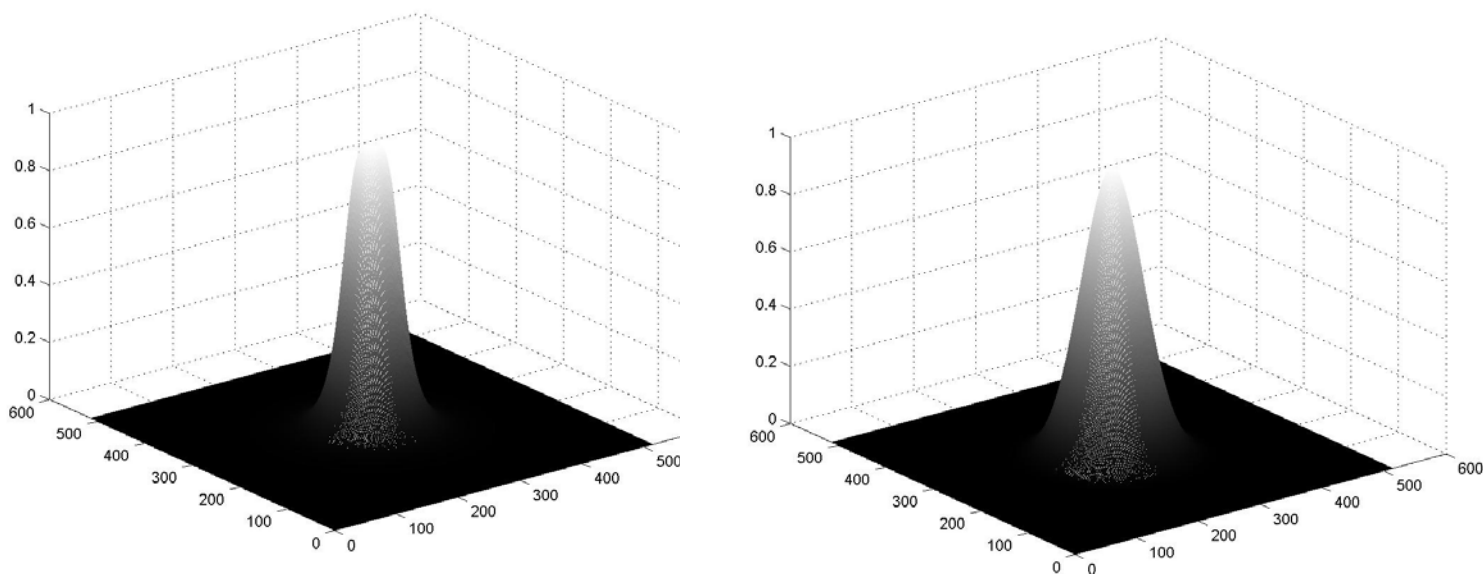
όπου D_0 είναι η cutoff συχνότητα. Επειδή ο μετασχηματισμός Fourier μιας Gaussian συνάρτησης είναι επίσης Gaussian συνάρτηση, ένα χωρικό Gaussian φίλτρο δεν παρουσιάζει φαινόμενα ringing. Όμως το Gaussian φίλτρο δεν καταφέρνει τόσο smoothing σε μία εικόνα, όσο ένα Butterworth της ίδιας cutoff συχνότητας, επειδή το προφίλ του δεν είναι τόσο στενό όσο ενός Butterworth φίλτρου τάξης 2 (βλ. σχήμα 2.17).

Έτσι σε περιπτώσεις όπου η μετάβαση από τις χαμηλότερες στις υψηλότερες συχνότητες γύρω από μία cutoff συχνότητα, δεν είναι απαραίτητο να είναι τόσο απότομη, η επιλογή ενός Gaussian φίλτρου είναι ιδανική, ακριβώς επειδή δεν συνοδεύεται από φαινόμενα ringing.

Όσον αφορά το φιλτράρισμα που 'κόβει' τις χαμηλές συχνότητες και αφήνει τις υψηλές να 'περάσουν' (highpass), περιγράφεται από τη σχέση:

$$H_{hp}(u, v) = 1 - H_{lp}(u, v),$$

όπου $H_{lp}(u, v)$ είναι η συνάρτηση του αντίστοιχου lowpass φίλτρου. Αυτό σημαίνει ότι οι συχνότητες που το lowpass φίλτρο επιτρέπει να περάσουν το highpass φίλτρο τις 'κόβει' και αντίστροφα.



Σχήμα 2.17: Butterworth lowpass φίλτρο τάξης $n = 2$ (αριστερά) και Gaussian lowpass φίλτρο (δεξιά). Και τα δύο έχουν cutoff συχνότητα ίση με 40, αλλά το Butterworth φίλτρο παρουσιάζει πιο στενό, απότομο προφίλ.

2.3.3 Φασματικό πλάτος (Fourier amplitude)

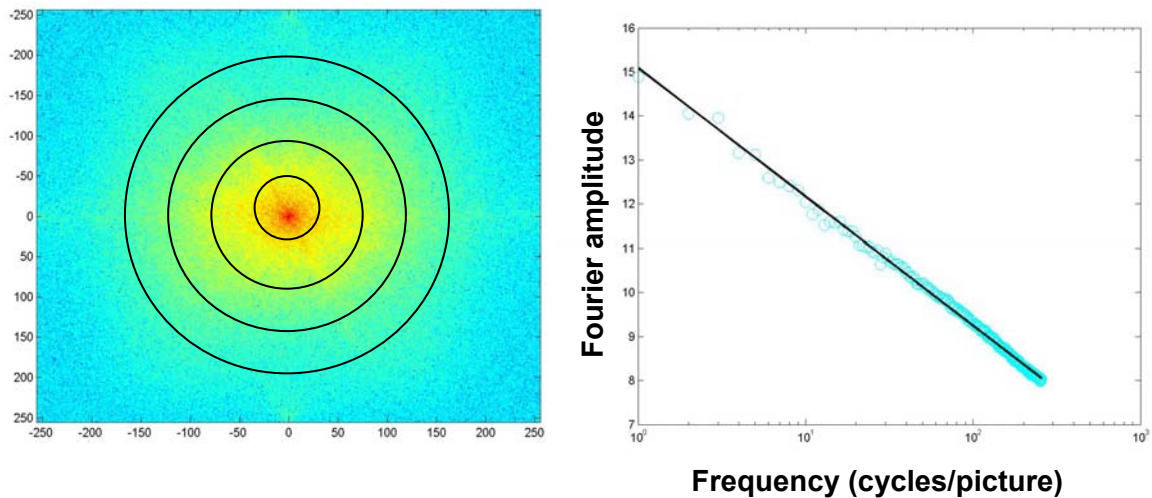
Η δυσδιάστατη αναπαράσταση του φασματικού πλάτους (Fourier amplitude) μιας εικόνας, μπορεί να παρασταθεί ως μονοδιάστατη συνάρτηση της χωρικής συχνότητας. Αυτό γίνεται υπολογίζοντας τη μέση τιμή για όλους τους προσανατολισμούς του δυσδιάστατου φασματικού πλάτους, κατά μήκος των ομόκεντρων κύκλων όπως παριστάνεται σχηματικά στο σχήμα 2.18, αριστερά. Η μονοδιάστατη συνάρτηση επομένως αποτελεί το άθροισμα του Fourier amplitude για κάθε χωρική συχνότητα, με τα φασματικά πλάτη να αθροίζονται για όλους τους προσανατολισμούς.

Όταν το φασματικό πλάτος αθροιστεί για όλους τους προσανατολισμούς και παρασταθεί σε λογαριθμικούς άξονες συναρτήσει της χωρικής συχνότητας, φθίνει γραμμικά. Έχει διαπιστωθεί σε μεγάλα δείγματα φυσικών εικόνων, ότι το φασματικό πλάτος παρουσιάζει την παρακάτω εκθετική εξάρτηση από την χωρική συχνότητα f :

$$\text{Amplitude}(f) \propto f^{-a}.$$

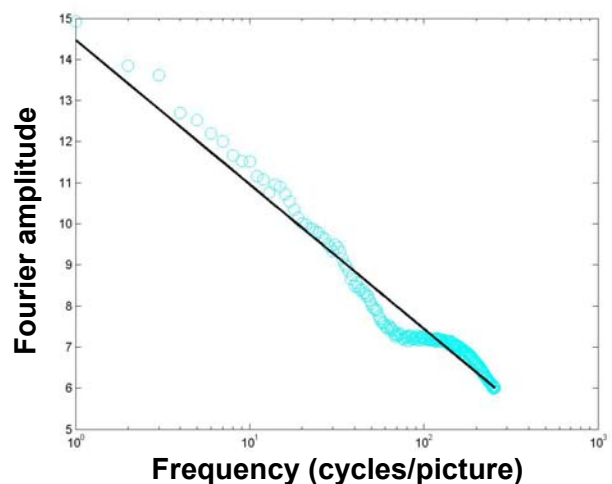
Η παράμετρος a παριστάνει την κλίση της ευθείας. Η τιμή της κλίσης a , έχει καταγραφεί στη βιβλιογραφία για μεγάλα δείγματα φυσικών εικόνων και παρουσιάζει παρόμοιες τιμές. Αν και πολλές φορές για λόγους απλούστευσης, η τιμή της κλίσης a αναφέρεται ότι είναι περίπου 1, στην πραγματικότητα η τιμή της κυμαίνεται από 0.7 - 1.6. Ο παραπάνω εκθετικός νόμος σημαίνει πως οι χωρικές συχνότητες των φυσικών εικόνων δεν αντιπροσωπεύονται εξ ίσου. Οι χαμηλές χωρικές συχνότητες έχουν μεγαλύτερη ενέργεια, από τις υψηλές συχνότητες και η μείωση αυτή είναι

μάλιστα γραμμική. Μεγαλύτερες τιμές της κλίσης a , αποδίδουν περισσότερη ενέργεια στις μικρές χωρικές συχνότητες.



Σχήμα 2.18: Η δυοδιάστατη αναπαράσταση του Fourier amplitude (αριστερά). Όταν το Fourier amplitude αθροιστεί κατά μήκος των ομόκεντρων κύκλων (ο αριθμός των κύκλων είναι ενδεικτικός) και παρασταθεί συναρτήσει της χωρικής συχνότητας σε λογαριθμικούς άξονες (δεξιά), η σχέση είναι σχεδόν γραμμική. Η τιμή της κλίσης a για το παραπάνω σχήμα είναι 1.26.

Να σημειωθεί ότι η γραμμική αυτή μείωση του πλάτους συναρτήσει της χωρικής συχνότητας αποτελεί χαρακτηριστικό των φυσικών εικόνων. Στο σχήμα 2.19 παρουσιάζεται το φασματικό πλάτος, αθροιζόμενο για όλους τους προσανατολισμούς, της εικόνας στα αριστερά.



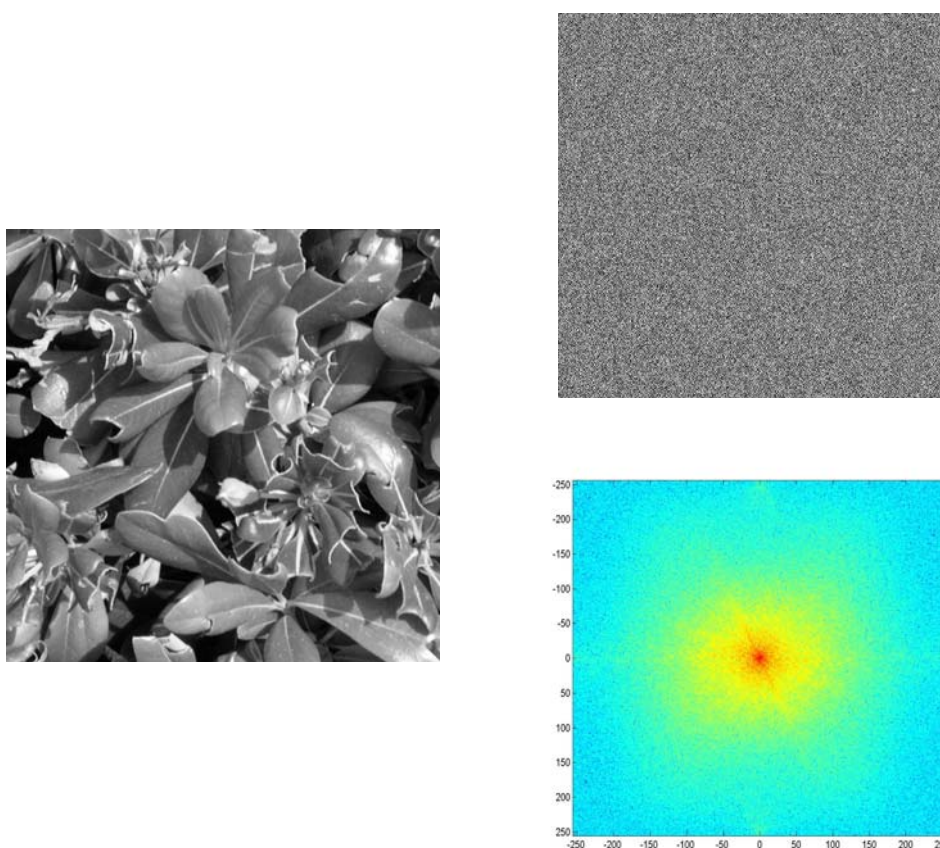
Σχήμα 2.19: Το Fourier amplitude μιας 'αστικής' εικόνας δεν παρουσιάζει γραμμικό προφίλ. Η τιμή της κλίσης a για την ευθεία που παρεμβάλλεται βέλτιστα είναι 1.52.

Η εικόνα αυτή περιέχει ανθρώπινες κατασκευές, οι οποίες παρουσιάζουν χαρακτηριστική δομή και χωρικές συχνότητες υψηλής ενέργειας σε οριζόντιους και κατακόρυφους προσανατολισμούς. Το προφίλ σε αυτή τη περίπτωση αν και παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά (οι χαμηλές

συχνότητες, περιέχουν περισσότερη ενέργεια από τις υψηλές) δεν είναι γραμμικό.

2.3.4 Η σημασία της φάσης

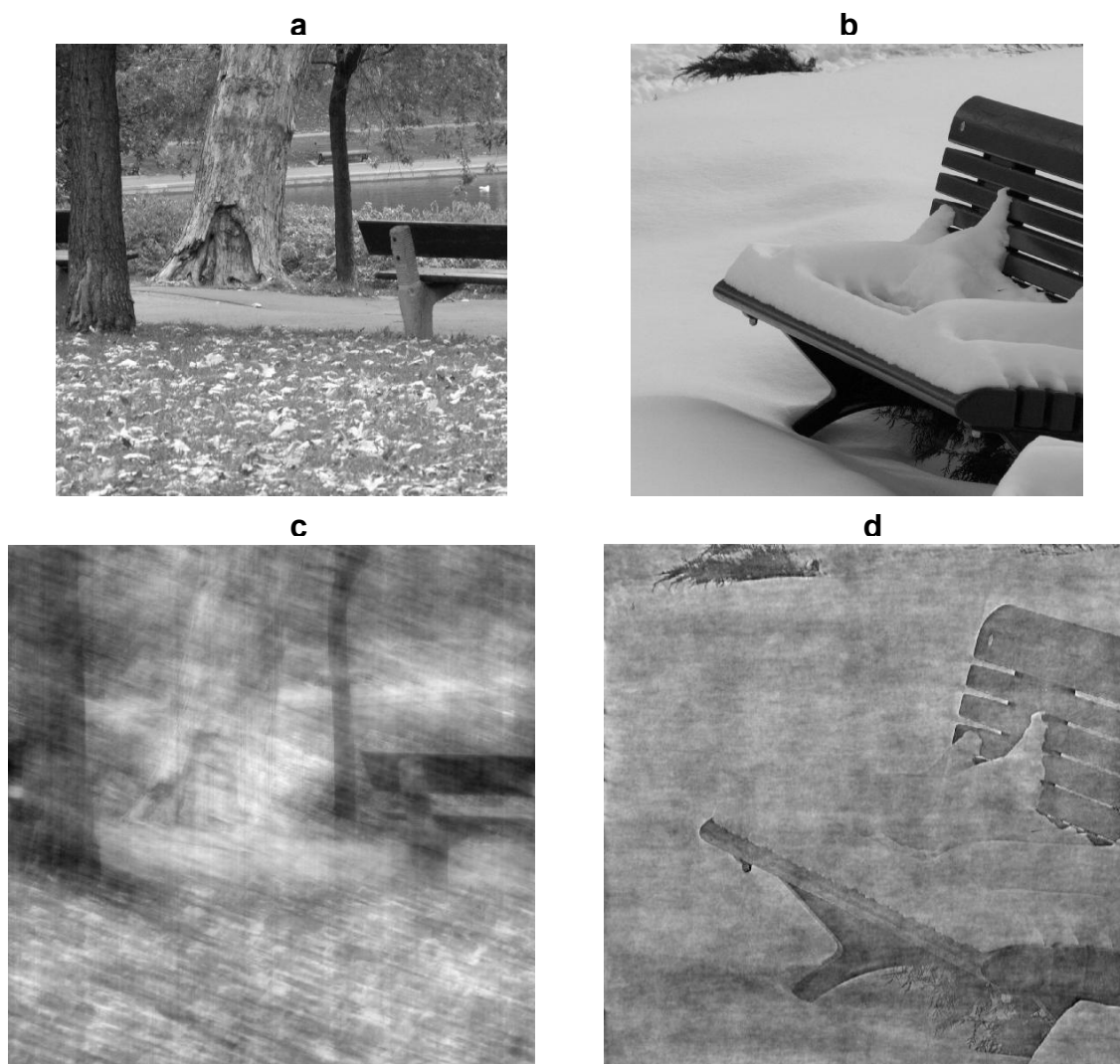
Ενώ από την εξέταση του φασματικού πλάτους μιας εικόνας, όπως είδαμε προηγουμένως, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το χωρικό φασματικό της περιεχόμενο, η φάση όμως δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη οπτικά όταν αναπαρίσταται ως εικόνα (βλ. σχήμα 2.22, πάνω-δεξιά). Παρόλα αυτά όταν κατασκευάζονται υβριδικές εικόνες οι οποίες περιέχουν το πλάτος μιας εικόνας και τη φάση μιας άλλης (Oppenheim and Lim, 1981; Piotrowski and Campbell, 1982; Sharpley et al., 1990), φαίνεται πως η φάση είναι αυτή που καθορίζει την εμφάνιση μιας εικόνας.



Σχήμα 2.21: Μία φυσική εικόνα, το amplitude (δεξιά, κάτω) και η φάση (δεξιά, πάνω) του Fourier μετασχηματισμού της. Η φάση δεν είναι οπτικά ιδιαίτερα διαφωτιστική.

Το πλάτος περιέχει λίγη πληροφορία σχετικά με το περιεχόμενο της εικόνας. Πράγματι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22, η εικόνα **c** κατασκευάστηκε με 'ανάμειξη' της φάσης της εικόνας **a** και του πλάτους της εικόνας **b**. Αν και η υβριδική εικόνα φαίνεται παραμορφωμένη, ή εμφάνισή της είναι παρόμοια με εκείνη της εικόνας που συνεισέφερε τη φάση. Ομοίως η υβριδική εικόνα **d** προέκυψε από τη φάση της εικόνας **b** και το πλάτος της εικόνας **a**. Και σε αυτή τη περίπτωση η φάση φαίνεται να μεταφέρει την περισσότερη πληροφορία.

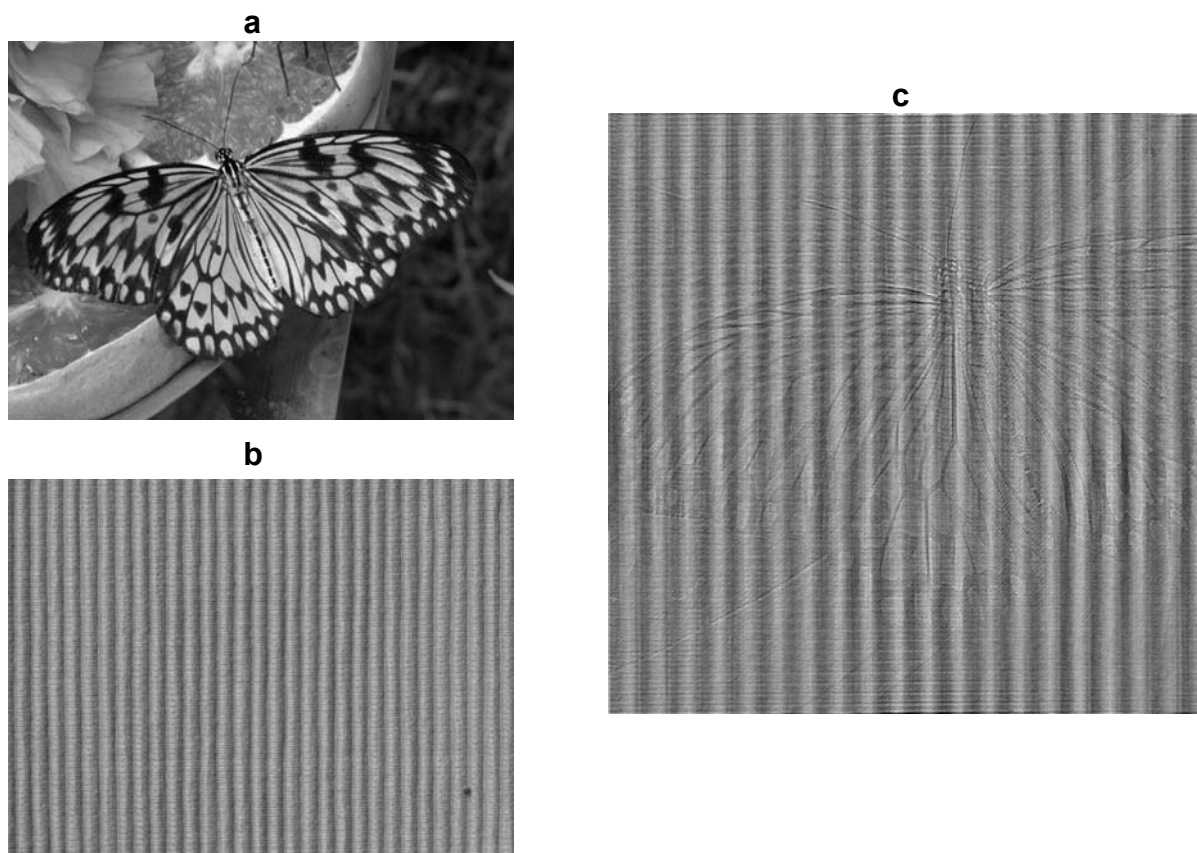
Η αλλοίωση της υβριδικής εικόνας εικάζεται ότι οφείλεται στις διαφορετικές τιμές της κλίσης a , για τις δύο εικόνες. Έτσι η υβριδική εικόνα c για παράδειγμα περιέχει την ίδια φάση με την εικόνα a αλλά η κλίση του φασματικού πλάτους, έχει μεταβληθεί από 1.26 σε 1.53 .



Σχήμα 2.22: **Η φάση κυριαρχεί.** Η υβριδική εικόνα c περιέχει τη φάση της εικόνας a και το amplitude της εικόνας b . Η εικόνα d περιέχει τη φάση της εικόνας b και το amplitude της εικόνας a . Οι τιμές των κλίσεων a είναι 1.26 για την εικόνα a και 1.53 για την εικόνα b .

Αν και η παρατήρηση ότι φάση επικρατεί ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις, φαίνεται πως σε κάποιες άλλες τα πράγματα είναι αρκετά πιο περίπλοκα. Για παράδειγμα όταν το φασματικό πλάτος δύο εικόνων είναι σημαντικά διαφορετικό, στην υβριδική εικόνα δεν είναι απαραίτητο ότι θα κυριαρχεί η φάση (Juvells et al., 1991). Μία υβριδική εικόνα, η οποία περιέχει τη φάση μιας φυσικής σκηνής και το πλάτος ενός grating, θα περιέχει πολλά από τα χαρακτηριστικά του grating. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 2.23. Η εικόνα μιας πεταλούδας (a) παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στο φασματικό πλάτος σε σχέση με το δομημένο μοτίβο της εικόνας b. Η υβριδική εικόνα c, περιέχει τη φάση της εικόνας a και το πλάτος της εικόνας b. Σε αυτή τη

περίπτωση δεν είναι η φάση αυτή που κυριαρχεί, αφού περιέχονται χαρακτηριστικά και των δύο εικόνων. Αξίζει λοιπόν εξεταστεί εάν διαφορές στην κλίση α του φασματικού πλάτους επηρεάζουν την εμφάνιση των υβριδικών εικόνων.

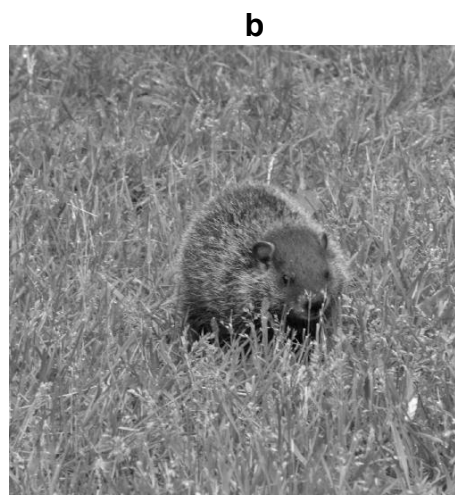


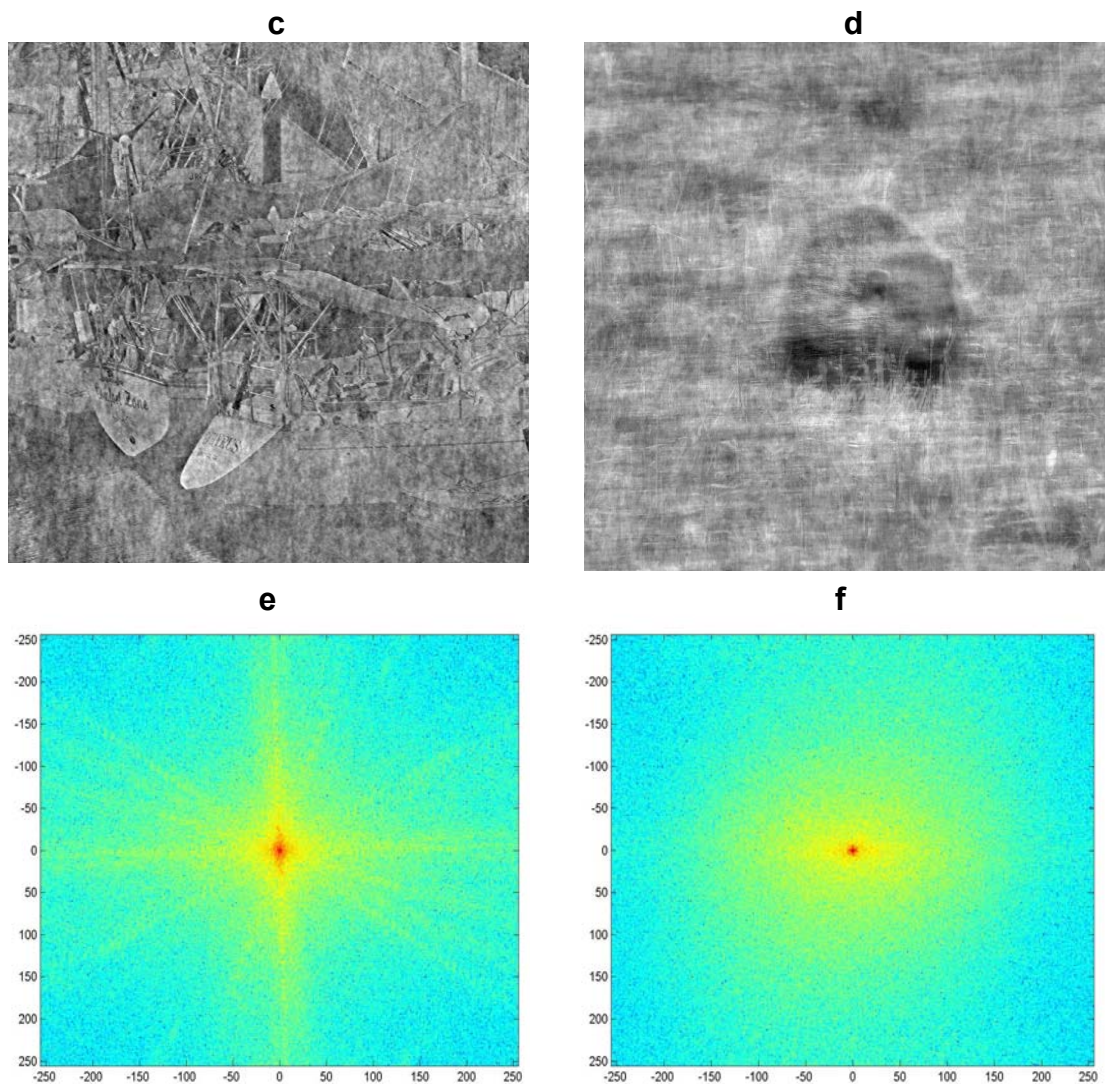
Σχήμα 2.23: Σε εικόνες με πολύ διαφορετικό φασματικό πλάτος δεν κυριαρχεί η φάση. Η υβριδική εικόνα **c** περιέχει τη φάση της εικόνας **a** και το πλάτος της εικόνας **b**. Οι τιμές των κλίσεων α είναι 1.57 για την εικόνα **a** και 1.05 για την εικόνα **b**, ενώ το προφίλ του πλάτους συναρτήσεως της χωρικής συχνότητας, για την εικόνα **b**, δεν είναι καν γραμμικό.

Έχει διαπιστωθεί ότι λεπτομέρειες στην υφή παραμορφώνονται ή χάνονται στις υβριδικές εικόνες (βλ. σχήμα 2.22) Μάλιστα οι Morgan et al. (1991), παρατήρησαν τέτοιες παραμορφώσεις και πρότειναν πως ο ρόλος του φασματικού πλάτους είναι να μεταφέρει πληροφορίες σχετικά με την αναπαραγωγή σκιών και λεπτομερειών στην υφή μιας εικόνας. Σε αυτό συμφωνούν και οι Tadmor and Tolhurst (1992) οι οποίοι παρατήρησαν πως η συνεισφορά του φασματικού πλάτους είναι περισσότερο σημαντική όταν οι σκηνές είναι πλούσιες σε υφή και σκιές. Όλα τα παραπάνω έρχονται σε αντίθεση με την επικρατούσα αντίληψη ότι η φάση είναι αυτή που καθορίζει το περιεχόμενο των υβριδικών εικόνων. Η συνεισφορά του amplitude φαίνεται πως είναι ιδιαίτερα σημαντική. Μένει να εξεταστεί σε ποια μορφή το φασματικό πλάτος επηρεάζει την εμφάνιση των υβριδικών εικόνων. Υπάρχει κάποια συσχέτιση με την τιμή της κλίσης α ;

Στο σχήμα 2.24 η υβριδική εικόνα **c** περιέχει τη φάση της εικόνας **a** και το πλάτος της εικόνας **b**, ενώ η εικόνα **d** περιέχει τη φάση της εικόνας **b** και το πλάτος της εικόνας **a**. Οι σκηνές όμως **a**, **b** του σχήματος 2.24 παρουσιάζουν παρόμοια κλίση a . Η κλίση του φασματικού πλάτους για την εικόνα **a** είναι 1.243 ενώ για την εικόνα **b** 1.231. Φαίνεται ξεκάθαρα, πως αν και οι τιμές της κλίσης a έχει μεταβληθεί ελάχιστα για τις υβριδικές εικόνες, αυτές παρουσιάζουν μεγάλες παραμορφώσεις σε σχέση με τις εικόνες που συνεισέφεραν τη φάση. Η υβριδική εικόνα **c** για παράδειγμα και έχει την ίδια φάση με την εικόνα **a** και σχεδόν ίση τιμή για την κλίση a , παρουσιάζει μικρή ομοιότητα με την εικόνα **a**. Επομένως το φασματικό πλάτος των εικόνων **a**, **b** πρέπει να διαφέρει με τέτοιο τρόπο, που να μην περιγράφεται από την απλή μετρική a , η οποία αποτελεί το άθροισμα του φασματικού πλάτους, για κάθε χωρική συχνότητα τα amplitudes αθροίζονται για όλους τους προσανατολισμούς. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να εξεταστούν οι λεπτομέρειες των φασματικών πλατών. Τα σχήματα **e**, **f** παρουσιάζουν τις δυσδιάστατες αναπαραστάσεις των amplitudes για τις εικόνες **a**, **b** αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι αν και το φασματικό πλάτος (αθροιζόμενο για όλους τους προσανατολισμούς) περιγράφεται από παρόμοια τιμή a , η κατανομή της ενέργειας διαφέρει τόσο για τους διάφορους προσανατολισμούς, όσο και για τις διάφορες χωρικές συχνότητες.

Συνοψίζοντας, το πλάτος και η φάση είναι και τα δύο σημαντικά για τον αξιόπιστο προσδιορισμό μιας εικόνας. Επίσης αν και η τιμή της κλίσης, a , μπορεί να είναι παρόμοια για διαφορετικές εικόνες, κάθε ρεαλιστική περιγραφή του φασματικού πλάτους πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια κατανέμεται στους διάφορους προσανατολισμούς.

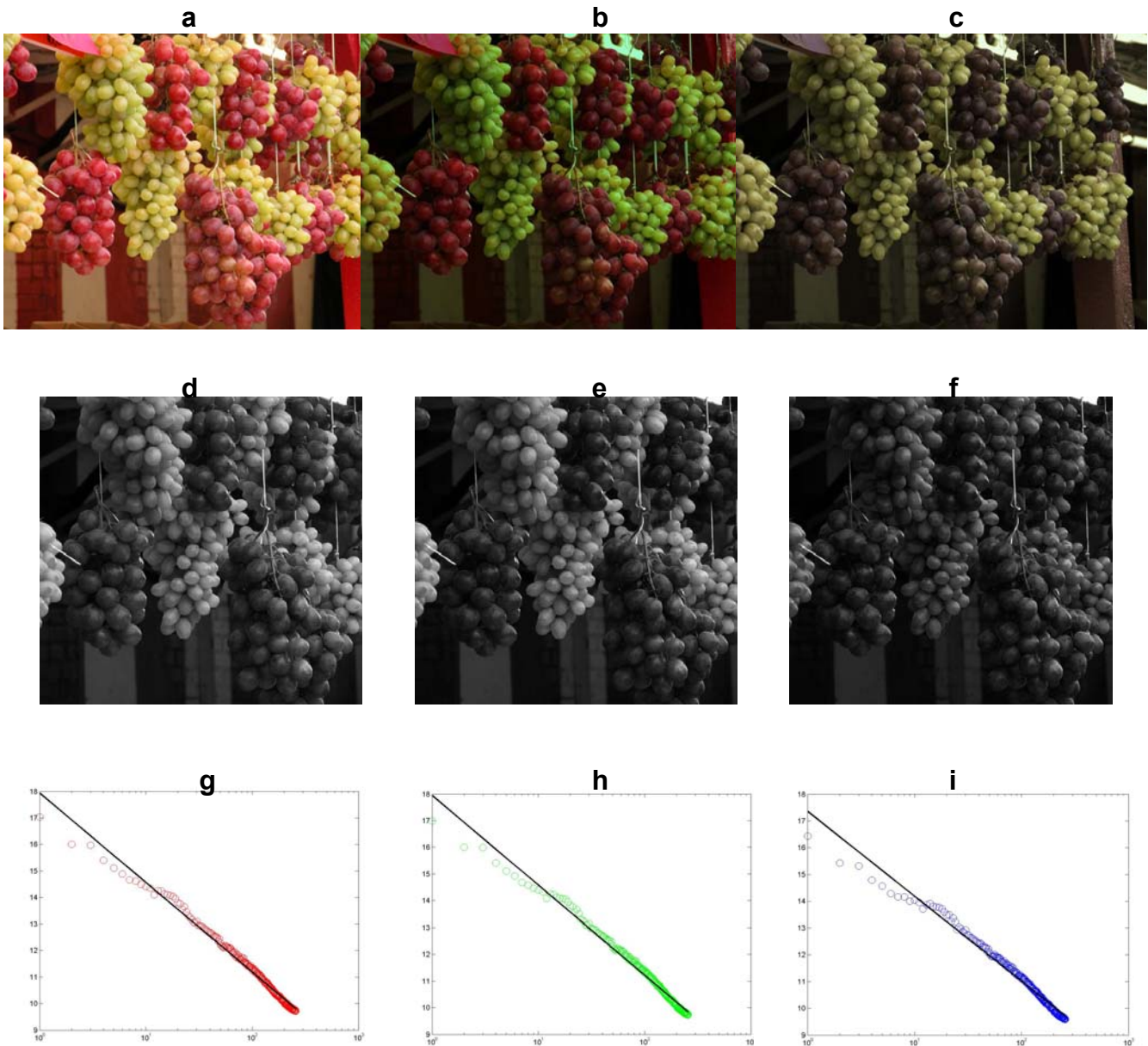




Σχήμα 2.24: Η υβριδική εικόνα **c** περιέχει τη φάση της εικόνας **a** και το πλάτος της εικόνας **b**. Η εικόνα **d** περιέχει τη φάση της εικόνας **b** και το πλάτος της εικόνας **a**. Οι τιμές των κλίσεων α είναι 1.2431 για την εικόνα **a** και 1.2314 για την εικόνα **b**. Τα σχήματα **e**, **f** παριστάνουν τη δυοδιάστατη αναπαράσταση του φασματικού πλάτους των εικόνων **a**, **b** αντίστοιχα.

2.4 Χρωματική ανάλυση φυσικών εικόνων

Η χρωματική ανάλυση των φυσικών εικόνων αποκαλύπτει πως το φασματικό πλάτος παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τις αχρωματικές εικόνες. Για να εξεταστεί αυτό, αφαιρείται από της εικόνας η παραμόρφωση που εισάγεται από την συνάρτηση γάμμα και στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή των εικόνων από τις RGB χρωματικές συντεταγμένες στις LMS, ώστε να προσομοιωθούν οι αποκρίσεις των κωνίων του ανθρώπινου αμφιβληστροειδούς, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στο σχήμα 2.20, **b** παρουσιάζεται η γραμμικοποιημένη εκδοχή της αρχικής εικόνας **a**, ενώ η εικόνα **c** αποτελεί την θεωρητική απόκριση των LMS κωνίων σύμφωνα με τη



Σχήμα 2.20: Η αρχική εικόνα (a), η εικόνα (a) μετά την αφαίρεση της συνάρτησης γάμμα (b), οι θεωρητικές αποκρίσεις των κωνίων συνολικά (c). Οι αποκρίσεις των L, M, S κωνίων αντίστοιχα (d, e, f). Τα φασματικά πλάτη των εικόνων d, e, f αντίστοιχα (g, h, i). Οι τιμές των κλίσεων α είναι 1.465, 1.461 και 1.378 αντίστοιχα.

φασματική απορρόφηση των φωτουποδοχέων όπως υπολογίστηκε από τους Smith και Pokorny (1975) (βλ. Παράρτημα II). Να σημειωθεί σχετικά με τις εικόνες **b**, **c** ότι είτε αυτές προβάλλονται σε μη γραμμική οθόνη, είτε εκτυπώνονται σε μη γραμμικό εκτυπωτή, τα χρώματα πιθανόν να παρουσιάζονται αλλοιωμένα. Επομένως για τη διενέργεια ψυχοφυσικών μετρήσεων, όπου η γραμμικοποιημένη εικόνα **b** θα προβάλλεται σε οθόνη είναι απαραίτητη η αφαίρεση της συνάρτησης γάμμα της οθόνης. Ενώ λοιπόν η εικόνα **b** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή ψυχοφυσικών μετρήσεων, η εικόνα **c** προσφέρεται για ανάλυση των στατιστικών χαρακτηριστικών της. Οι εικόνες **d**, **e** και **f** περιέχουν τις αποκρίσεις των L, M και S κωνίων αντίστοιχα. Περιοχές στις οποίες η εικόνα **d** παρουσιάζει

μεγαλύτερη φωτεινότητα, αποτελούν περιοχές στις οποίες τα L κωνία αποκρίνονται πιο έντονα. Στα σχήματα **g**, **h** και **i** παριστάνεται γραφικά το φασματικό πλάτος συναρτήσει της χωρικής συχνότητας για τις εικόνες που περιγράφουν τις αποκρίσεις των L, M και S κωνίων αντίστοιχα. Η ενέργεια για τα S κωνία είναι ελαφρώς μικρότερη από ότι για τα L και M, η εικόνα **c** περιέχει λιγότερη μπλε πληροφορία. Οι τιμές των κλίσεων α για τα σχήματα **g**, **h** και **i** είναι 1.465, 1.461 και 1.378 αντίστοιχα.

2.5 Συζήτηση

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου ήταν: Πρώτον η συλλογή της απαραίτητης τεχνογνωσίας η οποία παρουσιάζεται με τη μορφή τυποποιημένης μεθόδου, όσον αφορά τη βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και δεύτερον η ανάπτυξη κατάλληλων υπολογιστικών αλγορίθμων για την επεξεργασία των εικόνων και την ανάλυση των στατιστικών χαρακτηριστικών τους.

Η βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής, η εκτίμηση δηλαδή της συνάρτησης γάμμα και η αφαίρεση της, επιτρέπει την γραμμική συσχέτιση των αποκρίσεων των αισθητήρων της φωτογραφικής μηχανής (έξοδος), με την εισερχόμενη φωτεινότητα (είσοδος). Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η αξιόπιστη ανάλυση των στατιστικών χαρακτηριστικών των φυσικών εικόνων και μελλοντικά, η διενέργεια ψυχοφυσικών μεθόδων με αυτές.

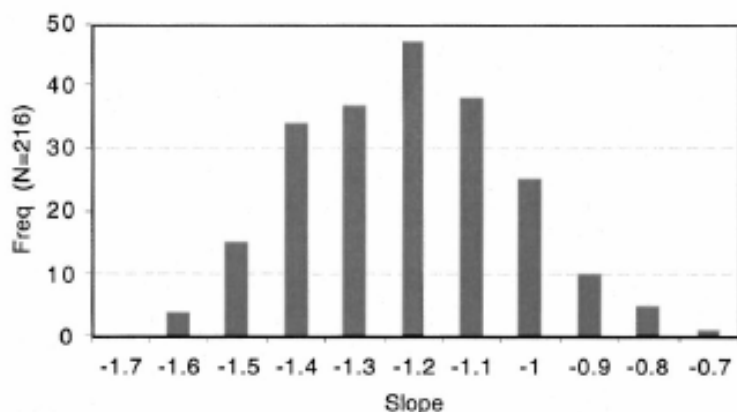
Ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση και τη μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών των φυσικών εικόνων. Η δυσδιάστατη αναπαράσταση του φασματικού πλάτους παρέχει πληροφορίες σχετικά με το χωρικό φασματικό περιεχόμενο μιας εικόνας, της χωρικές συχνότητες δηλαδή από τις οποίες αποτελείται, την ενέργεια αυτών των συχνοτήτων, καθώς και την κατανομή της ενέργειας στους διάφορους προσανατολισμούς. Για παράδειγμα 'αστικές' εικόνες, εικόνες δηλαδή οι οποίες περιέχουν ανθρώπινες κατασκευές, παρουσιάζουν χωρικές συχνότητες των οποίων η ενέργεια είναι έντονα προσανατολισμένη στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση.

Το περιεχόμενο σε χωρικές συχνότητες μιας εικόνας καθορίζει με διαφορετικό τρόπο τη μορφή της. Οι υψηλές χωρικές συχνότητες σχετίζονται με τα άκρα και τις ακμές μίας εικόνας, τις απότομες δηλαδή μεταβολές στις τιμές της φωτεινότητας, ενώ μεσαίες και χαμηλές χωρικές συχνότητες σχετίζονται με τις πιο ομαλές μεταβολές. Μία εικόνα από την οποία έχουν αφαιρεθεί οι υψηλές συχνότητες συνεχίζει να διατηρεί το περιεχόμενο και τη μορφή της, απουσιάζουν όμως οι ακμές (βλ. σχήμα 2.15). Οι ακμές είναι αυτές που καθιστούν ένα πρόσωπο ή ένα αντικείμενο αναγνωρίσιμο, όπως έχει διαπιστωθεί και με ψυχοφυσικές μετρήσεις.

Ο μετασχηματισμός Fourier, είναι μιγαδικός αριθμός και χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους, το μέτρο του αριθμού και τη φάση του. Το μέτρο συχνά αναφέρεται ως φασματικό πλάτος ή Fourier amplitude. Στην παρούσα εργασία επιβεβαιώθηκε ο εκθετικός $f^{-\alpha}$ νόμος που περιγράφει το φασματικό πλάτος των φυσικών εικόνων, όταν αθροιστεί για όλους τους

προσανατολισμούς. Όταν μάλιστα παρασταθεί σε λογαριθμικούς άξονες συναρτήσει της χωρικής συχνότητας, το φασματικό πλάτος μειώνεται σχεδόν γραμμικά, με το a να αντιστοιχεί στην κλίση αυτής της ευθείας. Η γραμμική μορφή δεν εμφανίζεται σε εικόνες στις οποίες κυριαρχούν ανθρώπινες κατασκευές ή άλλα δομημένα αντικείμενα.

Η κλίση a παρουσιάζει παρόμοιες τιμές για μεγάλο αριθμό φυσικών αχρωματικών εικόνων. Γενικά στην βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί τιμές για την κλίση a σε φυσικές εικόνες μεταξύ 0.7 και 1.6 (βλ. Πίνακα 1.1, σχήμα 2.25) οι οποίες επίσης επιβεβαιώθηκαν.



Σχήμα 2.25: Συχνότητα κατανομής των κλίσεων a , 216 βαθμονομημένων φυσικών σκηνών επιλεγμένων τυχαία από τη βάση δεδομένων του van Hateren (Bex and Makous, 2002).

Ενώ από την εξέταση του φασματικού πλάτους μιας εικόνας, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το φασματικό περιεχόμενο της εικόνας, η φάση δεν παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα όταν αναπαρίσταται ως εικόνα. Παρόλα αυτά όταν κατασκευάζονται υβριδικές εικόνες οι οποίες περιέχουν το πλάτος μιας εικόνας και τη φάση μιας άλλης φαίνεται πως η φάση είναι αυτή που καθορίζει την εμφάνιση της υβριδικής εικόνας. Μία πιο προσεκτική μελέτη των υβριδικών εικόνων αποκαλύπτει ότι το πλάτος και η φάση είναι και τα δύο σημαντικά για τον αξιόπιστο προσδιορισμό μιας εικόνας. Σε περιπτώσεις όπου η τιμή της κλίσης a είναι παρόμοια για διαφορετικές εικόνες, κάθε ρεαλιστική περιγραφή του φασματικού πλάτους πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια κατανέμεται στους διάφορους προσανατολισμούς.

Όσο αφορά το χρωματικό περιεχόμενο των φυσικών εικόνων, οι γραμμικοποιημένες εικόνες, από τις RGB χρωματικές συντεταγμένες μετασχηματίστηκαν στις LMS χρωματικές συντεταγμένες, με χρήση των συναρτήσεων απορρόφησης των κωνίων όπως υπολογιστήκαν από τους Smith και Pokorny (1975) και παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Στη συνέχεια οι LMS εικόνες αναλύθηκαν στις L, M, και S συνιστώσες, προσομοιώνοντας τις αποκρίσεις των κόκκινων, πράσινων και μπλε κωνίων ξεχωριστά. Οι εικόνες αυτές είναι αχρωματικές. Τα σημεία (pixels) στα οποία οι τιμές της φωτεινότητας είναι μεγαλύτερες, αντιστοιχούν σε σημεία στα οποία η απόκριση του αντίστοιχου φωτουποδοχέα είναι μεγαλύτερη. Υπολογίστηκε το

φασματικό πλάτος για καθεμία από τις εικόνες αυτές, αθροίστηκε για όλους τους προσανατολισμούς και παραστάθηκε γραφικά συναρτήσει της χωρικής συχνότητας σε λογαριθμικούς άξονες. Η μορφή που παρουσιάζει είναι γραμμική και παρόμοια με αυτή των αχρωματικών εικόνων. Τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Parraga et al., 1998, 2002). Η ενέργεια που περικλείει κάθε χρωματική συνιστώσα εξαρτάται από το χρωματικό περιεχόμενο της εικόνας και το ίδιο ισχύει για την κλίση a .

3. ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ GRATINGS

3.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 1 τονίστηκε ότι το Michelson contrast των απλών ερεθισμάτων (π.χ. gratings), αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο για την περιγραφή της οπτικής τους επεξεργασίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα γαγγλιακά κύτταρα της οπτικής οδού δεν αποκρίνονται στο διάχυτο φωτισμό, αλλά σε αλλαγές της φωτεινότητας, και αυτό λόγω της δομής των υποδεκτικών πεδίων. Στην περίπτωση όμως πιο σύνθετων ερεθισμάτων όπως τα σύνθετα (compound) gratings και οι φυσικές εικόνες, το Michelson contrast δεν περιγράφει ικανοποιητικά την οπτική επεξεργασία τους. Ως αποτέλεσμα διάφοροι άλλοι παράμετροι (local contrast, RMS contrast) έχουν χρησιμοποιηθεί.

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σειρά ψυχοφυσικών πειραμάτων με σκοπό την εύρεση μιας μετρικής contrast η οποία να συσχετίζεται ικανοποιητικά με τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος. Η εύρεση μιας τέτοιας μετρικής επιτρέπει: πρώτον, την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το οπτικό σύστημα κωδικοποιεί το τοπικό contrast απλούστερων ερεθισμάτων όπως τα gratings και δεύτερον, την πιθανή συσχέτιση του τρόπου επεξεργασίας απλών ερεθισμάτων με πιο σύνθετα ερεθίσματα όπως οι φυσικές εικόνες.

Για την καταγραφή των αποκρίσεων του οπτικού συστήματος σε πολλές διαφορετικές τιμές contrast, πραγματοποιήθηκαν ψυχοφυσικές μετρήσεις για τιμές contrast κοντά στην ουδό/threshold, καθώς και για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού (suprathreshold). Η συμπεριφορά του οπτικού συστήματος για τιμές contrast κοντά στην ουδό αξιολογήθηκε με τη μέτρηση της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity), ενώ για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού με την καταγραφή των οπτικών χρόνων αντίδρασης (Visual Reaction Times - RTs), (βλ. Κεφάλαιο 1 για την περιγραφή των διαδικασιών).

3.2 Μεθοδολογία

3.2.1 Εξοπλισμός

Τα ερεθίσματα παρουσιάστηκαν σε μία οθόνη Sony GDM F-520 CRT, με ρυθμό ανανέωσης 120 Hz και μέγιστη ανάλυση 2048 x 1536 της οποίας η μέση φωτεινότητα ήταν 30 cd/m². Οι λειτουργίες γάμμα της οθόνης (gamma functions) για το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε χρωματικό «κανάλι» βαθμονομήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια με φασματοραδιόμετρο (PR650, Photoresearch, Chatsworth, USA). Με την πραγματοποίηση της διαδικασίας βαθμονόμησης των «χρωματικών καναλιών» της οθόνης, επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων χρωματικότητας (X,Y - του χρωματικού φάσματος CIE) και φωτεινότητάς τους (ίση με 0,01 cd/m²). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε η άρτια και ακριβής αξιολόγηση της φωτεινής και χρωματικής ευαισθησίας του οφθαλμού σε διάφορα ερεθίσματα (με ελεγχόμενο μέγεθος, σχήμα, χρώμα, φωτεινότητα, contrast και κίνηση). Τα

ερεθίσματα αναπαρήχθησαν από μία VSG 2/5 (Cambridge Research Systems (CRS), Rochester, UK) κάρτα γραφικών, με 15-bit ανάλυση ανά χρωματικό κανάλι. Οι εξεταζόμενοι αποκρίνονταν με το πάτημα ενός κουμπιού της συσκευής CB6 (Cambridge Research Systems (CRS), Rochester, UK). Η σύνδεση της συσκευής απόκρισης με την κάρτα VSG 2/5 ήταν ασύρματη και πραγματοποιούνταν μέσω υπερύθρων.

3.2.2 Εξεταζόμενοι

Οι εξεταζόμενοι ήταν δύο (SP και TG), οι οποίοι είχαν πρότερη εμπειρία σε ψυχοφυσικές μετρήσεις. Ο SP ήταν άνδρας 35 ετών και η TG γυναίκα 25 ετών. Οι δύο εξεταζόμενοι ήταν διορθωμένοι για διαθλαστικά σφάλματα για την απόσταση των δύο μέτρων στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και κανένας από τους δύο δεν παρουσίαζε κάποια παθολογία. Τα δεδομένα συγκεντρωθήκαν από τον κυρίαρχο (dominant) οφθαλμό των δύο εξεταζόμενων, ώστε να καταστεί δυνατή η μελέτη της ευαισθησίας προσανατολισμού. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με φυσική κόρη, μέσα σε σκοτεινό δωμάτιο.

3.2.3 Ερεθίσματα (απλά και σύνθετα gratings)

Τα ερεθίσματα αποτελούσαν απλά και σύνθετα gratings. Η εξίσωση που περιγράφει τη διαμόρφωση του προφίλ φωτεινότητας ενός απλού ημιτονοειδούς grating με μηδενική αρχική φάση ($\phi=0$), υπενθυμίζεται ότι είναι,

$$L(x) = L_{mean}[1 + C \sin(2\pi Fx)], \quad (\text{Εξ. 3.1}),$$

όπου $L(x)$ η φωτεινότητα στην θέση x , L_{mean} είναι η μέση φωτεινότητα της οθόνης, C το contrast και F η χωρική συχνότητα του grating. Η γραφική αναπαράσταση του προφίλ φωτεινότητας παριστάνεται στο σχήμα 3.1 (κάτω) με την μαύρη συνεχή γραμμή.

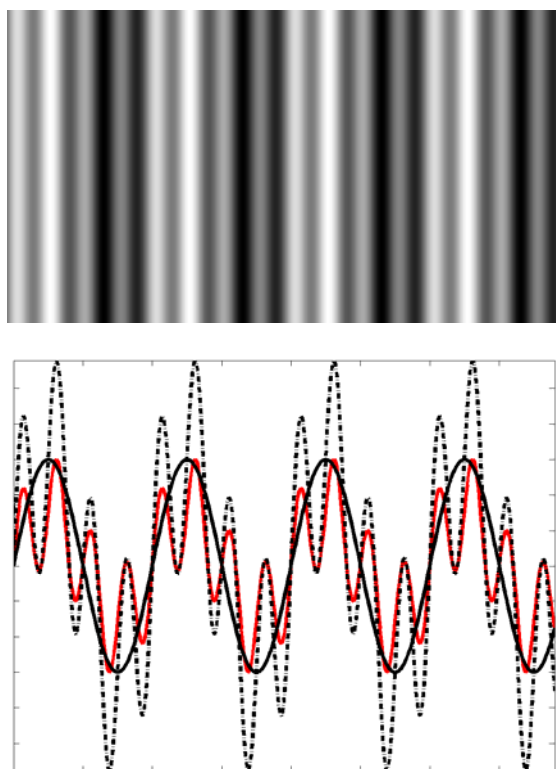
Η δημιουργία ενός σύνθετου grating πραγματοποιείται με απλή άθροιση των προφίλ φωτεινότητας δύο απλών grating. Η εξίσωση που περιγράφει τη διαμόρφωση της φωτεινότητας ενός τέτοιου σύνθετου grating με μηδενικές αρχικές φάσεις ($\phi_1 = \phi_2 = 0$), υπενθυμίζεται ότι είναι,

$$L(x) = L_{mean}\{1 + C[\sin(2\pi F_1x) + \sin(2\pi F_2x)]\} \quad (\text{Εξ. 3.2}),$$

όπου F_1 , F_2 οι συχνότητες των δύο απλών gratings. Η γραφική αναπαράσταση του προφίλ φωτεινότητας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 (κάτω) με την μαύρη διακεκομμένη γραμμή. Το σύνθετο grating παρουσιάζει μεγαλύτερο πλάτος (μεγαλύτερη μέγιστη και μικρότερη ελάχιστη τιμή), έχει δηλαδή μεγαλύτερο Michelson contrast⁷, C_M , από τα απλά gratings, γεγονός που το καθιστά πιο ανιχνεύσιμο.

⁷ Υπενθυμίζεται ότι το Michelson contrast ορίζεται ως $C_M = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$, όπου L_{max} η μέγιστη και L_{min} η ελάχιστη φωτεινότητα του grating.

Με σκοπό την αποφυγή της αύξησης της ανιχνευσιμότητας του σύνθετου grating λόγω της αύξησης του Michelson contrast, τα σύνθετα gratings που χρησιμοποιήθηκαν ως ερεθίσματα στις ψυχοφυσικές μετρήσεις της παρούσας εργασίας, δημιουργήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν το ίδιο Michelson contrast με τα απλά gratings. Οποιαδήποτε διαφορά στην ανιχνευσιμότητα του σύνθετου grating θα μπορούσε σε αυτή την περίπτωση να αποδοθεί σε διαφορές του τοπικού contrast.



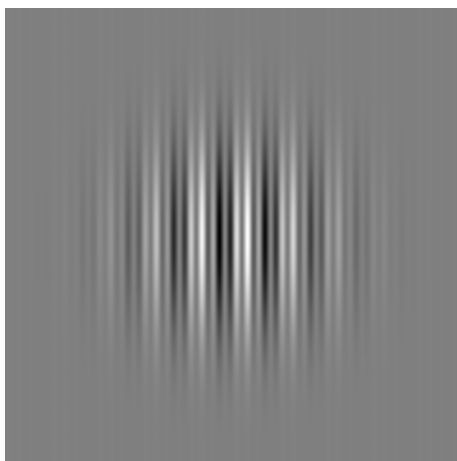
Σχήμα 3.1: Σύνθετο grating (πάνω), το οποίο αποτελείται από απλά gratings των οποίων οι χωρικές συχνότητες παρουσιάζουν αναλογία 4:1. Προφίλ φωτεινότητας (κάτω) απλού grating (μαύρη συνεχής γραμμή, Εξ. 3.1), σύνθετου grating (μαύρη διακεκομμένη γραμμή, Εξ. 3.2) και του σύνθετου grating που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη (κόκκινη γραμμή, Εξ. 3.3).

Για να έχει το σύνθετο grating το ίδιο contrast με αυτό του απλού grating εισήχθη στην εξίσωση 3.2 ένας παράγοντας μείωσης του contrast, K . Η εξίσωση λοιπόν που περιγράφει τη διαμόρφωση της φωτεινότητας των σύνθετων gratings που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη έχει τη μορφή,

$$L(x) = L_{mean}\{1+K * C[\sin(2\pi F_1 x) + \sin(2\pi F_2 x)]\}, \text{ (Εξ. 3.3)}$$

όπου K η σταθερά που χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση του συνολικού Michelson contrast του σύνθετου grating. Η γραφική αναπαράσταση του προφίλ φωτεινότητας, του σύνθετου grating που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 (κάτω) με τη κόκκινη γραμμή.

Οι ακμές που δημιουργούνται στο σύνορο του ερεθίσματος με την οθόνη είναι δυνατόν να επηρεάσουν την ανιχνευσιμότητα του grating. Για αυτό το λόγο τα ερεθίσματα πολλαπλασιάστηκαν με μία συνάρτηση Gabor, η οποία έχει τη μορφή Gaussian συνάρτησης, με διάμετρο 100 pixels στο μισό ύψος του Gaussian προφίλ και με τυπική απόκλιση 1.2 deg όταν μετρήθηκε από απόσταση 2 m. Η ομαλή μείωση της φωτεινότητας στα άκρα του ερεθίσματος 'σβήνει' τις ακμές, που διαφορετικά θα καθιστούσαν το ερέθισμα πιο ανιχνεύσιμο (βλ. σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Σύνθετο grating πολλαπλασιασμένο με μία συνάρτηση Gabor. Η ομαλή μείωση της φωτεινότητας στα άκρα του ερεθίσματος 'σβήνει' τις ακμές, που διαφορετικά θα καθιστούσαν το ερέθισμα πιο ανιχνεύσιμο.

Τα απλά gratings είχαν χωρικές συχνότητες 1, 4, και 16 c/deg και τα σύνθετα gratings 1+4 και 4+16 c/deg. Οι συνιστώσες των σύνθετων gratings είχαν τον ίδιο προσανατολισμό. Η παρουσίαση των σύνθετων gratings κατέστη δυνατή με διαδοχική αναπαράσταση των απλών συνιστωσών τους, με ρυθμό ανανέωσης 60 Hz. Η ευαισθησία εξετάστηκε σε εννέα διαφορετικούς προσανατολισμούς (0, 22.5, 45, 67.5, 90, 122.5, 145, 167.5, 180 deg)

Για την περιγραφή του contrast των ερεθισμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις μετρικές. Η πρώτη ήταν το Michelson, C_M , contrast το οποίο λαμβάνει υπόψη τη μέγιστη και την ελάχιστη φωτεινότητα του ερεθίσματος (βλ. παραπάνω), η δεύτερη το root-mean-square (RMS) contrast, C_{RMS} , το οποίο περιγράφει την τυπική απόκλιση των τιμών της φωτεινότητας (βλ. ενότητα 1.3.1) και τέλος μια μέτρηση του τοπικού contrast C_L , κατά την οποία γίνεται μια καταγραφή του Michelson contrast για όλες τις γειτονικές μπάρες (τα γειτονικά ακρότατα του προφίλ της φωτεινότητας του σχήματος 3.1) του grating και λαμβάνεται το μέγιστο αυτών των τιμών.

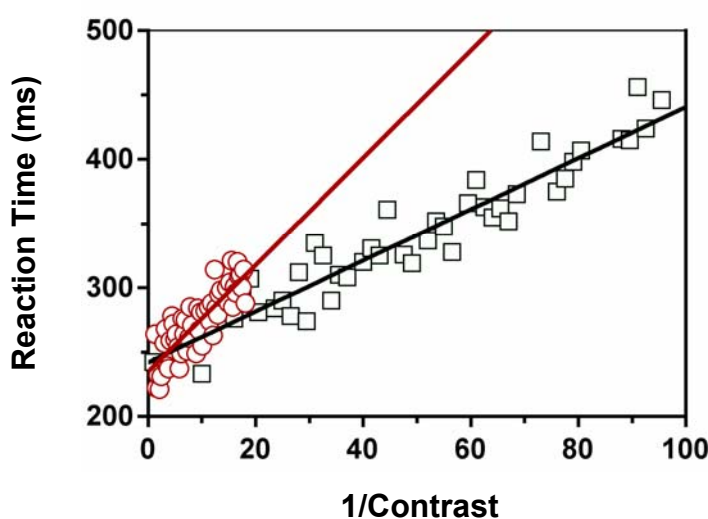
3.2.4 Πειραματική διαδικασία

3.2.4.1 Μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης

Κατά την εξέταση της μονόφθαλμης ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) ο εξεταζόμενος αυξομείωνε το contrast του ερεθίσματος (method of adjustment) και κατέγραφε την ελάχιστη τιμή contrast C_{min} (ουδός/threshold) για την οποία το ερέθισμα ήταν ορατό. Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης εξετάστηκε για τα απλά και τα σύνθετα gratings, και για τους εννέα διαφορετικούς προσανατολισμούς. Πραγματοποιήθηκαν από τρεις έως έξι μετρήσεις για καθένα από τα 5 ερεθίσματα, στους 9 διαφορετικούς προσανατολισμούς και υπολογίστηκε η μέση τιμή.

3.2.4.2 Μετρήσεις χρόνων αντίδρασης

Οι μονόφθαλμοι χρόνοι αντίδρασης καταγράφηκαν και για τα 5 ερεθίσματα σε όλους τους προσανατολισμούς, και για διαφορετικές τιμές Michelson contrast, από το μέγιστο contrast (100%) μέχρι την τιμή $2^* C_{min}$, σε 64 βήματα της κλίμακας $1/Contrast$. Τιμές χρόνων αντίδρασης μικρότερες από 200 ms και μεγαλύτερες από 600 ms αποκλείστηκαν. Κατά τη μέτρηση των χρόνων αντίδρασης το ερέθισμα εμφανιζόταν/εξαφανιζόταν με ένα χρονικό προφίλ τετραγωνικής διαμόρφωσης.



Σχήμα 3.3: Υπολογισμός του RT –gain. Η ποσότητα $1/Contrast$ μεταβαλλόταν από τη μέγιστη (1) στην $2^* C_{min}$ σε 64 βήματα. Για κάθε τιμή contrast καταγραφόταν ο χρόνος αντίδρασης. Η ποσότητα RT-gain υπολογίστηκε ως το αντίστροφο της κλίσης της ευθείας. Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζονται οι χρόνοι αντίδρασης για ένα κάθετο (90 deg) σύνθετο grating (1+4 c/deg, κόκκινη γραμμή) και για ένα απλό ημιτονοειδούς διαμόρφωσης grating (4 c/deg, μαύρη γραμμή). Οι τιμές των κλίσεων είναι 1.99 και 4.17 αντίστοιχα. Η ευθεία με τη μικρότερη κλίση (μαύρη γραμμή) αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ευαισθησία. Το RT-gain είναι 0.50 και 0.24 αντίστοιχα.

Η σχέση των χρόνων αντίδρασης, όταν παρασταθούν γραφικά συναρτήσει του $1/Contrast$, είναι ισχυρά γραμμική (βλ. Plainis and Murray, 2000, σχήμα

3.3). Το αντίστροφο της κλίσης αυτής της ευθείας καλείται RT-gain και αποτελεί μέτρο της ευαισθησίας για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού (suprathreshold), (βλ. Κεφάλαιο 1).

3.3 Αποτελέσματα

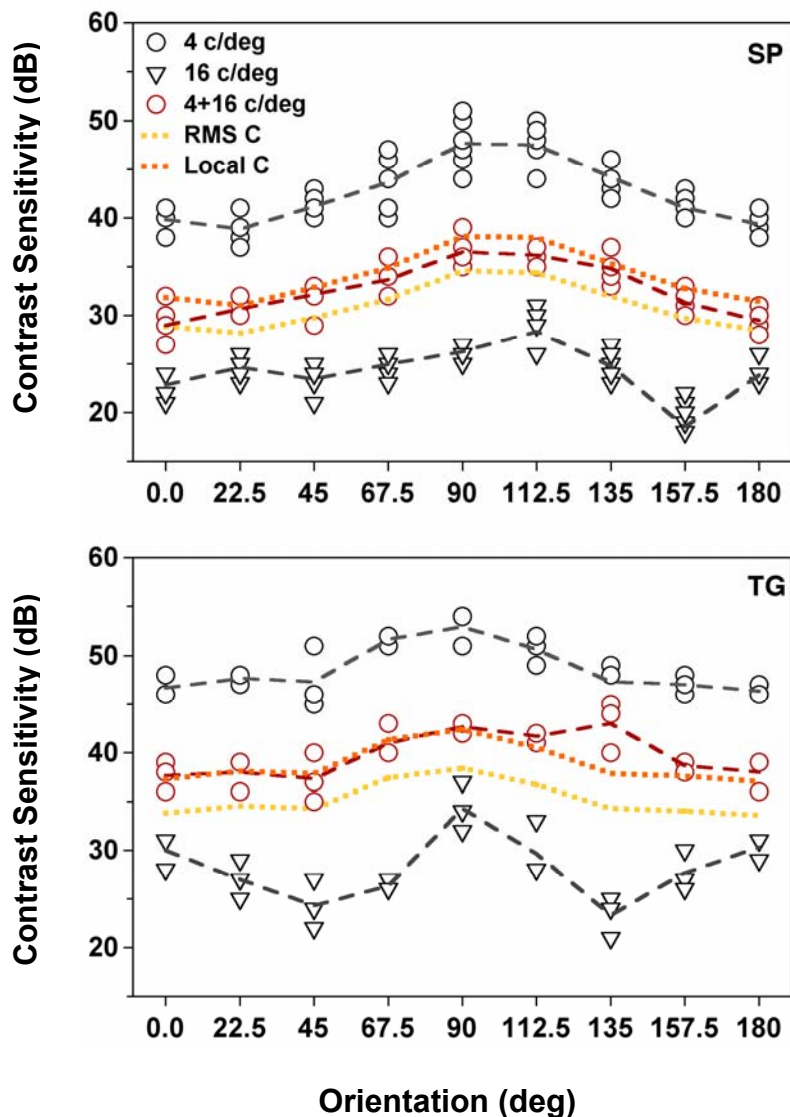
3.3.1 Μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity)

Τα σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζουν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (για δύο εξεταζόμενους) συναρτήσεως του προσανατολισμού (orientation) των ερεθισμάτων. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η ευαισθησία για το σύνθετο grating των 4+16 c/deg καθώς και για τις απλές ημιτονοειδούς διαμόρφωσης συνιστώσες του των 4 c/deg και 16 c/deg. Αντίστοιχα στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η ευαισθησία για το σύνθετο grating των 1+4 c/deg καθώς και για τις απλές ημιτονοειδούς διαμόρφωσης συνιστώσες του των 1 c/deg και 4 c/deg.

Δύο σημεία πρέπει να επισημανθούν. Το πρώτο είναι ότι η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης είναι μεγαλύτερη για τους προσανατολισμούς κοντά στις 90 deg, σε όλες τις περιπτώσεις, αν και το προφίλ αυτής της ευαισθησίας προσανατολισμού είναι διαφορετικό για gratings διαφορετικών χωρικών συχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα για τα gratings που περιέχουν χαμηλές χωρικές συχνότητες (1, 4, 1+4, 4+16 c/deg) η μέγιστη ευαισθησία παρουσιάζεται στις 90 deg, ενώ για το grating των 16 c/deg, η μέγιστη ευαισθησία παρουσιάζεται στις 90 αλλά και στις 180 deg.

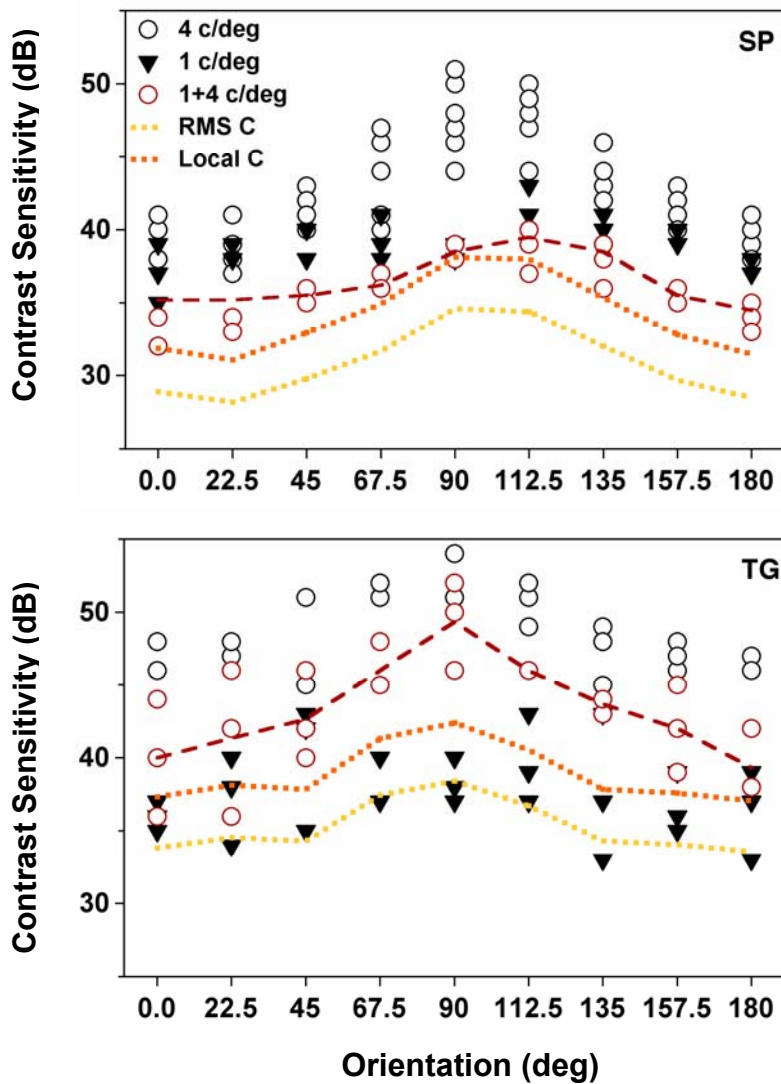
Το δεύτερο είναι η διαφορά στην ευαισθησία που καταγράφεται για τα διάφορα ερεθίσματα. Η ευαισθησία για το grating των 4c/deg είναι μεγαλύτερη από αυτή για το grating των 1 c/deg, αλλά η διαφορά μεταξύ τους (περίπου 10dB), είναι μικρότερη από τη διαφορά ανάμεσα στα gratings των 4 και 16 c/deg (η ευαισθησία για το grating των 4c/deg είναι μεγαλύτερη από αυτή για το grating των 16 c/deg κατά 20dB περίπου). Η ευαισθησία που καταγράφεται για τα σύνθετα gratings είναι μειωμένη σε σχέση με την ευαισθησία για την πιο ανιχνεύσιμη απλή, ημιτονοειδούς διαμόρφωσης συνιστώσα, η οποία είναι αυτή των 4 c/deg και στις δύο περιπτώσεις (να σημειωθεί ότι η κλίμακα ευαισθησίας σε dB είναι λογαριθμική, βλ. Κεφάλαιο 1).

Η μικρότερη ευαισθησία η οποία καταγράφεται για το σύνθετο ερέθισμα είναι πιθανόν να οφείλεται στη μείωση του τοπικού contrast. Για να εξεταστεί η υπόθεση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν οι δύο μετρικές contrast C_{RMS} και C_L , οι οποίες αποτελούν καλύτερη αξιολόγηση του contrast των σύνθετων gratings από το C_M , για τον υπολογισμό του οποίου λαμβάνεται υπόψη μόνο η μέγιστη και η ελάχιστη φωτεινότητα του ερεθίσματος. Αν και όλα τα ερεθίσματα είχαν το ίδιο C_M , το C_{RMS} των σύνθετων gratings ήταν μικρότερο κατά 1.38 σε σχέση με αυτό των απλών gratings, ενώ το C_L ήταν μικρότερο κατά ένα 1.25.



Σχήμα 3.4: Γραφήματα της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) συναρτήσει του προσανατολισμού (orientation), για το σύνθετο grating των 4+16 c/deg (κόκκινοι κύκλοι) και των συνιστωσών του (4 c/deg μαύροι κύκλοι, 16 c/deg τρίγωνα). Το contrast υπολογίστηκε κατά Michelson (C_M). Οι διακεκομμένες γραμμές (παύλες) αναπαριστούν την μέση τιμή έξι μετρήσεων. Οι διακεκομμένες έγχρωμες (τελείες) γραμμές την προβλεπόμενη ευαισθησία για διαφορετικές μετρικές contrast (C_{RMS} κίτρινο, C_L πορτοκαλί).

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4 όταν αυτή η μείωση του τοπικού contrast πολλαπλασιάσει την ευαισθησία του απλού grating των 4 c/deg (το οποίο αποτελεί την πιο ανιχνεύσιμη συνιστώσα), προβλέπεται ικανοποιητικά η μείωση της ευαισθησίας του σύνθετου grating για όλους τους προσανατολισμούς. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για το σύνθετο ερέθισμά των 1+4 c/deg (βλ. σχήμα 3.5). Η ευαισθησία που καταγράφεται είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα μπορούσε να αποδοθεί στη μείωση του contrast.



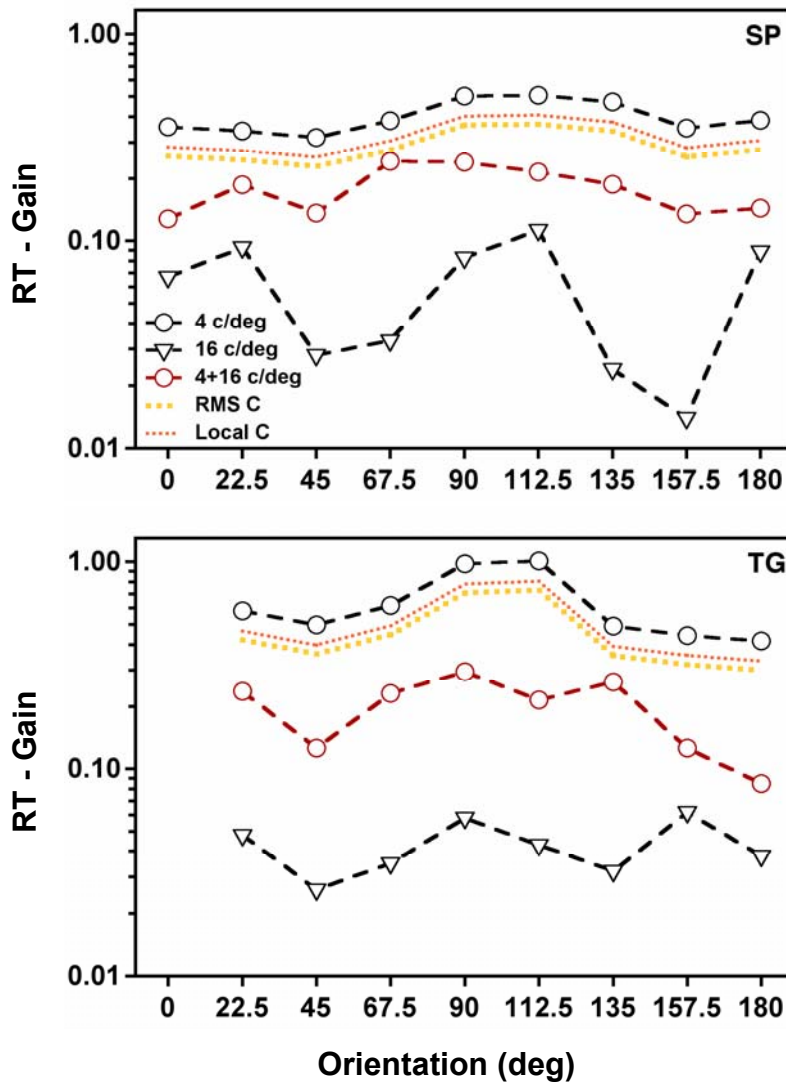
Σχήμα 3.5: Γραφήματα της ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) συναρτήσει του προσανατολισμού (orientation), για το σύνθετο grating των 1+4 c/deg (κόκκινοι κύκλοι) και των συνιστωσών του (4 c/deg μαύροι κύκλοι, 1 c/deg τρίγωνα). Το contrast υπολογίστηκε κατά Michelson (C_M). Οι διακεκομμένες γραμμές (παύλες) αναπαριστούν την μέση τιμή έξι μετρήσεων. Οι διακεκομμένες έγχρωμες γραμμές (τελείες) την προβλεπόμενη ευαισθησία για διαφορετικές μετρικές contrast (C_{RMS} κίτρινο, C_L πορτοκαλί).

3.3.2 Οπτικοί Χρόνοι Αντίδρασης (Visual Reaction Times – RTs)

Στα σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζεται το RT gain (το αντίστροφο της κλίσης της ευθείας όταν ο χρόνος αντίδρασης παρασταθεί συναρτήσει του $1/Contrast$)

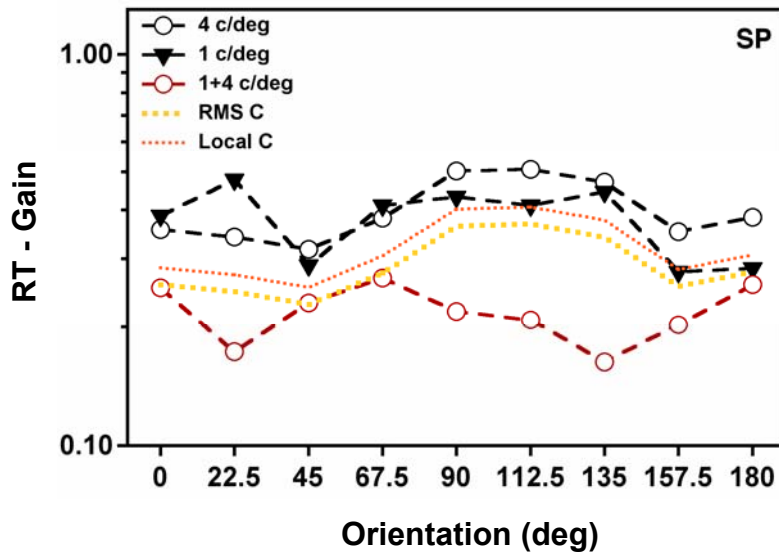
για τα σύνθετα ερεθίσματα των 4+16 c/deg και 1+4 c/deg αντίστοιχα, καθώς και τα απλά ημιτονοειδούς διαμόρφωσης gratings, συναρτήσει του προσανατολισμού. Η ευαισθησία που καταγράφεται για τα σύνθετα gratings είναι μειωμένη σε σχέση με την ευαισθησία για το πιο ανιχνεύσιμο απλό grating, το οποίο είναι αυτό των 4 c/deg, συμπεριφορά δηλαδή παρόμοια με τις μετρήσεις κοντά στην ουδό. Η ευαισθησία προσανατολισμού είναι εμφανής

και σε αυτή τη περίπτωση, δείχνοντας την ύπαρξη καναλιών συντονισμένων σε διαφορετικούς προσανατολισμούς και για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού.



Σχήμα 3.6: Γραφικές παραστάσεις του RT gain συναρτήσει του προσανατολισμού (orientation) των ερεθισμάτων για το σύνθετο grating των 4+16 c/deg (κόκκινοι κύκλοι) και των συνιστωσών του (4 c/deg μαύροι κύκλοι, 16 c/deg τρίγωνα). Το contrast ορίζεται κατά Michelson (C_M). Οι διακεκομμένες έγχρωμες γραμμές (τελείες) περιγράφουν την προβλεπόμενη ευαισθησία για διαφορετικές μετρικές τοπικού contrast (C_{RMS} κίτρινο, C_L πορτοκαλί).

Στην περίπτωση του πρώτου εξεταζόμενου (βλ. σχήμα 3.6, πάνω) η ευαισθησία προσανατολισμού για το απλό grating των 4 c/deg και το σύνθετο των 4 + 16 c/deg δεν είναι ιδιαίτερα εμφανής. Για το απλό grating όμως των 16 c/deg η ευαισθησία είναι μεγαλύτερη για τις 22.5, 112.5 και 180 deg. Για τον δεύτερο εξεταζόμενο (βλ. σχήμα 3.6, κάτω) η ευαισθησία προσανατολισμού για το απλό grating των 4 c/deg είναι μεγαλύτερη στις 90 deg και παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για το σύνθετο των 4 + 16 c/deg. Για το απλό grating των 16 c/deg όμως, η ευαισθησία είναι μεγαλύτερη στις 90 και 180 deg.



Σχήμα 3.7: Γραφικές παραστάσεις του RT gain συναρτήσει του προσανατολισμού (orientation) των ερεθισμάτων για το σύνθετο grating των 1+4 c/deg (κόκκινοι κύκλοι) και των συνιστωσών του (4 c/deg μαύροι κύκλοι, 1 c/deg τρίγωνα). Το contrast ορίζεται κατά Michelson (C_M). Οι διακεκομμένες έγχρωμες γραμμές περιγράφουν την προβλεπόμενη ευαισθησία για διαφορετικές μετρικές τοπικού contrast (C_{RMS} κίτρινο, C_L πορτοκαλί).

Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα για τιμές contrast κοντά στην ουδό, η μείωση της ευαισθησίας για το σύνθετο grating 4+16 deg των δεν εξηγείται επαρκώς με τη μείωση του τοπικού contrast όταν χρησιμοποιηθούν οι C_{RMS} και C_L μετρικές. Αυτό είναι ακόμα πιο εμφανές στην περίπτωση του σύνθετου grating με συνιστώσες 1+4 c/deg, γεγονός που συνιστά ότι η επεξεργασία σε τιμές contrast μεγαλύτερα της ουδού πραγματοποιείται από διαφορετικούς μηχανισμούς.

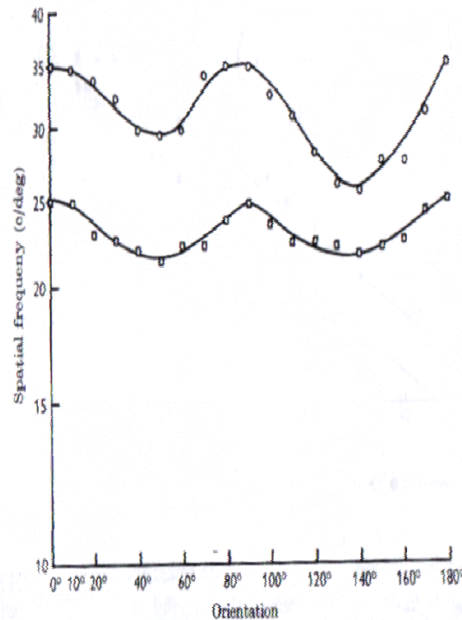
3.4 Συζήτηση

3.4.1 Ευαισθησία προσανατολισμού

Η ευαισθησία προσανατολισμού ήταν εμφανής στις μετρήσεις μας τόσο για τιμές contrast κοντά στην ουδό, όπως καταγράφηκαν στις μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (βλ. σχήματα 3.4 και 3.5), όσο και για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού, όπως καταγράφηκαν στις μετρήσεις χρόνων αντίδρασης (βλ. σχήματα 3.5 και 3.6), αν και το προφίλ αυτής της ευαισθησίας προσανατολισμού παρουσίαζε διαφορές ανάμεσα σε gratings διαφορετικών χωρικών συχνοτήτων.

Οι Campbell και Kulikowski (1966) σε πειράματα με χρήση απλών gratings περιέγραψαν το φαινόμενο της ευαισθησίας προσανατολισμού (orientation selectivity) για το οπτικό σύστημα. Σύμφωνα με αυτό, η ευαισθησία του οπτικού συστήματος είναι μεγαλύτερη όταν τα ερεθίσματα είναι κάθετα ή οριζόντια προσανατολισμένα, και μικρότερη για τους 'πλάγιους' προσανατολισμούς των 45 και 135 deg. Το πείραμα επαναλήφθηκε, και με χρήση κροσσών συμβολής, ώστε να παρακαμφθούν οι οπτικές ατέλειες του

οφθαλμού, αλλά και σε αυτή την περίπτωση επιβεβαιώθηκε το εύρημα (βλ. σχήμα 3.8). Η ευαισθησία προσανατολισμού ήταν εμφανής για χαμηλές τιμές contrast, αλλά και για υψηλότερες.



Σχήμα 3.8: Σε κάθετους και οριζόντιους προσανατολισμούς το οπτικό σύστημα μπορεί να ανιχνεύει ερεθίσματα μεγαλύτερων χωρικών συχνοτήτων (παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία). Τα ερεθίσματα ήταν απλά gratings (πάνω) και κροσσοί συμβολής (κάτω), από Campbell and Kulikowski, 1966.

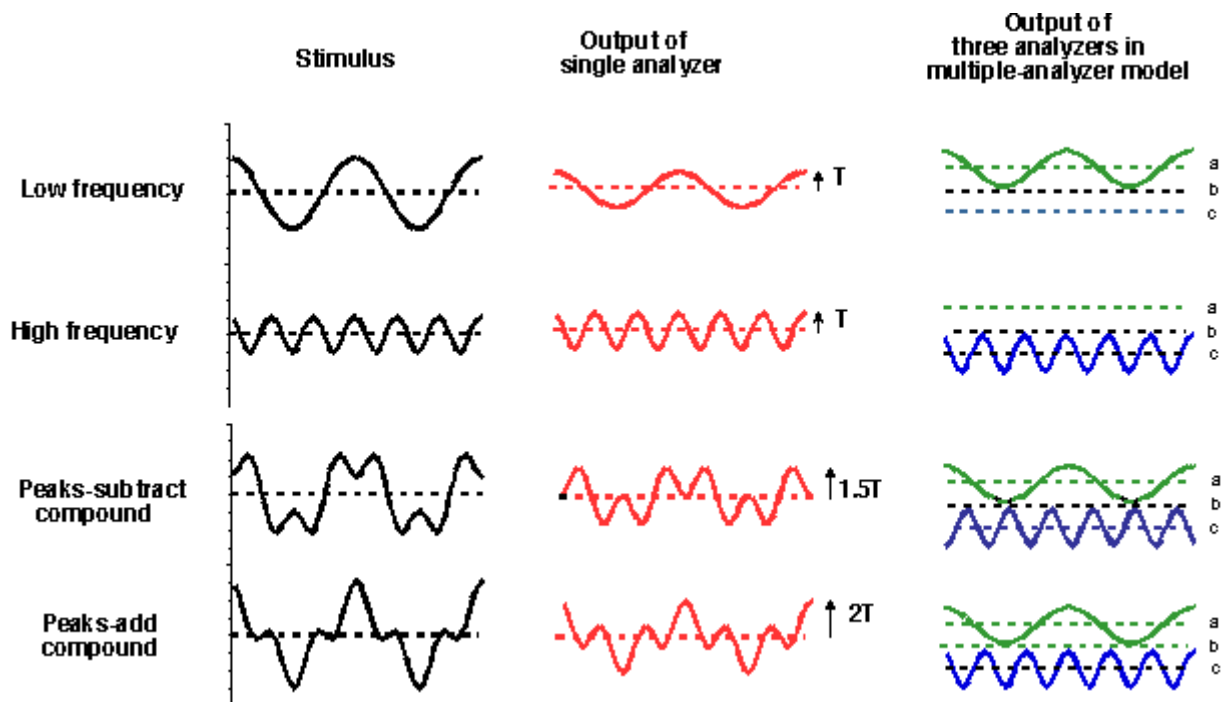
Δύο πράγματα σχετικά με την ευαισθησία προσανατολισμού έγιναν εμφανή μέσα από τις μετρήσεις μας και θα πρέπει να τονιστούν ιδιαίτερα. Το πρώτο είναι ότι το προφίλ της ευαισθησίας προσανατολισμού είναι διαφορετικό για ερεθίσματα διαφορετικών χωρικών συχνοτήτων. Οι εκτροπές των οπτικών του οφθαλμού παίζουν ενδεχομένως ρόλο σε αυτή την περίπτωση. Οι εξεταζόμενοι ήταν διορθωμένοι για το διαθλαστικό σφάλμα και τις εκτροπές χαμηλής τάξης αλλά όχι για εκτροπές υψηλής τάξης, όπως το κόμα, που είναι πιθανόν να επηρεάζει τις μετρήσεις μας. Η μορφή του προφίλ της ευαισθησίας προσανατολισμού είναι επίσης πολύ πιθανόν να επηρεάζεται και από νευρωνικούς παράγοντες. Σχετικά με τη δεύτερη περίπτωση, στο Κεφαλαίο 1 τονίστηκε η ύπαρξη νευρωνικών καναλιών τα οποία είναι συντονισμένα σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες και διαφορετικούς προσανατολισμούς. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας δείχνουν πως τα νευρωνικά κανάλια τα οποία είναι συντονισμένα σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες, παρουσιάζουν διαφορετική μορφή όσον αφορά την ευαισθησία τους σε διαφορετικούς προσανατολισμούς.

Το δεύτερο σημείο το οποίο θα πρέπει να τονιστεί, είναι πως η μορφή της ευαισθησίας προσανατολισμού για τα σύνθετα gratings, είναι παρόμοια με τη μορφή της ευαισθησίας προσανατολισμού για τη συνιστώσα για την οποία καταγράφεται η μεγαλύτερη ευαισθησία, τουλάχιστον στην περίπτωση του σύνθετου ερεθίσματος των 4+16 c/deg. Αυτό υποδεικνύει πως στην

περίπτωση αυτή, η επεξεργασία του σύνθετου ερεθίσματος και της συνιστώσας των 4c/deg, πιθανότατα πραγματοποιείται από το ίδιο νευρωνικό κανάλι.

3.4.2 Ευαισθησία σε σύνθετα gratings

Στις μελέτες που διεξήχθησαν μέχρι στιγμής χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα gratings τα οποία αθροίζονταν 'μαθηματικά', σύμφωνα με την Εξ. 2. Όπως καθίσταται εμφανές από το σχήμα 3.1, το Michelson contrast ενός τέτοιου ερεθίσματος είναι μεγαλύτερο από το contrast της απλής, ημιτονοειδούς διαμόρφωσης συνιστώσας του. Η διαφορά θα πρέπει, θεωρητικά τουλάχιστον, να καθιστά το σύνθετο grating σημαντικά πιο ανιχνεύσιμο.



Σχήμα 3.9: Σύνθετα gratings αθροιζόμενα σε διαφορετικές φάσεις και σύγκριση του μοντέλου του απλού νευρωνικού καναλιού – αναλυτή με αυτό των πολλαπλών νευρωνικών καναλιών για την ανίχνευση σύνθετων gratings (N. Graham's web page)

Στην αριστερή στήλη του σχήματος 3.9 παρουσιάζονται γραφικά οι διαμορφώσεις φωτεινότητας τεσσάρων ερεθισμάτων. Δύο απλών gratings, με πλάτη (contrasts) τα οποία έχουν διαμορφωθεί ώστε να βρίσκονται στο threshold ενός εξεταζόμενου και δύο σύνθετων (compound) gratings που προέκυψαν από τα απλά, αθροιζόμενα με διαφορετικές φάσεις ϕ_1, ϕ_2 .

Το σύνθετο grating της τρίτης γραμμής (**peaks-subtract compound**) προέκυψε με άθροιση των απλών gratings με φάσεις τέτοιες ώστε η μέγιστη φωτεινότητα του ενός να αθροίζεται με την ελάχιστη φωτεινότητα του άλλου. Το grating της τέταρτης γραμμής (**peaks-add compound**) προέκυψε με άθροιση των απλών gratings με φάσεις τέτοιες ώστε η μέγιστη φωτεινότητα του ενός να αθροίζεται με τη μέγιστη φωτεινότητα του άλλου. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα το peaks-add compound να έχει μεγαλύτερη τιμή μέγιστης και μικρότερη τιμή ελάχιστης φωτεινότητας από αυτή του peaks-subtract. Κάτι που μεταφράζεται σε μεγαλύτερο σε contrast για το peaks-add compound, γεγονός που θεωρητικά το καθιστά πιο ανιχνεύσιμο.

Υποθέτοντας ότι το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα μοναδικό νευρωνικό κανάλι υπεύθυνο για την ανίχνευση ερεθισμάτων οποιασδήποτε χωρικής συχνότητας, η μεσαία στήλη (κόκκινο) δείχνει την προβλεπόμενη έξοδο για είσοδο καθένα από τα ερεθίσματα της πρώτης στήλης. Αν και τα απλά gratings βρίσκονται στο threshold, σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο, τα contrasts των σύνθετων gratings βρίσκονται πάνω από το threshold. Έτσι αν τα δύο απλά grating βρίσκονται στο threshold (T) τότε το peaks-subtract compound μπορεί να μειωθεί κατά ένα συντελεστή 1.5 και να βρίσκεται ακόμα στο threshold, ενώ το contrast του peaks-add compound μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο (κατά ένα συντελεστή ίσο με 2) πριν να φτάσει στο threshold.

Ψυχοφυσικές μελέτες ότι έδειξαν ότι, **τα δύο σύνθετα gratings είναι εξίσου ανιχνεύσιμα και ελάχιστα πιο ανιχνεύσιμα από τα απλά gratings.** (Graham and Nachmias, 1971; Graham Robson and Nachmias, 1978).

Στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται η απόκριση του οπτικού συστήματος όταν ληφθεί υπόψη ένα μοντέλο με παράλληλα νευρωνικά κανάλια καθένα από τα οποία είναι ευαίσθητα σε συγκεκριμένο εύρος χωρικών συχνοτήτων. Το κανάλι a (πράσινο) είναι ευαίσθητο στις χαμηλές συχνότητες, το κανάλι c (μπλε) είναι ευαίσθητο στις υψηλές συχνότητες και τέλος το κανάλι b είναι ένα από τα πολλά κανάλια που δεν αποκρίνονται σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Κάθε ένα από αυτά τα νευρωνικά κανάλια 'βλέπει' το πολύ μία από τις συνιστώσες των σύνθετων grating. Πιο απλά, η απόκριση του καναλιού στο σύνθετο grating είναι ίδια με την απόκριση του σε μία από τις συνιστώσες του. Επομένως **αν η συνιστώσα βρίσκεται στο threshold για το κανάλι αυτό, τότε και το σύνθετο grating βρίσκεται στο threshold.** Αξίζει να σημειωθεί ότι το παραπάνω μοντέλο προβλέπει ενός είδους ανεξαρτησία φάσης στο threshold.

Ο λόγος για τον οποίο τα σύνθετα gratings είναι ελάχιστα πιο ανιχνεύσιμα (αν και οι συνιστώσες τους βρίσκονται στο threshold) μπορεί να αποδοθεί στο ότι δύο νευρωνικά κανάλια ανιχνεύουν ταυτόχρονα το ερέθισμα, και πιθανότατα υπάρχει κάποιου είδους άθροισμα στις ανεξάρτητες αποκρίσεις αυτών των καναλιών. Κάθε νευρωνικό κανάλι έχει μια ξεχωριστή πιθανότητα να ανιχνεύσει το ερέθισμα. Η πιθανότητα δύο νευρωνικά κανάλια να ανιχνεύσουν το ερέθισμα ισούται με το άθροισμα αυτών των δύο ανεξάρτητων πιθανοτήτων (probability summation).

Παρά τις πολλές παραλλαγές του απλού καναλιού που έχουν προταθεί, τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων θεωρούνται απόδειξη για την ύπαρξη νευρωνικών καναλιών συντονισμένων σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες, κάτι που άλλωστε έχει αποδειχθεί πληθώρα νευροφυσιολογικών μελετών (βλ. Κεφάλαιο 1).

Στην παρούσα εργασία τα σύνθετα gratings δημιουργήθηκαν σύμφωνα με την Εξ. 3, ώστε να έχουν το ίδιο Michelson contrast (C_M) με αυτό των απλών gratings. Αυτό έγινε ώστε να αποφευχθεί η βελτίωση της ευαισθησίας για το σύνθετο grating λόγω της αύξησης του Michelson contrast και να μελετηθεί η επίδραση του τοπικού contrast στην ανιχνευσιμότητα τους.

Η πρώτη παρατήρηση σχετικά με τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι πως η ευαισθησία για τα σύνθετα ερεθίσματα ήταν σε κάθε περίπτωση μικρότερη σε σχέση από την ευαισθησία για την πιο ανιχνεύσιμη συνιστώσα τους, τόσο για τιμές contrast κοντά στην ουδό, όσο και για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού, όταν το Michelson contrast χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της ευαισθησίας. Έχοντας στο νου την ύπαρξη νευρωνικών καναλιών συντονισμένων σε διαφορετικές συχνότητες, με την βοήθεια των οποίων μπορούν να εξηγηθούν μερικώς τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας, επιχειρείται εδώ η περιγραφή μιας διαφορετικής προσέγγισης, κατά την οποία η μείωση της ευαισθησίας για το σύνθετο ερέθισμα θα λαμβάνει υπόψη τη μείωση του τοπικού contrast, γεγονός που το καθιστά λιγότερο ανιχνεύσιμο.

Στην περίπτωση των μετρήσεων ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης, η μείωση του τοπικού contrast του σύνθετου grating σε σχέση με την πιο ανιχνεύσιμη απλή, ημιτονοειδούς διαμόρφωσης συνιστώσα του, εξηγεί ικανοποιητικά την μείωση της ευαισθησίας μόνο στην περίπτωση του σύνθετου grating των 4+16 c/deg (βλ. σχήμα 3.4). Εδώ το σύνθετο και το απλό grating των 4c/deg ανιχνεύονται πιθανότατα από το ίδιο νευρωνικό κανάλι (σε αυτό συνηγορεί και το προφίλ της ευαισθησίας προσανατολισμού) και η μείωση της ευαισθησίας για το σύνθετο grating μπορεί να εξηγηθεί ως μείωση των αποκρίσεων αυτού του καναλιού λόγω του μικρότερου contrast. Στην περίπτωση του σύνθετου grating των 1+4 c/deg, η προβλεπόμενη μείωση της ευαισθησίας λόγω ελάττωσης του contrast του σύνθετου grating σε σχέση με το contrast της συνιστώσας των 4 c/deg, υποτιμά την μετρημένη ευαισθησία για αυτό το ερέθισμα. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει κάποιου είδους άθροισμα στις αποκρίσεις των νευρωνικών καναλιών τα οποία είναι υπεύθυνα για την ανίχνευση του σύνθετου ερεθίσματος με αποτέλεσμα η μετρημένη ευαισθησία να είναι μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη. Αυτό συμβαίνει γιατί τα νευρωνικά κανάλια, υπεύθυνα για την ανίχνευση των ερεθισμάτων με χωρικές συχνότητες 1, 4 c/deg παρουσιάζουν παρόμοια ευαισθησία. Από την άλλη το νευρωνικό κανάλι που ανιχνεύει την συνιστώσα των 4 c/deg παρουσιάζει πολλή μεγαλύτερη ευαισθησία από το αντίστοιχο νευρωνικό κανάλι υπεύθυνο για την ανίχνευση της συνιστώσας των 16 c/deg.

Οι οπτικοί χρόνοι αντίδρασης (ΧΑ) μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την ευαισθησία του οπτικού συστήματος για τιμές contrast υψηλότερες της ουδού/threshold, όσο τουλάχιστον αφορά τα απλά αχρωματικά (Plainis and Murray, 2000) και χρωματικά (McKeefry et al., 2003), ημιτονοειδούς διαμόρφωσης gratings. Αν και κάτι τέτοιο δεν είχε επιβεβαιωθεί μέχρι στιγμής για τα σύνθετα gratings, η παρούσα εργασία παρέχει ενδείξεις ότι αυτό ισχύει και στην περίπτωση των σύνθετων gratings.

Η προβλεπόμενη ευαισθησία, βασισμένη στα μοντέλα μείωσης του τοπικού contrast αδυνατεί να εξηγήσει την καταγεγραμμένη ευαισθησία όταν

χρησιμοποιηθούν σύνθετα gratings. Σε τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού, οι μηχανισμοί επεξεργασίας είναι πιθανόν να διαφέρουν. Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας αυτών των μηχανισμών είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μοντέλων που θα λαμβάνουν υπόψη και το χρονικό προφίλ των ερεθισμάτων.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Η αξιολόγηση της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού στην καθημερινή κλινική πράξη πραγματοποιείται εδώ και δεκαετίες με χρήση απλών, πρότυπων οπποτύπων που αποτελούνται από "μαύρα" σύμβολα (γράμματα ή αριθμούς) σε λευκό background. Είναι αυτονόητο ότι αυτή η δοκιμασία δεν αποτελεί αξιολόγηση της λειτουργικής όρασης, δηλαδή της ικανότητας ενός ατόμου να διακρίνει διάφορα αντικείμενα στον περιβάλλοντα χώρο, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στο σχήμα, το μέγεθος, το χρώμα και το contrast.

Η ανάπτυξη, κυρίως στην δεκαετία του '60, κατάλληλων ψυχοφυσικών δοκιμασιών αξιολόγησης (π.χ. ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης, χρόνοι αντίοδρασης), με την χρήση σύνθετων οπτικών ερεθισμάτων (π.χ gratings) τα οποία μεταβάλλονται σε φωτεινότητα, contrast, προσανατολισμό, φασματικό περιεχόμενο, βοήθησε στην μελέτη της χωρικο-χρωματικής επεξεργασίας στις οπτικές οδούς (π.χ. παράλληλες οδοί επεξεργασίας) στην συσχέτιση με τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των νευρώνων στην οπτική οδό (π.χ. χωρικά κανάλια). Την κύρια παράμετρο στις περισσότερες δοκιμασίες αποτελεί το contrast (αντίθεση φωτεινότητας ή χρωματικότητας), το οποίο συνήθως ορίζεται κατά Michelson. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα γαγγλιακά κύτταρα της οπτικής οδού (λόγω της δομής των υποδεκτικών πεδίων) δεν αποκρίνονται στο διάχυτο φωτισμό, αλλά σε αλλαγές της φωτεινότητας. Βέβαια, η χρήση απλών gratings μπορεί να πρόσφερε λύσεις όσο αφορά την μελέτη ορισμένων χαρακτηριστικών, αλλά δεν μπορεί να αντικατοπτρίσει την συνθετικότητα των φυσικών εικόνων. Επίσης, οι περισσότερες δοκιμασίες έχουν ως στόχο τον υπολογισμό της ευαισθησίας (η αποτελεί το αντίστροφο της ουδούς/threshold) ενώ μια φυσική εικόνα αποτελείται από ένα μεγάλο εύρος φωτεινών αντιθέσεων μεγαλύτερων από την ουδό (suprathreshold processing).

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο σκέλη. Σκοπός του πρώτου μέρους αποτελεί η συλλογή της απαραίτητης τεχνογνωσίας και η ανάπτυξη εξειδικευμένης μεθοδολογίας για την στατιστική ανάλυση φυσικών εικόνων. Στο δεύτερο σκέλος πραγματοποιούνται μετρήσεις με σκοπό τον προσδιορισμό μιας μετρικής (παραμέτρου) που να περιγράφει με ακρίβεια της επεξεργασία σύνθετων οπτικών ερεθισμάτων από το οπτικό σύστημα.

Η μεθοδολογία/διαδικασία που αναπτύχθηκε αφορά την βαθμονόμηση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής για την λήψη εικόνων με την χρήση μιας σειράς χρωματικών φίλτρων στενής διέλευσης και σπεκτροραδιόμετρου. Επίσης, πραγματοποιείται συγγραφή μιας σειράς υπολογιστικών αλγορίθμων για την ψηφιακή επεξεργασία και την ανάλυση των στατιστικών των βαθμονομημένων φυσικών εικόνων.

Όσο αφορά την μελέτη της επεξεργασίας σύνθετων οπτικών ερεθισμάτων (σύνθετα gratings – που διαφέρουν σε συχνότητα και προσανατολισμό) αυτή επιτυγχάνεται με δύο ψυχοφυσικές δοκιμασίες: (α) την ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) για τη μελέτη της οπτικής επεξεργασίας για

τιμές contrast κοντά στην ουδό/threshold και (β) τους οπτικούς χρόνους αντίδρασης (visual reaction times) για την αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς σε τιμές contrast υψηλότερες της ουδούς/threshold (suprathreshold).

4.2 Χωρικό-χρωματικό περιεχόμενο φυσικών εικόνων

Η χρήση των φυσικών εικόνων για τη διεξαγωγή ψυχοφυσικών μετρήσεων, καθώς και η μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών τους, απαιτεί προεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής με την οποία λαμβάνονται οι εικόνες και την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων αυτών.

Η βαθμονόμηση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής εξασφαλίζει ότι οι τιμές φωτεινότητας της προβαλλόμενης ως ερέθισμα εικόνας παρουσιάζουν γραμμική αντιστοιχία με την πραγματική εξωτερική σκηνή. Πριν τη βαθμονόμηση αυτό δεν ισχύει αφού η συνάρτηση (γάμμα) που συσχετίζει τις αποκρίσεις των αισθητήρων της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής με την εισερχόμενη φωτεινότητα δεν είναι γραμμική. Η βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής, δηλαδή η εκτίμηση της συνάρτησης γάμμα και η αφαίρεση της, πραγματοποιήθηκε με σύγκριση των τιμών της φωτεινότητας των τετραγώνων μιας χρωματικής σκακιέρας, όπως μετρήθηκαν από ένα σπεκτροραδιόμετρο και τη φωτογραφική μηχανή. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι φασματικές ευαισθησίες των αισθητήρων της φωτογραφικής μηχανής με μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με χρήση του σπεκτροραδιομέτρου και 31 χρωματικών φίλτρων σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 2.2.2.

Σχετικά με την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων, ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση και τη μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών των φυσικών εικόνων. Το αποτέλεσμα του μετασχηματισμού Fourier είναι συνήθως μιγαδικός αριθμός το μέτρο του οποίου καλείται φασματικό πλάτος (amplitude spectrum ή Fourier amplitude) και η φάση του φασματική φάση (phase spectrum). Η δυσδιάστατη αναπαράσταση του φασματικού πλάτους αποκαλύπτει το χωρικό φασματικό περιεχόμενο μιας εικόνας, της χωρικές συχνότητες δηλαδή από τις οποίες αποτελείται, την ενέργεια αυτών των συχνοτήτων, καθώς και την κατανομή της ενέργειας στους διάφορους προσανατολισμούς. Για παράδειγμα 'αστικές' εικόνες, εικόνες δηλαδή οι οποίες περιέχουν ανθρώπινες κατασκευές, παρουσιάζουν χωρικές συχνότητες των οποίων η ενέργεια είναι έντονα προσανατολισμένη.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση αυτών των δομών στη διαμόρφωση του οπτικού συστήματος. Σε πείραμα που έλαβε χώρα το 1973 από τους Annis και Frost μελετήθηκε η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity) σε δύο ομάδες εξεταζόμενων. Την πρώτη ομάδα αποτελούσαν Καναδοί αστοί και τη δεύτερη ινδιάνοι της φυλής Cree. Οι Καναδοί ζώντας σε πόλεις όπου κυριαρχούν οι κάθετοι και οριζόντιοι προσανατολισμοί εμφάνισαν μειωμένη οπτική οξύτητα σε περιστρεφόμενο

grating κατά 45° και 135° σε σχέση με τους Cree οι οποίοι μεγαλώνουν σε πιο ανομοιογενές περιβάλλον. Σε προσανατολισμούς όμως των 0° και 90° αστοί είχαν καλύτερη διακριτική ικανότητα. Η κυριαρχία των προσανατολισμένων κάθετων και οριζόντιων συχνοτήτων στο σύγχρονο περιβάλλον φαίνεται να προκαλεί διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του οπτικού μας συστήματος.

Το περιεχόμενο σε χωρικές συχνότητες μιας εικόνας καθορίζουν με διαφορετικό τρόπο τη μορφή της. Οι υψηλές χωρικές συχνότητες σχετίζονται με τα άκρα και τις ακμές μίας εικόνας, τις απότομες δηλαδή μεταβολές στις τιμές της φωτεινότητας, ενώ μεσαίες και χαμηλές χωρικές συχνότητες σχετίζονται με τις πιο ομαλές μεταβολές. Μία εικόνα από την οποία έχουν αφαιρεθεί οι υψηλές συχνότητες συνεχίζει να διατηρεί το περιεχόμενο και τη μορφή της, απουσιάζουν όμως οι ακμές (βλ. σχήμα 2). Οι ακμές είναι αυτές που καθιστούν ένα πρόσωπο ή ένα αντικείμενο αναγνωρίσιμο, όπως έχει διαπιστωθεί και με ψυχοφυσικές μετρήσεις.

Στην παρούσα εργασία επιβεβαιώθηκε επίσης ο εκθετικός f^{-a} νόμος που περιγράφει το φασματικό πλάτος των φυσικών εικόνων, όταν αθροιστεί για όλους τους προσανατολισμούς. Όταν μάλιστα παρασταθεί σε λογαριθμικούς άξονες συναρτήσει της χωρικής συχνότητας, το φασματικό πλάτος μειώνεται σχεδόν γραμμικά, με το a να αντιστοιχεί στην κλίση αυτής της ευθείας. Η γραμμική αυτή μορφή δεν εμφανίζεται σε εικόνες στις οποίες κυριαρχούν ανθρώπινες κατασκευές ή άλλα δομημένα αντικείμενα.

Η κλίση a παρουσιάζει παρόμοιες τιμές για μεγάλο αριθμό φυσικών χρωματικών εικόνων. Γενικά στην βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί τιμές για την κλίση a σε φυσικές εικόνες μεταξύ 0.7 και 1.6 (βλ. Πίνακα 1.1, σχήμα 2.25) οι οποίες επίσης επιβεβαιώθηκαν. Αυτή η τιμή της κλίσης a υποστηρίζεται πως έχει μεγάλη σημασία για τον τρόπο που το ανθρώπινο οπτικό σύστημα εξελίχθηκε, αφού μπορεί και επεξεργάζεται βέλτιστα χωρικές πληροφορίες φυσικών σκηνών, στις οποίες η κλίση a έχει τη συγκεκριμένη τιμή (Parraga et al., 2000) και υπάρχουν θεωρητικοί λόγοι γιατί θα πρέπει να υπάρχει ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή της κλίσης a και στα προφίλ των υποδεκτικών πεδίων του οπτικού φλοιού (Field, 1987). Ουσιαστικά μία σχέση ανάμεσα στο περιεχόμενο μιας σκηνής και στην απόκριση του οπτικού συστήματος θα μεγιστοποιούσε το λόγο του σήματος προς το θόρυβο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση ότι η τιμή της κλίσης a παραμένει ίδια ανεξαρτήτως της κλίμακας (scale invariance) της οποίας λαμβάνεται η εικόνα (Simoncelli and Olshausen, 2001). Αυτό σημαίνει ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά μιας εικόνας δεν πρέπει να μεταβάλλονται, όταν μεταβάλλεται η κλίμακα που γίνονται οι παρατηρήσεις. Διάφορες θεωρίες έχουν επιχειρήσει να εξηγήσουν την ιδιότητα αυτή των φυσικών σκηνών. Μία εξήγηση είναι ότι μπορεί να οφείλεται στην παρουσία ακμών στις φυσικές σκηνές, αφού οι ακμές παρουσιάζουν τέτοια στατιστικά χαρακτηριστικά. Μία άλλη ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα άποψη (πχ Billock, 2001) είναι ότι η συμπεριφορά αυτή είναι πιθανόν να σχετίζεται με τη γεωμετρία fractal (γνωστή από τη θεωρία του χάους) συγκεκριμένων διαστάσεων, η οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη φύση και παρουσιάζει παρόμοιες δομές ανεξάρτητα της κλίμακας παρατήρησης.

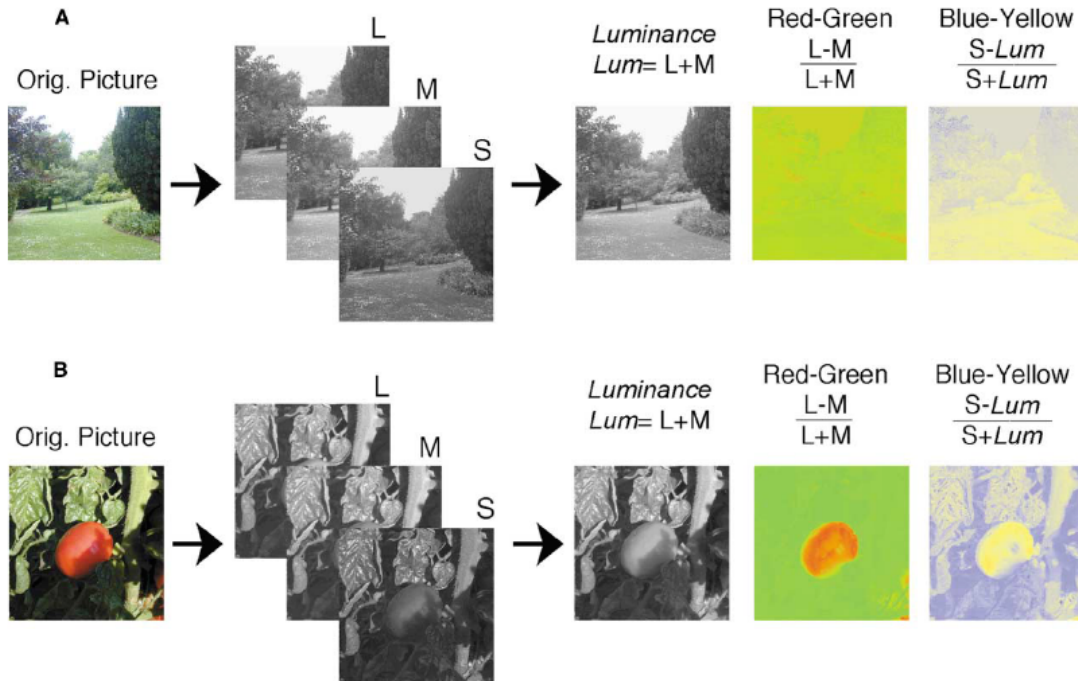
Ενώ λοιπόν από την εξέταση του φασματικού πλάτους μιας εικόνας, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το φασματικό περιεχόμενο της εικόνας, η φάση δεν παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα όταν αναπαρίσταται ως εικόνα. Παρόλα αυτά όταν κατασκευάζονται υβριδικές εικόνες οι οποίες περιέχουν το φασματικό πλάτος μιας εικόνας και τη φάση μιας άλλης φαίνεται πως η φάση είναι αυτή που καθορίζει την εμφάνιση της υβριδικής εικόνας. Μία πιο προσεκτική μελέτη των υβριδικών εικόνων αποκαλύπτει ότι το πλάτος και η φάση είναι και τα δύο σημαντικά για τον αξιόπιστο προσδιορισμό μιας εικόνας. Σε περιπτώσεις όπου η τιμή της κλίσης a είναι παρόμοια για διαφορετικές εικόνες, κάθε ρεαλιστική περιγραφή του φασματικού πλάτους πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια κατανέμεται στους διάφορους προσανατολισμούς.

Όσο αφορά το χρωματικό περιεχόμενο των φυσικών εικόνων, οι γραμμικοποιημένες εικόνες, από τις RGB χρωματικές συντεταγμένες μετασχηματίστηκαν στις LMS χρωματικές συντεταγμένες (βλ. σχήμα 2.20), με χρήση των συναρτήσεων απορρόφησης των κωνίων όπως υπολογιστήκαν από τους Smith και Pokorny (1975) και παρουσιάζονται στο Παράρτημα II. Στη συνέχεια οι LMS εικόνες αναλύθηκαν στις L, M, και S συνιστώσες, προσομοιώνοντας τις αποκρίσεις των κόκκινων, πράσινων και μπλε κωνίων αντίστοιχα. Οι εικόνες αυτές είναι αχρωματικές. Τα σημεία (pixels) στα οποία οι τιμές της φωτεινότητας είναι μεγαλύτερες, αντιστοιχούν σε σημεία στα οποία η απόκριση του αντίστοιχου φωτουποδοχέα είναι μεγαλύτερη. Υπολογίστηκε το φασματικό πλάτος για καθεμία από τις εικόνες αυτές, αθροίστηκε για όλους τους προσανατολισμούς και παραστάθηκε γραφικά συναρτήσεως της χωρικής συχνότητας σε λογαριθμικούς άξονες. Η μορφή που παρουσιάζει είναι γραμμική και παρόμοια με αυτή των αχρωματικών εικόνων. Τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες (Parraga et al., 1998, 2002). Η ενέργεια που περικλείει κάθε χρωματική συνιστώσα εξαρτάται από το χρωματικό περιεχόμενο της εικόνας και το ίδιο ισχύει για την κλίση a .

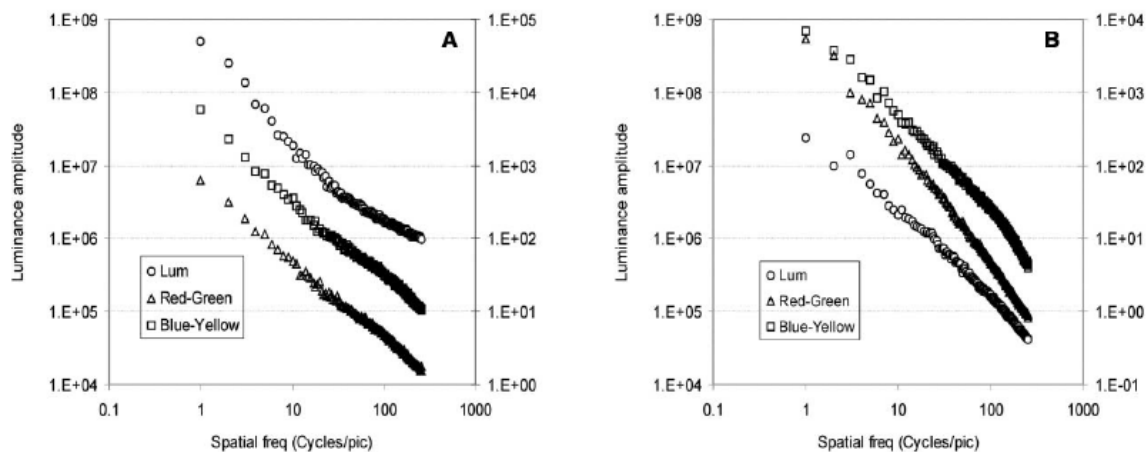
Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα 4.1, παρουσιάζονται δύο διαφορετικές φυσικές εικόνες. Ένα μακρινό τοπίο και μία κοντινή λήψη ενός φρούτου σε φύλλωμα, για τις οποίες δίπλα παρουσιάζονται οι θεωρητικές αποκρίσεις των L, M και S κωνίων οι οποίες υπολογίστηκαν σύμφωνα με την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία. Από τις αποκρίσεις των τριών φωτουποδοχέων, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι αναπαραστάσεις της φωτεινότητας και των κόκκινο-πράσινου και μπλε-κίτρινου χρωματικών καναλιών.

Στο σχήμα 4.1 (A) παρουσιάζεται γραφικά το φασματικό πλάτος συναρτήσεως της χωρικής συχνότητας για τη φωτεινότητα (luminance) και τα δύο χρωματικά κανάλια (red-green, blue-yellow) για το μακρινό τοπίο του σχήματος 4.1 (A). Είναι εμφανές ότι οι κλίσεις a των χρωματικών καναλιών είναι παρόμοιες με αυτές της φωτεινότητας. Στο σχήμα 4.2 (B) παρουσιάζεται γραφικά το φασματικό πλάτος για τη φωτεινότητα και τα δύο χρωματικά κανάλια της κοντινής σκηνής του σχήματος 4.1 (B). Η γραμμική συσχέτιση του φασματικού πλάτους από τη χωρική συχνότητα επιβεβαιώνεται και σε αυτή τη περίπτωση

μόνο που η κλίση του κόκκινο-πράσινο καναλιού είναι τώρα μεγαλύτερη (μεγαλύτερη κλίση δίνει περισσότερο βάρος στις μικρές χωρικές συχνότητες). Η παρατήρηση ότι το Fourier amplitude για το κόκκινο-πράσινο κανάλι έχει μεγαλύτερη κλίση για κοντινές εικόνες κοκκινωπών αντικειμένων σε πράσινο φύλλωμα επιβεβαιώνεται στην ίδια μελέτη για ένα μεγάλο αριθμό εικόνων.



Σχήμα 4.1: Υπολογισμός των αποκρίσεων των L,M,S κωνίων για δύο φυσικές εικόνες και η εξαγωγή από αυτές των τριών τελικών αναπαραστάσεων. Φωτεινότητα, κόκκινη-πράσινη χρωματικότητα και μπλε-κίτρινη χρωματικότητα (Parraga et al.,2002).



Σχήμα 4.2: Παραδείγματα φασματικών κλίσεων φωτεινότητας και χρωματικότητας δύο φυσικών εικόνων. Οι κύκλοι αντιστοιχούν στη φωτεινότητα, τα τρίγωνα στις αποκρίσεις των κόκκινο-πράσινο καναλιών και τα τετράγωνα στην μπλε-κίτρινη. Στον κάθετο άξονα έχει χρησιμοποιηθεί διαφορετική κλίμακα για την φωτεινότητα (αριστερός άξονας) και τη χρωματικότητα (δεξιός άξονας), λόγω της διαφορετικής διαβάθμισης στις τιμές των pixel για τις δύο αναπαραστάσεις (Parraga et al.,2002).

Κάτι τέτοιο έρχεται σε συμφωνία με ψυχοφυσικές μετρήσεις χρωματικής ευαισθησίας που αποδεικνύουν ότι το οπτικό σύστημα είναι πιο ευαίσθητο (low-pass) στις χαμηλές χρωματικές χωρικές συχνότητες (Mullen, 1985). Τα παραπάνω συνηγορούν στο ότι οι χωροχρωματικές ιδιότητες του κόκκινο-πράσινου χρωματικού καναλιού έχουν βελτιστοποιηθεί στο να ανιχνεύουν, σε κοντινή απόσταση (πχ. απόσταση κατάλληλη για το κόψιμο ενός φρούτου από το δέντρο), κοκκινωπά ή κιτρινωπά αντικείμενα πάνω σε φύλλωμα, επιβεβαιώνοντας έτσι την εξελικτική σημασία των στατιστικών χαρακτηριστικών των φυσικών εικόνων και την επίδραση τους στη διαμόρφωση του οπτικού συστήματος.

4.3 Επεξεργασία σύνθετων gratings. Η σημασία του contrast.

Πριν μελετηθεί η οπτική επεξεργασία των φυσικών εικόνων, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο προσδιορισμός του αν το οπτικό σύστημα αποκωδικοποιεί τοπικές (local) ή ολικές (global) μεταβολές του contrast. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία γιατί η συνήθης μετρική, το Michelson contrast, λαμβάνει υπόψη μόνο τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της φωτεινότητας του ερεθίσματος.

Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα gratings τα οποία δημιουργήθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουν την ίδια τιμή Michelson contrast με τις αντίστοιχες απλές συνιστώσες τους. Η ευαισθησία για τα απλά και τα σύνθετα ερεθίσματα καταγράφηκε τόσο για τιμές contrast κοντά στην ουδό, με μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης, όσο και για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού, με μετρήσεις χρόνων αντίδρασης.

Η ανάγκη για την εύρεση μιας μετρικής η οποία να συσχετίζει το τοπικό contrast των σύνθετων ερεθισμάτων με την καταγεγραμμένη ευαισθησία, όπως αυτή προέκυψε από τις ψυχοφυσικές μετρήσεις οδήγησε στην χρήση δύο άλλων μετρικών contrast. Αυτής του root-mean-square (RMS) contrast, C_{RMS} , το οποίο περιγράφει την τυπική απόκλιση των τιμών της φωτεινότητας και μίας νέας μετρικής τοπικού contrast, C_L , κατά την οποία γίνεται μια καταγραφή του Michelson contrast για όλες τις γειτονικές μπάρες του grating και λαμβάνεται το μέγιστο αυτών των τιμών.

Η μείωση της ευαισθησίας η οποία παρατηρήθηκε για τα σύνθετα ερεθίσματα, σε όλες τις περιπτώσεις, μπορεί μερικώς να αποδοθεί στην ελάττωση του τοπικού contrast των σύνθετων gratings. Για τιμές contrast κοντά στην ουδό, αυτό συμβαίνει όταν τα διαφορετικά νευρωνικά κανάλια υπεύθυνα για την ανίχνευση του ερεθίσματος παρουσιάζουν μεγάλες διάφορες στην ευαισθησία τους (στην περίπτωση των 4 και 16 c/deg η διαφορά στην ευαισθησία ήταν περίπου 20 λογαριθμικές μονάδες, dB). Όταν οι ευαισθησίες αυτών των καναλιών δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλες διαφορές (στην περίπτωση των 1 και 4 c/deg η διαφορά στην ευαισθησία ήταν περίπου 10 λογαριθμικές μονάδες, dB) παρατηρείται πιθανότατα άθροιση στις αποκρίσεις αυτών των καναλιών με αποτέλεσμα η καταγραφόμενη ευαισθησία να μην μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στη μείωση του τοπικού contrast του σύνθετου grating.

Στην περίπτωση των μετρήσεων για τιμές contrast μεγαλύτερων της ουδού, που πραγματοποιήθηκε με καταγραφή των χρόνων αντίδρασης, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε προβλέπει μείωση της ευαισθησίας λόγω της μείωσης του contrast του σύνθετου ερεθίσματος, αλλά η μείωση που καταγράφηκε ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με την προβλεπόμενη. Αυτό συνηγορεί στο ότι και άλλοι μηχανισμοί, οι οποίοι πιθανόν να σχετίζονται με το χρονικό προφίλ του ερεθίσματος, επιδρούν και μειώνουν περαιτέρω την ανιχνευσιμότητα του ερεθίσματος.

Είναι αυτονόητο ότι η σημασία του contrast είναι ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση των φυσικών εικόνων, όπου παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές τόσο στις τιμές της φωτεινότητας, όσο και στο τοπικό contrast. Είναι εμφανές πως το contrast μιας φυσικής σκηνής δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από μια μόνο τιμή και πόσο μάλλον από τη μετρική του Michelson contrast η οποία χρησιμοποιεί την μέγιστη και την ελάχιστη φωτεινότητα της εικόνας. Η κατανόηση επομένως του τρόπου με τον οποίο το οπτικό σύστημα κωδικοποιεί το τοπικό contrast απλών ερεθισμάτων όπως τα gratings, επιτρέπει πιθανότατα την επέκταση των συμπερασμάτων αυτών και στη περίπτωση της κωδικοποίησης, από το οπτικό σύστημα, του contrast πιο σύνθετων ερεθισμάτων όπως οι φυσικές εικόνες.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας έδειξαν επίσης πως η ευαισθησία του οπτικού μας συστήματος είναι μεγαλύτερη σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς, κυρίως κάθετους και οριζόντιους. Αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει την παρατήρηση ότι οι σύγχρονες κατασκευές που κυριαρχούν στον οπτικό μας κόσμο και οι οποίες παρουσιάζουν χωρικές συχνότητες των οποίων η ενέργεια είναι έντονα προσανατολισμένη όπως έγινε εμφανές από τη φασματική ανάλυση των εικόνων αυτών, προκαλούν διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του οπτικού μας συστήματος.

4.4 Μελλοντική εργασία

Η συσχέτιση του τοπικού contrast σύνθετων ερεθισμάτων με τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος οφείλει να εξεταστεί εις βάθος, τόσο για τιμές contrast κοντά στην ουδό, όσο και για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού. Στην πρώτη περίπτωση, τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα έδειξαν ότι η μείωση του τοπικού contrast επιτυγχάνει να εξηγήσει τη μείωση της ευαισθησίας. Στην δεύτερη περίπτωση όμως οι νευρωνικοί μηχανισμοί που επεξεργάζονται την οπτική πληροφορία φαίνεται να παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας αυτών των μηχανισμών είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μοντέλων που θα λαμβάνουν υπόψη και το χρονικό προφίλ των ερεθισμάτων.

Πέρα από τα σύνθετα gratings των οποίων οι συνιστώσες έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, ενδιαφέρον παρουσιάζει η πραγματοποίηση ψυχοφυσικών μετρήσεων με σύνθετα gratings των οποίων οι συνιστώσες παρουσιάζουν διαφορετικό προσανατολισμό. Τα ερεθίσματα αυτά συνδέονται στενότερα με τα ερεθίσματα του φυσικού κόσμου, αφού ενεργοποιούν ταυτόχρονα όχι μόνο νευρωνικά κανάλια συντονισμένα σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες, όπως τα ερεθίσματα που χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τώρα, αλλά και νευρωνικά

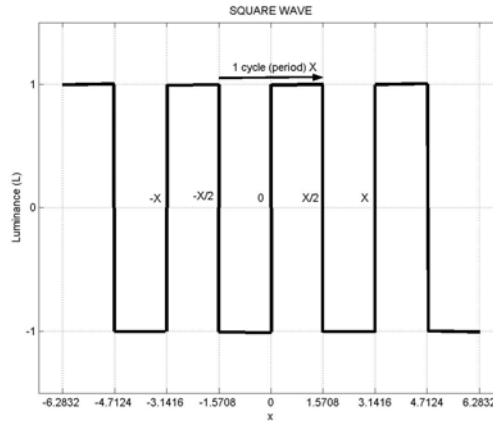
κανάλια συντονισμένα σε διαφορετικούς προσανατολισμούς. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η πιθανή συσχέτιση και άλλων μετρικών contrast που έχουν προταθεί, με τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας και ενσωμάτωση τους σε ένα μοντέλο το οποίο θα λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά των νευρωνικών χωρικών καναλιών του οπτικού συστήματος καθώς και τη σημασία του τοπικού contrast για την αντίληψη τέτοιων ερεθισμάτων.

Η σημασία του contrast είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συνθήκες λειτουργικής όρασης, καθώς σε σκηνές με χαμηλές τιμές contrast οι αποκρίσεις του οπτικού συστήματος παρουσιάζονται ελαττωμένες. Αυτό, για παράδειγμα, συμβαίνει σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού όπου η δεδομένη ελάχιστη φωτεινή ευαισθησία του οπτικού συστήματος, είναι υπεύθυνη για τη μείωση του προσλαμβανόμενου contrast της σκηνής. Ενδιαφέρον επομένως παρουσιάζει η διεξαγωγή ψυχοφυσικών μετρήσεων (π.χ. χρόνων αντίδρασης) με χρήση φυσικών εικόνων οι οποίες θα ληφθούν σε συνθήκες διαφορετικών τιμών εξωτερικής φωτεινότητας. Σε χαμηλές τιμές εξωτερικής φωτεινότητας αναμένεται η μείωση της τιμής του contrast της προσλαμβανόμενης εικόνας καθώς και μεταβολές στο χωρικό φασματικό της περιεχόμενο (π.χ. οι πιο 'σκοτεινές' εικόνες αναμένεται να περιέχουν λιγότερες υψηλές χωρικές συχνότητες). Στόχος μιας τέτοιας μελέτης θα μπορούσε να είναι η επίδραση των παραπάνω στις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος.

Τα αποτελέσματα μελετών όπως οι παραπάνω έχουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε θεματικές περιοχές που σχετίζονται με την εργονομία της όρασης, όπως για παράδειγμα η οδήγηση/πλοήγηση, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού όπου η οπτική πληροφορία είναι σημαντικά μειωμένη.

Παράρτημα Ι

Υπολογισμός του αναπτύγματος Fourier τετραγωνικού κύματος, περιόδου X .



Σχ. Ι(1): Square wave, με περίοδο X , συμμετρικό ως προς την αρχή των αξόνων.

Το κύμα φαίνεται παραπάνω σχήματος περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση,

$$f(x) = \begin{cases} +1, & 0 < x < X/2 \\ -1, & X/2 < x < X \end{cases}$$

Επειδή η $f(x)$ είναι περιττή θα είναι $A_m = 0$, και

$$B_m = \frac{2}{X} \int_0^{X/2} (+1) \sin mkx dx + \frac{2}{X} \int_{X/2}^X (-1) \sin mkx dx$$

δηλαδή,

$$B_m = \frac{1}{m\pi} [-\cos mkx]_0^{X/2} + \frac{1}{m\pi} [\cos mkx]_{X/2}^X$$

επειδή όμως $k = \frac{2\pi}{X}$, παίρνουμε

$$B_m = \frac{2}{m\pi} (1 - \cos m\pi) \text{ , για } m = 1, 2, 3, \dots$$

Επομένως οι συντελεστές Fourier είναι,

$$B_1 = \frac{4}{\pi} \text{ , } B_2 = 0 \text{ , } B_3 = \frac{4}{3\pi} \text{ ,}$$

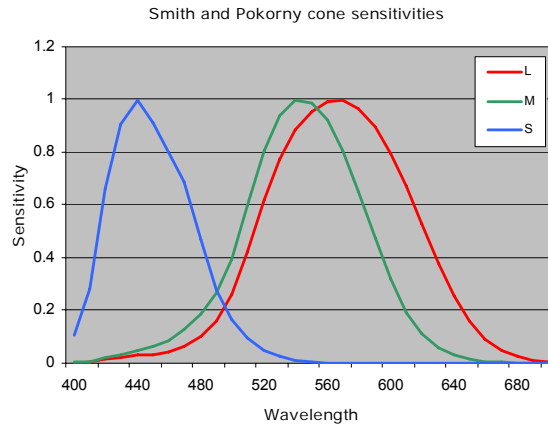
$$B_4 = 0 \text{ , } B_5 = \frac{4}{5\pi} \text{ , } \dots \text{ ,}$$

και η σειρά που προκύπτει είναι,

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \left(\sin \kappa\chi + \frac{1}{3} \sin 3\kappa\chi + \frac{1}{5} \sin 5\kappa\chi + \dots \right) .$$

Παράρτημα II

Φασματικές ευαισθησίες των κωνίων κατά Smith και Pokorny (1975)



Wavelength (nm)	L	M	S
400	0.002656	0.002823	0.107681
410	0.006889	0.007670	0.284852
420	0.015822	0.018901	0.659235
430	0.023314	0.031709	0.907549
440	0.030096	0.047706	1.000000
450	0.034307	0.063548	0.910458
460	0.041195	0.085998	0.799135
470	0.062656	0.130089	0.689096
480	0.101890	0.188790	0.467724
490	0.161991	0.267030	0.276382
500	0.262851	0.396242	0.163569
510	0.423019	0.594826	0.095565
520	0.616737	0.807756	0.047387
530	0.773215	0.940979	0.025602
540	0.883365	0.996575	0.012414
550	0.953806	0.986529	0.005454
560	0.993322	0.922486	0.002533
570	0.997378	0.806343	0.001445
580	0.964539	0.650729	0.001161
590	0.894190	0.476991	0.000812
600	0.794603	0.317629	0.000610
610	0.670301	0.193308	0.000312
620	0.530066	0.110149	0.000198
630	0.379944	0.058332	0.000090
640	0.256419	0.029558	0.000052
650	0.159030	0.014430	0.000025
660	0.091422	0.006990	0.000014
670	0.048166	0.003330	0.000008
680	0.025667	0.001641	0.000004
690	0.012422	0.000750	0.000002
700	0.006210	0.000368	0.000001

Παράρτημα III

Ρυθμίσεις της φωτογραφικής μηχανής Nikon Coolpix 5700, κατά τη βαθμονόμηση και τη λήψη εικόνων.

Παράμετρος	Επιλογή	Σημειώσεις
Resolution Format	HI (2560 x 1920) TIF	Η πραγματική εικόνα Χωρίς συμπίεση Ρυθμίζει την ευαισθησία της κάμερας. Ισοδυναμεί με ένα ISP 200 φιλμ.
ISO rating	200	
Digital zoom	Off	
White balance	Cloudy	Διατηρεί τα φυσικά χρώματα σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Η επιλογή "cloudy" είναι κατάλληλη για διάφορες εξωτερικές συνθήκες φωτισμού.
Aperture range Flash	F7.4 Off	Μέγιστο zoom.
Mode / Exposure	Aperture priority	Το διάφραγμα ρυθμίζεται στο μέγιστο F7.4 , που μεγιστοποιεί το βάθος πεδίου, επιτρέποντας στο μεγαλύτερο μέρος της σκηνής να είναι εστιασμένη. Με αυτή την επιλογή ο χρόνος έκθεσης (integration time) ρυθμίζεται αυτόματα.
Metering	Spot / Matrix	
Saturation control	Normal	
Lens	Normal	
Image sharpening	Off	
Autobraking	Off	
Noise reduction	Off	

Παράρτημα IV

Κώδικες MATLAB

1. Δημιουργία ενός απλού Gabor grating.

```
[x,y]=meshgrid(-200:200,-200:200);

c = 0.5;          %contrast
mean_lum = 30;   %mean luminance
f=0.03*2*pi;     %spatial frequency
angle=17*pi/180; %17 deg orientation; change it to whatever you want

a=cos(angle)*f;
b=sin(angle)*f;
Grating= mean_lum*(1+c*sin(a*x+b*y));
Gabor=exp(-((x/100).^2)-((y/100).^2)).*Grating;
Gabor=(Gabor-min(Gabor(:)))/(max(Gabor(:))-min(Gabor(:)));
figure; imshow(Gabor)
```

2. Δημιουργία ενός compound grating (mathematical addition)

```
[x,y]=meshgrid(-200:200,-200:199);
z = -2:0.01:2;

f1 = 1; f2 = 4;
c1 = 0.5; c2 = 0.5;
mean_lum = 30;

%Simple Components
y1= mean_lum * (1 + c1*sin(2*pi*f1*z));
y2= mean_lum * (1 + c2*sin(2*pi*f2*z));

%Michelson & RMS Contrast of the Simple Component
michelson_single = (max(y1(:))-min(y1(:)))/(max(y1(:))+min(y1(:)))
rms_single = std(y1(:))

% Compound Grating
compound = mean_lum*(1 + c1*sin(2*pi*f1*z)+ c2*sin(2*pi*f2*z));

%Michelson & RMS Contrast of the Compound

mich_comp = (max(compound(:))-
min(compound(:)))/(max(compound(:))+min(compound(:)))
rms_comp = std(compound(:))

figure; plot(z,compound), hold on, plot(z,y1,'r')
```

```

% Display the Grating as an Image
f1_img = f1/100;
f2_img = f2/100;

compound_image = mean_lum*(1 + c1*sin(2*pi*f1_img*x)+ c2*sin(2*pi*f2_img*x));

maxi = max(compound_image(:));
mini = min(compound_image(:));
compound_image = (compound_image - mini)/(maxi - mini);
figure; imshow (compound_image)

```

3α. Συνάρτηση που γραμμικοποιεί μια εικόνα με τις παραμέτρους της κάμερας μας (Aphrodite), του Alex Parraga.

```

function Dummypic = Linearise_nikonpix(orig_pic, IT);

Dummypic = zeros(size(orig_pic));

%params=[0.62950    1.00938    0.8618    1.15321    1.00938000 1 1.28874
          1.00938    0.927871446]; %Frodo

params= [0.83410    1.01095    0.7297120884    1.01095397  1
         1.87510    1.01095    0.924098553]; %Aphrodite

A = [params(1) params(4) params(7)];
b = params(5);
C = [params(3) params(6) params(9)];

for k=1:3 % Do each layer in turn
    Dummypic(:,k) = (A(k)*(b.^orig_pic(:,k)-C(k)))./IT;
end %k

```

3β. Ρουτίνα που διαβάζει την παραπάνω συνάρτηση

```

I = imread ('orig_pic');

%In a truecolor image of class double, the data values are floating-point %numbers
in the range [0, 1].
%In a truecolor image of class uint8, the data values are integers in the range %[0,
%255] and for truecolor image of class uint16 the data values are integers in %the
%range [0, 65535]. If you want to convert a truecolor image from one data %type
%to the other, you must rescale the data.
%For example, this statement converts a uint8 truecolor image to double,
%RGB64 = double(RGB8)/255;

I2 = double(I); %/255;
I3 = Linearise_nikonpix(I2, IT); % Insert the Integration Time Here
I4 = uint8(I3);

```

figure; imshow (I4)

4α. Συνάρτηση που γραμμικοποιεί τις εικόνες της βάσης δεδομένων McGill, της Adriana Olmos, (Olmos, A. and Kingdom, F. A. A. (2004) McGill Calibrated Colour Image Database, <http://tabby.vision.mcgill.ca>)

```
% This program linearise the RGB values of the McGill Colour Image Database
% according to the camera paramenteres - CoolPix 5700(Pippin/Merry)
%
% Usage:
%   [II] = rgb2linear(I)
% Input:
%   I = Image name
% Output:
%   II = Linearised image matrix. II is a three dimensional image (type double)
%   II(:, :, 1) = Red plane
%   II(:, :, 2) = Green plane
%   II(:, :, 3) = Blue plane
%
% Author:
%   Adriana Olmos Mar/2004 - Mcgill Vision Research
% Last modification:
%   Feb/2005 - Exposure time stamp added
%   Mar/2004 - Main code

function [II] = rgb2linear(imageName)

%Checking the input arguments
if nargin ~= 1
    error('Wrong number of input arguments')
end
%Error message
Message = ['The name of the camera used to take this image could not be found in
the header. Please make sure that the image is TIF format and downloaded from
the McGill Colour Calibration Database.'];

% Checking that the Image can be read.
fid = fopen(imageName, 'r');
if (fid == -1)
    error(['The file could not be open, please check the image name, path and/or image
permissions.']);
end

% Reading image
I = double(imread(imageName));
% Reading Image header
```

```

info = imfinfo(imageName);

% PARAMETRES
if (info(1).ImageDescription(1) == ' ')
    error(Message);
else
    if (all(info(1).ImageDescription(1:5)=='pippi') && all(info(1).Format(1:3)=='tif'))
        % Camera parameters - Pippin
        a_R= 5.562441185;
        a_G= 8.876002262;
        a_B= 7.233814813;
        b= 1.009696031;
    else
        if(all(info.ImageDescription(1:5)=='merry') && all(info(1).Format(1:3)=='tif'))
            % Camera parameters - Merry
            a_R= 7.320565961;
            a_G= 12.0579051;
            a_B= 10.6112984;
            b= 1.008634316;
        else
            error(Message);
        end
    end
end

%Linearising the image
II = zeros(size(I));
II(:,:,1) = a_R.*(b.^I(:,:,1)-1);
II(:,:,2) = a_G.*(b.^I(:,:,2)-1);
II(:,:,3) = a_B.*(b.^I(:,:,3)-1);

%Exposure Time Stamp
ET = info(1).ImageDescription(8:length(info(1).ImageDescription)); % Exposure Time
display(['Exposure time = ' ET 'secs' ])
II = II./str2double(ET);

```

4β. Συνάρτηση που γραμμικοποιεί και στη συνέχεια μετατρέπει στις LMS χρωματικές συντεταγμένες τις εικόνες της βάσης δεδομένων McGill, της Adriana Olmos, (Olmos, A. and Kingdom, F. A. A. (2004) McGill Calibrated Colour Image Database, <http://tabby.vision.mcgill.ca>)

```

% This program computes the LMS cone responses of the RGB images in the
% McGill Colour Image Database.
% The LMS cone responses are based on the Smith and Pokorney functions
%
% Usage:
% [LMS] = rgb2lms(I)
% Input:

```

```

% I = Image name
% Output:
% LMS = LMS image matrix. LMS is a three dimensional matrix (type double )
% LMS(:,:,1) = L cone responses
% LMS(:,:,2) = M cone responses
% LMS(:,:,3) = S cone responses
%
% Author:
% Adriana Olmos Mar/2004 - McGill Vision Research
%
% Last modification:
% Feb/2005 - Exposure time stamp added
% Mar/2004 - Main code

function [LMS] = rgb2lms(imageName)

%Checking the input arguments
if nargin ~= 1
    error('Wrong number of input arguments')
end
%Error message
Message = ['The name of the camera used to take this image could not be found in
the header. Please make sure that the image is TIF format and downloaded from
the McGill Colour Calibration Database.'];

% Checking that the image can be read.
fid = fopen(imageName, 'r');
if (fid == -1)
    error(['The file could not be open, please check the image name, path and/or image
permissions.']);
end

% Reading image
I = double(imread(imageName));
% Reading Image header
info = imfinfo(imageName);

% PARAMETRES
if (info(1).ImageDescription(1) == ' ')
    error(Message);
else
    if(all(info.ImageDescription(1:5)=='merry') && all(info(1).Format(1:3)=='tif'))

% T = [ 0.428443253 0 0.075993851
% 0.243026144 0 0.142845175
% 0.155766424 0 0.711890401];
% Camera parameters - Merry

```

```

    T = [0.428443253 0.495562896 0.075993851
         0.243026144 0.614128681 0.142845175
         0.155766424 0.132343175 0.711890401];
    a_R = 7.320565961;
    a_G = 12.0579051;
    a_B = 10.6112984;
    b = 1.008634316;
else
    if (all(info(1).ImageDescription(1:5)=='pippi') && all(info(1).Format(1:3)=='tif'))
    % Camera parameters - Pippin
        T = [0.431088433 0.494438389 0.074473178
             0.245488691 0.614786761 0.139724548
             0.166472303 0.124487321 0.709040376];
        a_R = 5.562441185;
        a_G = 8.876002262;
        a_B = 7.233814813;
        b = 1.009696031;
        else
            error(Message);
        end
    end
end

%Linearising the Image
II = zeros(size(I));
II(:,1) = a_R.*(b.^I(:,1))-1;
II(:,2) = a_G.*(b.^I(:,2))-1;
II(:,3) = a_B.*(b.^I(:,3))-1;

%Exposure Time Stamp
ET = info(1).ImageDescription(8:length(info(1).ImageDescription)); % Exposure Time
display(['Exposure time = ' ET 'secs'])
II = II./str2double(ET);

rows=size(II,1); cols=size(II,2);
LMS = zeros(size(II));

%Computing the LMS cone responses through the matrix transformation "T"
for i=1:rows
    for j=1:cols
        V(1,1) = II(i,j,1); V(2,1) = II(i,j,2); V(3,1) = II(i,j,3);
        lms = T*V; % V is the RGB vector at each pixel positon in the loop
        LMS(i,j,1) = lms(1,1); LMS(i,j,2) = lms(2,1); LMS(i,j,3) = lms(3,1);
    end
end
end

```


5. Συνάρτηση που δημιουργεί ένα εκ περιστροφής σιγμοειδές φίλτρο

```
function [Filter] = HatFilter(a,b,Do,SD)

% Creates a 'hat' filter.
% a,b: The size (in pixels) of the filter.
% Do: The radius of the filter.
% SD: The 'roll-off' rate of the filter.

% Set up meshgrid to compute filter functions
% running from 1 to a and 1 to b. Recall that
% meshgrid reverses the order of rows and
% columns, so the final result must be transposed
% in order to preserve the original order of the coordinates.

[U,V] = meshgrid(1:a,1:b);

% Compute distances D(U,V)

D = ((U-a/2).^2 + (V-b/2).^2).^0.5;

% Compute filter's free parameters
% The values of the parameters are such that,
% the filter is 1 at the center and 0 at the periphery

n = 1./(1./(1+exp(-Do/SD))-1./(1+exp(sqrt(2)*a/2-Do)/SD));
m = -n./(1+exp((sqrt(2)*a/2-Do)/SD));

Filter = -m + n./(1 + exp((D-Do)/SD));
```

6. Δυσδιάστατος μετασχηματισμός Fourier. Υπολογισμός των amplitude και power spectrum.

Καλεί τη συνάρτηση, HatFilter (5).

```
I = imread('image');

% Crop the Image
% 512 x 512
I = imcrop(I1, [39 39 511 511]);
Img = double(rgb2gray(I));

[a,b] = size(Img);
[X,Y] = meshgrid(-b/2:b/2-1,-a/2:a/2-1);
Fx = -a/2:a/2-1;
Fy = -b/2:b/2-1;

% Filter the Image
```

```

Do=230; SD=10; % 512x512 image
% Do=350; SD=13; % 812x812 image
Filtr = HatFilter(a,b,Do,SD);
Img = Img.*Filtr;

% 2-Dimensional Fourier Transform
ImgFFt = fft2(Img);
ImgFFt(1,1) = 0; %Get Rid of the DC Component
ImgFFtSft = fftshift(ImgFFt);

AmplSpectImg = abs(ImgFFtSft);
PowerSpectImg= AmplSpectImg.^2;

% Display the Amplitude Spectrum
figure; imagesc(Fx,Fy, log10(AmplSpectImg))
% Display the Power Spectrum
figure; imagesc(Fx,Fy, log10(PowerSpectImg))

```

7. Συνάρτηση για τον υπολογισμό της μέσης τιμής ορθογωνίου πίνακα, για όλους τους προσανατολισμούς.

```

% rotavg.m - function to compute rotational average of (square) array
% function f = rotavg(array)
% array can be of dimensions N x N x M, in which case f is of dimension NxM.
% N should be even.

```

```

function f = rotavg(array)

[N N M]=size(array);
[X Y]=meshgrid(-N/2:N/2-1,-N/2:N/2-1);
[theta rho]=cart2pol(X,Y);

fprintf('initializing indices\n');

rho=round(rho);
i=cell(N/2+1,1);
for r=0:N/2
    i{r+1}=find(rho==r);
end

fprintf('doing rotational average\n');

f=zeros(N/2+1,M);

for m=1:M

    a=array(:, :, m);

```

```

for r=0:N/2
    f(r+1,m)=mean(a(i{r+1}));
end

```

```

end

```

8. Υπολογισμός του μονοδιάστατου Fourier amplitude, με άθροιση για όλους τους προσανατολισμούς.

Καλεί τις συναρτήσεις, HatFilter (5), rotavg (7)

```

I = imread('image');
% Crop the Image
% 512 x 512
I = imcrop(I, [39 39 511 511]);
IGray = double(rgb2gray(I));

[a,b] = size(IGray);
[X,Y] = meshgrid(-b/2:b/2-1,-a/2:a/2-1);
Fx = -a/2:a/2-1; Fy = -b/2:b/2-1;

% Get Rid of the DC Component?
% IGrayDc=IGray-mean(IGray(:));

% Filter the Image
Do=230; SD=13; % 512x512 image
%Do=350; SD=13; % 812x812 image
Filtr = HatFilter(a,b,Do,SD);
IGray = IGray.*Filtr;

% 2-Dimensional Fourier Transform
ImgFFt = fft2(IGray);
ImgFFt(1,1) = 0; %Get Rid of the DC Component
ImgFFtSft = fftshift(ImgFFt);
AmplSpectImg = abs(ImgFFtSft);

% Average Across Orientations
F =1:a/2;
AvrgAmplImg=rotavg(AmplSpectImg);
AvrgAmplImg=log(AvrgAmplImg(2:end));
[slope]=polyfit(log(F'),AvrgAmplImg,1);
y = log(F)*slope(1) + slope(2);
fprintf(' The slope value is:'); slope(1)
figure; semilogx(F,AvrgAmplImg,'o'), hold on
semilogx(F,y,'r')

```

9. Υπολογισμός του μονοδιάστατου Fourier amplitude, με άθροιση για όλους τους προσανατολισμούς, για τα τρία κανάλια χρωματικής εικόνας. Προαιρετικά είναι δυνατή η μετατροπή στις LMS χρωματικές συντεταγμένες.

Καλεί τις συναρτήσεις, HatFilter (5), rotavg (7) και rgb2lms (4β)

```
I = imread('image');
%I = rgb2lms('image'); % Only for McGill' s images
% Crop the Image
% 400 x 400
% I = imcrop(I, [141 141 399 399]);
% 512 x 512
I = imcrop(I, [39 39 511 511]);

[a,b,c] = size(I);
[X,Y] = meshgrid(-b/2:b/2-1,-a/2:a/2-1);
Fx = -a/2:a/2-1; Fy = -b/2:b/2-1;

R=I(:, :,1); G=I(:, :,2); B=I(:, :,3);
Rdbl = double(R); Gdbl = double(G); Bdbl = double(B);

% Create a 'Hat' Filter
Do=230; SD=13;
Filtr = HatFilter(a,b,Do,SD);

%Create the Filtered Image
Rnd =Rdbl.*Filtr; Gnd =Gdbl.*Filtr; Bnd =Bdbl.*Filtr;

% 2-Dimensional Fourier Transform
Rfft = fft2(Rnd); Gfft = fft2(Gnd); Bfft = fft2(Bnd);

%Get Rid of the DC Component
Rfft(1,1) = 0; Gfft(1,1) = 0; Bfft(1,1) = 0;

RfftSft = fftshift(Rfft);
GfftSft = fftshift(Gfft);
BfftSft = fftshift(Bfft);
AmplSpectR = abs(RfftSft);
AmplSpectG = abs(GfftSft);
AmplSpectB = abs(BfftSft);

% Rotate & Average
F =1:a/2;
AvrgAmplR=rotavg(AmplSpectR);
AvrgAmplG=rotavg(AmplSpectG);
AvrgAmplB=rotavg(AmplSpectB);
AvrgAmplR=log(AvrgAmplR(2:end));
```

```

AvrgAmplG=log(AvrgAmplG(2:end));
AvrgAmplB=log(AvrgAmplB(2:end));
[slopeR]=polyfit(log(F'),AvrgAmplR,1);
[slopeG]=polyfit(log(F'),AvrgAmplG,1);
[slopeB]=polyfit(log(F'),AvrgAmplB,1);
yR = log(F)*slopeR(1) + slopeR(2);
yG = log(F)*slopeG(1) + slopeG(2);
yB = log(F)*slopeB(1) + slopeB(2);
fprintf(' The Red slope value is:'); slopeR(1)
fprintf(' The Green slope value is:'); slopeG(1)
fprintf(' The Blue slope value is:'); slopeB(1)

% Plot the Results
figure; semilogx(F,AvrgAmplR,'ro'), hold on, semilogx(F,yR,'r')
hold on,semilogx(F,AvrgAmplG,'go'), hold on, semilogx(F,yG,'g')
hold on,semilogx(F,AvrgAmplB,'bo'), hold on, semilogx(F,yB,'b')

figure; semilogx(F,AvrgAmplR,'ro'), hold on, semilogx(F,yR,'k')
figure; semilogx(F,AvrgAmplG,'go'), hold on, semilogx(F,yG,'k')
figure; semilogx(F,AvrgAmplB,'bo'), hold on, semilogx(F,yB,'k')

```

10. Δημιουργία υβριδικών εικόνων

```

I1 = imread('image1');
I2 = imread('image2');

% Crop the Image
% 512 x 512
I1 = imcrop(I1, [39 39 511 511]);
I2 = imcrop(I2, [39 39 511 511]);
Img1 = double(rgb2gray(I1));
Img2 = double(rgb2gray(I2));

[a,b] = size(Img1);
[X,Y] = meshgrid(-b/2:b/2-1,-a/2:a/2-1);
Fx = -a/2:a/2-1;
Fy = -b/2:b/2-1;

% 2-Dimensional Fourier Transform
Img1FFt = fft2(Img1);
Img2FFt = fft2(Img2);
% Img1FFtSft = fftshift(Img1FFt);
% Img2FFtSft = fftshift(Img2FFt);

AmplSpectImg1 = abs(Img1FFt);
AmplSpectImg2 = abs(Img2FFt);
PhaseSpectImg1= angle(Img1FFt);

```

```

PhaseSpectImg2= angle(Img2FFT);

i = sqrt(-1); %imaginary component

% Create the Hybrid Images
HybridFFT1 = AmplSpectImg1.*exp(i*PhaseSpectImg2);
HybridFFT2 = AmplSpectImg2.*exp(i*PhaseSpectImg1);
Hybrid1 = real(iff2(HybridFFT1));
Hybrid2 = real(iff2(HybridFFT2));

% Display the Hybrid Images
Hybrid1=(Hybrid1-min(Hybrid1(:)))/(max(Hybrid1(:))-min(Hybrid1(:)));
Hybrid2=(Hybrid2-min(Hybrid2(:)))/(max(Hybrid2(:))-min(Hybrid2(:)));
figure; imshow(Hybrid1)
figure; imshow(Hybrid2)

```

11. Δημιουργία low pass φίλτρων

```

function [H] = lpfilter(type,M,N,D0,n)

%LPFILTER Computes freq. domain lowpass filters
%       H = lpfilter (type,M,N,D0,n) creates the
%       transfer function of a lowpass filter, H, of
%       the specified type and size MxN. Acceptable
%       values for type, D0, and n are:
%       'ideal' Ideal lowpass filter with cutoff frequency D0.
%       'btw' Butterworth lowpass filter of order n, and cutoff D0.
%       'gauss' Gaussian lowpass filter with cutoff (standard deviation)D0.
%       M and N should be even numbers for DFT filtering.
%       Verify the number of inputs

error(nargchk(4,5,nargin));

% Issue warning if M or N not even

L1 = M/2;
L2 = N/2;
if((L1-round(L1)) | (L2-round(L2)))
    disp('Warning: M & N must be even for DFT filtering')
end

%       Set up meshgrid to compute filter functions
%       running from 0 to M-1 and 0 to N-1. But,
%       recall that U and V run from 1 to M and 1 to N,
%       respectively. Recall that
%       meshgrid reverses the order of rows and
%       columns, so the final result must be transposed

```

```

%           in order to preserve the original order of
%           of the coordinates.

[U,V] = meshgrid(0:M-1,0:N-1);

% Compute the filter center
U0=L1;
V0=L2;

% Compute distances D(U,V)
D=((U-U0).^2 + (V-V0).^2).^0.5;

% Begin filter computations
switch type
    case 'ideal'
        H = D<=D0;
    H = H';
    case 'btw'
        H = 1./(1 + (D./D0).^(2*n));
    H = H';
    case 'gauss'
        H = exp(-(D.^2)./(2*(D0^2)));
    H = H';
    otherwise
        error('Unknown filter type')
end
end

```

12. Δημιουργία φιλτραρισμένων εικόνων

Καλεί τη συναρτήση, `lpfilter` (11)

```

I = imread('image');
IGray = rgb2gray(I);
[a,b]= size (IGray);
figure; imshow(IGray)

ImgFFt = fft2(IGray);
ImgFFtSft = fftshift(ImgFFt);
AmplSpectImg = abs(ImgFFtSft);
PowrSpectImg = AmplSpectImg.^2;

LowPassFiltr = lpfilter('btw',a,b,50,2);
HighPassFiltr = 1 - LowPassFiltr;

LowFiltrFreq = ImgFFtSft.*LowPassFiltr;
HighFiltrFreq = ImgFFtSft.*HighPassFiltr;

LowFiltrImg =real(iff2(iff2shift(LowFiltrFreq)));

```

```
HighFiltrImg =real(iff2(fftshift(HighFiltrFreq)));
```

```
LowFiltrImg = (LowFiltrImg-min(LowFiltrImg(:)))/(max(LowFiltrImg(:))-  
min(LowFiltrImg(:)));
```

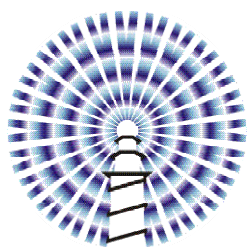
```
HighFiltrImg = (HighFiltrImg-min(HighFiltrImg(:)))/(max(HighFiltrImg(:))-  
min(HighFiltrImg(:)));
```

```
figure; imshow(LowFiltrImg)
```

```
figure; imshow(HighFiltrImg)
```


Παράρτημα V

ECVP 2005, abstract.



Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του Κεφαλαίου 3, παρουσιάστηκαν στο European Conference of Visual Perception (ECVP), το οποίο πραγματοποιήθηκε στη La Coruna της Ισπανίας από τις 22 έως τις 26 Αυγούστου 2005.

Εδώ παρατίθεται η περίληψη της εργασίας όπως δημοσιεύθηκε στο περιοδικό *Perception* (*Perception: ECVP 2005 abstracts*), καθώς και το poster της εργασίας.

Visual reaction times to compound gratings

P Sapountzis, S Plainis, I J Murray[¶], I G Pallikaris

VEIC, Department of Ophthalmology, School of Medicine, University of Crete, 71003 Heraklion, Crete, Greece; [¶] Faculty of Life Sciences, University of Manchester, Manchester M60 1QD, UK

Simple reaction times (RTs) show a strong relationship with contrast when first-order stimuli are used (eg simple gratings; Plainis and Murray, 2000 *Neuropsychologia* **38** 1555 - 1564). We investigated the link between RTs and suprathreshold contrast using second-order structures, such as compound gratings. Stimuli were presented on a Sony GDM F-520 CRT display by means of a VSG2/5 stimulus generator card (CRS, Rochester, UK). They were Gabor patches (plaids and compound gratings containing sinusoidal components of two frequencies), measured 100 pixels in diameter at half height in the centre of the display, subtending 1.15 deg at a 2 m distance. Spatial frequencies of 1, 4, and 16 cycles deg⁻¹ at 8 different orientations were tested. Monocular RTs were measured over a range of suprathreshold Michelson contrasts. Contrast detection thresholds were also assessed by the methods of adjustment. Three subjects participated in the experiments. We found that RTs to complex grating patterns increase exponentially with contrast, with higher spatial frequencies producing steeper functions. Sensitivity, as derived from the RT versus contrast functions, varies with orientation of the gratings similarly for both first-order and second-order stimuli. However, compound gratings are in all conditions less visible than their sinusoidal components. These values agree with sensitivities derived by the contrast detection thresholds. The results support the hypothesis that second-order stimuli are better defined by a change in higher-order image statistics, such as local contrast. Moreover, orientational tuning seems to precede the detection of second-order stimuli.



VISUAL REACTION TIMES TO COMPOUND GRATINGS

P Sapountzis¹, S Plainis¹, IJ Murray², IG Pallikaris¹

¹VEIC, School of Health Sciences, University of Crete, Greece
²Faculty of Life Sciences, The University of Manchester, UK



1. INTRODUCTION

Visual reaction times (RTs) show a strong correlation with suprathreshold contrast when simple achromatic (e.g. Plainis and Murray, 2000) and chromatic (McKeefry et al., 2003) sine-wave gratings are used. Although it is well established (e.g. Graham and Nachmias, 1971) that compound ("mathematically" added, Eq. 2) gratings are slightly more detectable than their sine-wave components, supra-threshold performance for this type of gratings has not been studied.

The objective of this study was to use contrast sensitivity measures and reaction time (RT) data in order to investigate threshold and supra-threshold processing of simple and compound sine-wave gratings as a function of their orientation.

2. METHODS

Stimuli were presented on a Sony GDM F-520 CRT display (mean luminance of 30 cd/m², frame rate of 120 Hz) by means of a VSG/2/5 stimulus generator card (CRS, Rochester, UK). They were Gabor patches, measured 100 pixels in diameter at half height in the centre of the display, with a standard deviation subtending 1.2 deg at a 2 m distance. Stimuli were simple gratings (see Eq.1) of spatial frequencies 1, 4, and 16 c/deg and compound gratings with components of same orientation and spatial frequencies 1 + 4 c/deg, and 4 + 16 c/deg (see Fig1). The presentation of compound patterns was achieved using a frame interleaving technique, giving a picture refresh rate of 60 Hz.

The components were added so that the maximum and minimum luminances of the compound pattern were equal to those of their sine-wave components, resulting to equal Michelson contrast, C_m (Fig 2 and Eq. 3). This was done in order to avoid any improvement in sensitivity due to the increased contrast of the resulting pattern. Moreover, in order to study sensitivity to local contrast changes contrast was expressed in other metrics such as: i) the root-mean-square (RMS) contrast, C_{RMS}, i.e. the standard deviation of the luminance values and ii) a measure of local contrast, C_l, which was defined by the maximum Michelson contrast between two adjacent bars of the stimulus used.

Data were collected from the dominant eye of two observers (SP, TG) who were spectacle-corrected for distance. Nine different orientations were tested (0, 22.5, 45, 67.5, 90, 122.5, 145, 167.5, 180 deg). Monocular contrast sensitivity was assessed using the method of adjustment. For reaction timing, the stimuli appeared / disappeared with a square wave temporal profile. Monocular RTs (64 responses) were measured over a range of suprathreshold CM, in equal steps from maximum contrast to 2nd threshold on a 1/C scale. RT-gain (a measure of suprathreshold sensitivity) was derived by the inverse of the RT vs 1/Contrast slope (see Fig 3).

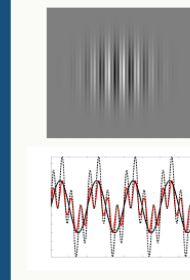


Figure 1. An example of the compound Gaussian windowed pattern with its SD subtending 1.2 deg at a 2m distance. The ratio of the spatial frequencies of its components is 4.

Figure 2. Luminance profiles of simple and compound gratings. When simple patterns are mathematically added, the profile of the compound grating follows that of the black dashed line. In this study a 'contrast reduction' factor K (Eq. 2) was used with the resulting compound grating having a profile depicted by the solid red line and a C equal to its components.
a) Simple grating, black solid line
 $L(x) = L_m(1 - K) \sin(2\pi f_1 x) \sin(2\pi f_2 x)$ (Eq. 1)
b) Compound grating, mathematical addition, dashed line
 $L(x) = L_m(1 - K) \sin(2\pi f_1 x) \sin(2\pi f_2 x) + L_m \sin(2\pi f_1 x) \sin(2\pi f_2 x)$ (Eq. 2)
c) Compound grating, current study addition, solid red line
 $L(x) = L_m(1 - K) \sin(2\pi f_1 x) \sin(2\pi f_2 x) + L_m \sin(2\pi f_1 x) \sin(2\pi f_2 x)$ (Eq. 3)

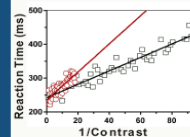


Figure 3. Determining the RT gain. The 1/C was adjusted in 64 steps from the maximum to 2nd threshold. A single RT was recorded to each contrast, values less than 200 and greater than 600 ms were excluded. RT gain was computed as the reciprocal of the slope. (See Plainis and Murray, 2000). In this graph RTs for a 16 c/deg orientation compound pattern (1+4 c/deg, red line) and a sine-wave grating (4 c/deg, grey line) are shown. Slope values are 1.59 and 4.17, respectively (RT gain is 0.59 and 0.24, respectively).

3a. RESULTS - Contrast Sensitivity (Threshold Measurements)

Fig 4a and 4b depict contrast sensitivity data (two subjects) for a compound grating (components: 4+16 c/deg and 1+4 c/deg respectively) and its sine-wave components as a function of orientation. Two points have to be raised. First, orientation tuning (at ~90 deg) in all cases is evident, although its profile is different for the 16 c/deg grating (tuned at 90 and 180 deg). Second, it is clear that visibility of the compound grating, when expressed in Michelson contrast, is decreased by a constant factor compared to the visibility of its most sensitive component (4 c/deg in both cases).

This may be attributed: i) to the fact that contrast is modulated in compound gratings, resulting to decreased "local" contrast and ii) to the existence of separate spatial-frequency channels. The first hypothesis can be studied using different contrast metrics (C_{RMS} and C_l) which form the better predictor of the relative/apparent contrast of compound gratings. In our case the C_{RMS} of the compound grating decreases by a factor of 1.38 compared to its components, while C_l by a factor of 1.25. As Fig. 4a shows, when these factors are computed to the measured CS data for the 4+16 c/deg compound pattern, they can closely predict the decrease in its visibility for all orientations (actually the compound pattern is slightly more visible), suggesting that a single-channel detects the response to both the compound grating and its most sensitive component (i.e. 4 c/deg). This is further supported by the finding that orientation tuning profile is similar for both patterns. However, this is not the case for the 1+4 c/deg compound pattern (see figure 4b): the predicted CS data overestimates the drop in its visibility, indicating the existence of two channels responding to the compound, resulting in some kind of pooling (or "probability summation") across channels.

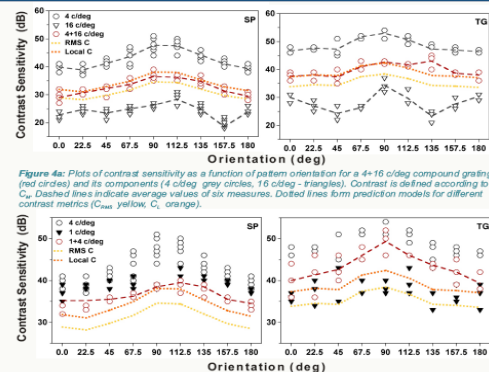


Figure 4a. Plots of contrast sensitivity as a function of pattern orientation for a 4+16 c/deg compound grating (red circles) and its components (4 c/deg grey circles, 16 c/deg filled triangles). Contrast is defined according to C_m. Dotted lines indicate average values of six measures. Dotted lines form prediction models for different contrast metrics (C_{RMS}, yellow, C_l, orange).

3b. RESULTS - Reaction Times (Suprathreshold Performance)

Figures 5a and 5b illustrate RT gain (reciprocal of RT vs 1/Contrast slopes) for a compound pattern (components: 4+16 c/deg and 1+4 c/deg respectively) and its sine-wave components as a function of orientation. The reduced visibility of the compound pattern for all orientations, when Michelson Contrast is used, is evident in both cases, in agreement with threshold data. Moreover, orientation tuning is apparent, suggesting that individual channels are tuned with respect to orientation even at suprathreshold levels.

However, in contrast to the threshold data, the drop in suprathreshold sensitivity for the 4+16 c/deg can only partially be predicted from the different contrast metrics, C_{RMS} and C_l. In the case of the 1+4 c/deg compound gratings this is even more pronounced. This may imply that underlying channels or pathways of different selectivity are involved in the suprathreshold perception of compound patterns.

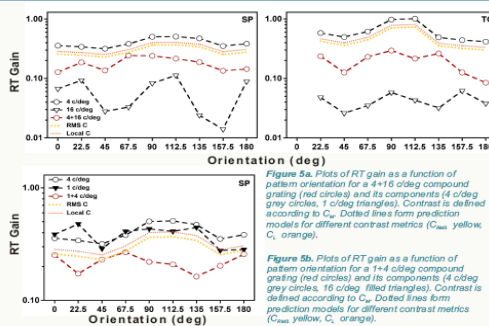


Figure 5a. Plots of RT gain as a function of pattern orientation for a 4+16 c/deg compound grating (red circles) and its components (4 c/deg grey circles, 16 c/deg filled triangles). Contrast is defined according to C_m. Dotted lines form prediction models for different contrast metrics (C_{RMS}, yellow, C_l, orange).

4. CONCLUSIONS

The visibility of compound patterns is reduced compared to their components, when the conventional metric of Michelson contrast is applied.

The sensitivity to compound patterns is better predicted by the responses to local luminance differences (i.e. RMS contrast, local contrast) than to Michelson contrast.

Pooling across channels may further improve visibility of a compound pattern. This is more pronounced when its components are subserved by mechanisms of high sensitivity/gain.

RT-gain is a good estimate of contrast sensitivity for simple sine-wave gratings. However, it differs to threshold data when compound gratings are used, indicating that the detection of such stimuli requires the incorporation of non-linear mechanisms into models of visual processing.

Orientation tuning seems to precede the detection of compound patterns.

REFERENCES

Graham and Nachmias, Detection of grating patterns containing two spatial frequencies: a comparison of single-channel and multiple-channels models 1971 Vision Res.11 251-9
Plainis and Murray, Neurophysiological interpretation of human visual reaction times: effect of contrast, spatial frequency and luminance 2000 Neuropsychologia 38 1555-64
McKeefry, Parry and Murray, Simple reaction times in color space: the influence of chromaticity, contrast, and cone opponency 2003 Invest Ophthalmol Vis Sci. 2267-76

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by the British Council and the Greek Secretariat for Research and Technology.
P Sapountzis received a travel grant from UNISTEP, CRINNO (Crete Innovative Region)

Βιβλιογραφία

Βιβλία:

1. Digital Image Processing, Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, (Second Edition).
2. Digital Image Processing using MATLAB, Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins.
3. Color Vision, From Genes to Perception, Karl R. Gegenfurtner, Lindsay T. Sharpe.
4. Optics, Eugene Hecht, (Third Edition).

Σημειώσεις:

Σημειώσεις για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα 'Όπτική & Όραση', Σ. Πλαϊνής.
<http://www.optics-vision.gr>

Άρθρα:

1. Akutsu, H. and G.E. Legge, *Discrimination of compound gratings: spatial-frequency channels or local features?* Vision Res, 1995. **35**(19): p. 2685-95.
2. Atick, J.J., Z. Li, and A.N. Redlich, *What does post-adaptation color appearance reveal about cortical color representation?* Vision Res, 1993. **33**(1): p. 123-9.
3. Atkinson, J. and F.W. Campbell, *The effect of phase on the perception of compound gratings.* Vision Res, 1974. **14**(2): p. 159-62.
4. Badcock, D.R., *Spatial phase or luminance profile discrimination?* Vision Res, 1984. **24**(6): p. 613-23.
5. Badcock, D.R., *How do we discriminate relative spatial phase?* Vision Res, 1984. **24**(12): p. 1847-57.
6. Baker, C.L., Jr. and I. Mareschal, *Processing of second-order stimuli in the visual cortex.* Prog Brain Res, 2001. **134**: p. 171-91.
7. Barfield, L. and D.J. Tolhurst, *Proceedings: The detection of complex gratings by the human visual system.* J Physiol, 1975. **248**(1): p. 37P-38P.
8. Barlow, H.B., R. Narasimhan, and A. Rosenfeld, *Visual pattern analysis in machines and animals.* Science, 1972. **177**(49): p. 567-75.
9. Barlow, J.A., *A simple shock circuit for rats.* J Exp Anal Behav, 1961. **4**: p. 308.
10. Bennett, P.J. and M.S. Banks, *The effects of contrast, spatial scale, and orientation on foveal and peripheral phase discrimination.* Vision Res, 1991. **31**(10): p. 1759-86.
11. Bergen, J.R., H.R. Wilson, and J.D. Cowan, *Further evidence for four mechanisms mediating vision at threshold: sensitivities to complex gratings and aperiodic stimuli.* J Opt Soc Am, 1979. **69**(11): p. 1580-7.
12. Bex, P.J. and W. Makous, *Spatial frequency, phase, and the contrast of natural images.* J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2002. **19**(6): p. 1096-106.
13. Billock, V.A., et al., *Perception of spatiotemporal random fractals: an extension of colorimetric methods to the study of dynamic texture.* J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2001. **18**(10): p. 2404-13.
14. Blakemore, C. and F.W. Campbell, *On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images.* J Physiol, 1969. **203**(1): p. 237-60.
15. Breitmeyer, B.G., *Simple reaction time as a measure of the temporal response properties of transient and sustained channels.* Vision Res, 1975. **15**(12): p. 1411-2.
16. Campbell, F.W. and L. Maffei, *The influence of spatial frequency and contrast on the perception of moving patterns.* Vision Res, 1981. **21**(5): p. 713-21.
17. Campbell, F.W. and J.G. Robson, *Application of Fourier analysis to the visibility of gratings.* J Physiol, 1968. **197**(3): p. 551-66.
18. Cavanagh, P. and G. Mather, *Motion: the long and short of it.* Spat Vis, 1989. **4**(2-3): p. 103-29.
19. Chandler, D.M. and S.S. Hemami, *Effects of natural images on the detectability of simple and compound wavelet subband quantization distortions.* J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2003. **20**(7): p. 1164-80.

20. Chubb, C. and G. Sperling, *Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception*. J Opt Soc Am A, 1988. **5**(11): p. 1986-2007.
21. Clatworthy, P.L., et al., *Coding of the contrasts in natural images by populations of neurons in primary visual cortex (V1)*. Vision Res, 2003. **43**(18): p. 1983-2001.
22. Daugman, J.G., *Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters*. J Opt Soc Am A, 1985. **2**(7): p. 1160-9.
23. De Valois, R.L., D.G. Albrecht, and L.G. Thorell, *Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex*. Vision Res, 1982. **22**(5): p. 545-59.
24. Doi, E., et al., *Spatiochromatic receptive field properties derived from information-theoretic analyses of cone mosaic responses to natural scenes*. Neural Comput, 2003. **15**(2): p. 397-417.
25. Felipe, A., M.J. Buades, and J.M. Artigas, *Influence of the contrast sensitivity function on the reaction time*. Vision Res, 1993. **33**(17): p. 2461-6.
26. Field, D.J., *Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells*. J Opt Soc Am A, 1987. **4**(12): p. 2379-94.
27. Field, D.J. and N. Brady, *Visual sensitivity, blur and the sources of variability in the amplitude spectra of natural scenes*. Vision Res, 1997. **37**(23): p. 3367-83.
28. Georgeson, M.A. and R.S. Turner, *Afterimages of sinusoidal, square-wave and compound gratings*. Vision Res, 1985. **25**(11): p. 1709-20.
29. Ginsburg, A., *Spatial Filtering And Visual Form Perception In: Handbook of Perception and Human Performance*. Voll. 2. 1986.
30. Graham, N., J.G. Robson, and J. Nachmias, *Grating summation in fovea and periphery*. Vision Res, 1978. **18**(7): p. 815-25.
31. Graham, N. and S.S. Wolfson, *A note about preferred orientations at the first and second stages of complex (second-order) texture channels*. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2001. **18**(9): p. 2273-81.
32. Harwerth, R.S. and D.M. Levi, *Reaction time as a measure of suprathreshold grating detection*. Vision Res, 1978. **18**(11): p. 1579-86.
33. Hess, R.F., K. Nordby, and J.S. Pointer, *Regional variation of contrast sensitivity across the retina of the achromat: sensitivity of human rod vision*. J Physiol, 1987. **388**: p. 101-19.
34. Hubel, D.H. and T.N. Wiesel, *Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint*. J Neurophysiol, 1965. **28**(6): p. 1041-59.
35. Johnson, A.P. and C.L. Baker, Jr., *First- and second-order information in natural images: a filter-based approach to image statistics*. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2004. **21**(6): p. 913-25.
36. Kingdom, F.A., A. Hayes, and D.J. Field, *Sensitivity to contrast histogram differences in synthetic wavelet-textures*. Vision Res, 2001. **41**(5): p. 585-98.
37. Lund, J.S., et al., *Cells and circuits contributing to functional properties in area V1 of macaque monkey cerebral cortex: bases for neuroanatomically realistic models*. J Anat, 1995. **187 (Pt 3)**: p. 563-81.
38. Maunsell, J.H., et al., *Visual response latencies of magnocellular and parvocellular LGN neurons in macaque monkeys*. Vis Neurosci, 1999. **16**(1): p. 1-14.
39. Moulden, B., F. Kingdom, and L.F. Gatley, *The standard deviation of luminance as a metric for contrast in random-dot images*. Perception, 1990. **19**(1): p. 79-101.
40. Murray, I.J. and S. Plainis, *Contrast coding and magno/parvo segregation revealed in reaction time studies*. Vision Res, 2003. **43**(25): p. 2707-19.
41. Nachmias, J. and A. Weber, *Discrimination of simple and complex gratings*. Vision Res, 1975. **15**(2): p. 217-23.
42. Owsley, C., R. Sekuler, and D. Siemsen, *Contrast sensitivity throughout adulthood*. Vision Res, 1983. **23**(7): p. 689-99.
43. Pantle, A., *Visual effects of sinusoidal components of complex gratings: independent or additive?* Vision Res, 1973. **13**(12): p. 2195-204.
44. Parraga, C.A., et al., *Color and luminance information in natural scenes*. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 1998. **15**(3): p. 563-9.
45. Parraga, C.A. and D.J. Tolhurst, *The effect of contrast randomisation on the discrimination of changes in the slopes of the amplitude spectra of natural scenes*. Perception, 2000. **29**(9): p. 1101-16.

46. Parraga, C.A., T. Troscianko, and D.J. Tolhurst, *The human visual system is optimised for processing the spatial information in natural visual images*. *Curr Biol*, 2000. **10**(1): p. 35-8.
47. Parraga, C.A., T. Troscianko, and D.J. Tolhurst, *Spatiochromatic properties of natural images and human vision*. *Curr Biol*, 2002. **12**(6): p. 483-7.
48. Peli, E., *Contrast in complex images*. *J Opt Soc Am A*, 1990. **7**(10): p. 2032-40.
49. Peterzell, D.H., J.S. Werner, and P.S. Kaplan, *Individual differences in contrast sensitivity functions: the first four months of life in humans*. *Vision Res*, 1993. **33**(3): p. 381-96.
50. Peterzell, D.H., J.S. Werner, and P.S. Kaplan, *Individual differences in contrast sensitivity functions: longitudinal study of 4-, 6- and 8-month-old human infants*. *Vision Res*, 1995. **35**(7): p. 961-79.
51. Plainis, S. and I.J. Murray, *Neurophysiological interpretation of human visual reaction times: effect of contrast, spatial frequency and luminance*. *Neuropsychologia*, 2000. **38**(12): p. 1555-64.
52. Pollen, D.A., J.P. Gaska, and L.D. Jacobson, *Responses of simple and complex cells to compound sine-wave gratings*. *Vision Res*, 1988. **28**(1): p. 25-39.
53. Rodieck, R.W., K.F. Binmoeller, and J. Dineen, *Parasol and midget ganglion cells of the human retina*. *J Comp Neurol*, 1985. **233**(1): p. 115-32.
54. Ross, J. and J.R. Johnstone, *Phase and detection of compound gratings*. *Vision Res*, 1980. **20**(2): p. 189-92.
55. Rovamo, J., et al., *Spatial integration of compound gratings with various numbers of orientation components*. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1994. **35**(5): p. 2611-9.
56. Sagi, D. and S. Hochstein, *Discriminability of suprathreshold compound spatial frequency gratings*. *Vision Res*, 1983. **23**(12): p. 1595-606.
57. Sally, S.L. and R. Gurnsey, *Orientation discrimination across the visual field: matching perceived contrast near threshold*. *Vision Res*, 2004. **44**(23): p. 2719-27.
58. Schofield, A.J. and M.A. Georgeson, *Sensitivity to modulations of luminance and contrast in visual white noise: separate mechanisms with similar behaviour*. *Vision Res*, 1999. **39**(16): p. 2697-716.
59. Sclar, G., J.H. Maunsell, and P. Lennie, *Coding of image contrast in central visual pathways of the macaque monkey*. *Vision Res*, 1990. **30**(1): p. 1-10.
60. Simoncelli, E.P. and B.A. Olshausen, *Natural image statistics and neural representation*. *Annu Rev Neurosci*, 2001. **24**: p. 1193-216.
61. Smith, A.T. and G.K. Edgar, *Perceived speed and direction of complex gratings and plaids*. *J Opt Soc Am A*, 1991. **8**(7): p. 1161-71.
62. Smith, V.C. and J. Pokorny, *Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 700 nm*. *Vision Research*, 1975. **15**: p. 161-171.
63. Steinman, R.M., et al., *Vision in the presence of known natural retinal image motion*. *J Opt Soc Am A*, 1985. **2**(2): p. 226-33.
64. Stockman, A. and R.T. Sharpe, *The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive derived from measurements in observers of known genotype*. *Vision Res*, 2000.
65. Sutter, A. and N. Graham, *Investigating simple and complex mechanisms in texture segregation using the speed-accuracy tradeoff method*. *Vision Res*, 1995. **35**(20): p. 2825-43.
66. Swanson, W.H., H.R. Wilson, and S.C. Giese, *Contrast matching data predicted from contrast increment thresholds*. *Vision Res*, 1984. **24**(1): p. 63-75.
67. Tadmor, Y. and D.J. Tolhurst, *Both the phase and the amplitude spectrum may determine the appearance of natural images*. *Vision Res*, 1993. **33**(1): p. 141-5.
68. Tiippana, K., R. Nasanen, and J. Rovamo, *Contrast matching of two-dimensional compound gratings*. *Vision Res*, 1994. **34**(9): p. 1157-63.
69. Tolhurst, D.J. and J.A. Movshon, *Spatial and temporal contrast sensitivity of striate cortical neurones*. *Nature*, 1975. **257**(5528): p. 674-5.
70. Tolhurst, D.J. and Y. Tadmor, *Discrimination of changes in the slopes of the amplitude spectra of natural images: band-limited contrast and psychometric functions*. *Perception*, 1997. **26**(8): p. 1011-25.
71. Tolhurst, D.J. and Y. Tadmor, *Band-limited contrast in natural images explains the detectability of changes in the amplitude spectra*. *Vision Res*, 1997. **37**(23): p. 3203-15.
72. Tolhurst, D.J., Y. Tadmor, and T. Chao, *Amplitude spectra of natural images*. *Ophthalmic Physiol Opt*, 1992. **12**(2): p. 229-32.

73. van Hateren, J.H., *Three modes of spatiotemporal preprocessing by eyes*. J Comp Physiol [A], 1993. **172**(5): p. 583-91.
74. van Hateren, J.H. and A. van der Schaaf, *Independent component filters of natural images compared with simple cells in primary visual cortex*. Proc R Soc Lond B Biol Sci, 1998. **265**(1394): p. 359-66.
75. Webster, M.A. and J.D. Mollon, *Adaptation and the color statistics of natural images*. Vision Res, 1997. **37**(23): p. 3283-98.
76. Williams, J.M. and A. Lit, *Luminance-dependent visual latency for the Hess effect, the Pulfrich effect, and simple reaction time*. Vision Res, 1983. **23**(2): p. 171-9.
77. Wilson, H.R. and F. Wilkinson, *Evolving concepts of spatial channels in vision: from independence to nonlinear interactions*. Perception, 1997. **26**(8): p. 939-60.

Βάση δεδομένων φυσικών εικόνων του πανεπιστημίου McGill:

Olmos, A. and Kingdom, F. A. A. (2004) McGill Calibrated Colour Image Database, <http://tabby.vision.mcgill.ca>

