

ΠΡΑΚΤΙΚΑ:
ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟΥ
ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
"ΜΕΣΣΗΝΙΑ" ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΩΝ

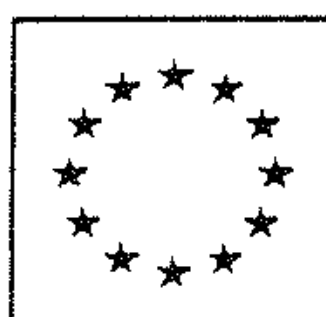
Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, Νοέμβριος 19-20, 1990

PROCEEDINGS FROM:
WORKSHOP AND SEMINAR ON THE MESSINIA PROJECT
OF THE EUROPEAN COLLABORATIVE PROGRAMME

Eugenidis Foundation, Athens, Nov. 19-20, 1990

Ομάδα Σύνταξης
Μ. ΜΟΥΤΣΟΥΛΑΣ και Χ. Χ. ΚΟΝΤΟΕΣ

Edited by
M. MOUTSOULAS and C. C. KONTOS



JOINT
RESEARCH
CENTRE

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES

Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων
Κοινό Κέντρο Ερευνών-ISPRA
Ινστιτούτο Τηλεπισκόπησης

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ
ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΩΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΕΩΝ-ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

ΚΟΝΤΟΕΣ Χ. Χ.

Τοπογράφος Μηχ. ΕΜΠ
Υπ. Δρ. Μηχ. Τηλεπισκόπησης

FOLVING S.
Ειδ. επιστ. Τηλεπισκόπησης-JRC

Νοέμβριος 1990

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΘΕΜΕΛΙΑΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	3
ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....	4
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ.....	8
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	13
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	16
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	18

1. ΘΕΜΕΛΙΑΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη και τεχνική με την οποία τόσο ο άνθρωπος (φώτο-ερμηνευτής) όσο και οι μηχανές (τηλεπισκοπικοί δέκτες, δορυφόροι, ραντάρ, συστήματα αυτόματης ψηφιακής επεξεργασίας τηλεπισκοπικών απεικονίσεων), μπορούν :

- 1) να ανιχνεύσουν, να μετρήσουν και να καταγράψουν τις μεταβολές των δομικών, φυσικών, χημικών και βιολογικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων στον χώρο και στον χρόνο,
- 2) να συλλέξουν μία απειρία μετρητικών και ποιοτικών πληροφοριών,
- 3) να επεξεργαστούν στην συνέχεια και να συσχετίσουν νοητικά/λογικά/υπολογιστικά και με βάση την επιστημονική μεθοδολογία τις πληροφορίες αυτές, καταλήγοντας σε μια σειρά από χρήσιμα συμπεράσματα για ένα πλήθος εφαρμογών,
- 4) να σχεδιάσουν και να πραγματοποιήσουν κατάλληλα συγκεκριμένες αναδράσεις (feed back) σε συγκεκριμένες φάσεις των παραπάνω διαδικασιών, ώστε να αυξάνεται έτσι προοπτικά η ακρίβεια, αξιοπιστία και πληρότητα των αποτελεσμάτων (Ρόκος Δ., 1988).

Φωτοερμηνευτική/Τηλεπισκοπική μεθοδολογία : Είναι η οργανική σύνθεση του "αισθητού" με το "λογικό" με βάση την επιστημονική μεθοδολογία, ώστε να προσεγγίζεται από μακριά ο διαλεκτικός χαρακτήρας της φυσικής και κοινωνικο-οικονομικής πραγματικότητας. Η μεθοδολογία αυτή τυποποιείται ως το ολοκλήρωμα του πολυδιάστατου αθροίσματος της εμπειρίας, λογικής και ειδικής επιστημονικής γνώσης καθώς και των απαραίτητων επιγείων ελέγχων (Ρόκος Δ., 1989).

Πεδία Εφαρμογής : Η Τηλεπισκόπηση καθώς και η Φωτοερμηνευτική μεθοδολογία βρίσκουν εφαρμογή σε μία σειρά από επιστημονοτεχνικές περιοχές, μερικές από τις οποίες είναι, η Γεωλογία, η Υδρολογία, η Εδαφολογία, η Δασολογία, η Οικολογία, η Γεωργία, η Χωροταξία, το Κτηματολόγιο, η Γεωγραφία, οι Κοινωνικές επιστήμες κ.α.

Αναλογική και Ψηφιακή Φωτοερμηνεία : Η αναλογική φωτοερμηνεία αποτελεί αντικείμενο εργασίας του φωτοερμηνευτή, ο οποίος αφού με βάση τις διαθέσιμες τηλεπισκοπικές απεικονίσεις καταλήξει σε μία σειρά από υποθέσεις, εξετάζει στη συνέχεια την πιθανοφάνεια και αξιοπιστία τους στηριγμένος στην λογική επαγωγή.

Η ψηφιακή φωτοερμηνεία αντίθετα, αποτελεί αντικείμενο εργασίας ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος στην βάση πιθανολογικών ή άλλων μοντέλων εκτελεί ένα μεγάλο αριθμό πράξεων επί των ψηφιακών απεικονίσεων με σκοπό να καταλήξει σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Αναλογικές και Ψηφιακές μέθοδοι-Δυνατότητες και Περιορισμοί:
Οι αναλογικές μέθοδοι υστερούν έναντι των ψηφιακών γιατί το ανθρώπινο μάτι :

- 1) ευαισθητοποιείται μόνο στην ορατή περιοχή του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας,
- 2) αδυνατεί να αντιληφθεί πολλές διαφορές τόνου και
- 3) αδυνατεί να αναλύει ταυτόχρονα περισσότερες από μία τηλεπισκοπικές απεικονίσεις.

Οι ψηφιακές μέθοδοι υστερούν με την σειρά τους σε θέματα :

- 1) λογικής διαδικασίας στην αναγνώριση των προτύπων και
- 2) αντίληψης και κατανόησης των μεταξύ-αντικειμένων αλληλοεξαρτήσεων και αλληλοεπιδράσεων.

Η συστηματική ανάπτυξη των τεχνολογιών αιχμής και των επιστημών της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence-Expert Systems) και κατανόησης εικόνων (Image Understanding) υπόσχεται πολλά για την όλο και πιά αποτελεσματική εφαρμογή των ψηφιακών μεθόδων στο μέλλον. Τα πρώτα αποτελέσματα από την ανάπτυξη και χρήση των εμπειρών συστημάτων είναι ενθαρρυντικά (Wilkinson G.G. et al., 1990). Απαιτείται ωστόσο εντατική μελέτη ώστε οι μεθοδολογίες αυτές να μπορέσουν να μιμηθούν την αναλογική φωτοερμηνεία στις διαδικασίες αποφάσεων που στηρίζονται κυρίως στη λογική.

2. ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Σαν αναγνώριση των προτύπων (pattern recognition) ορίζεται ο προσδιορισμός της ταυτότητας των αντικειμένων στο χώρο, βασισμένος στην εξαγωγή στατιστικά και συντακτικά σημαντικής πληροφορίας από το επίπεδο της εικόνας. Το θέμα αυτό έχει απασχολήσει τους ερευνητές κατά τη τελευταία 20-ετία. Βασικές συστατικές λειτουργίες της διαδικασίας αυτής είναι, η προεπεξεργασία της εικόνας, η επιλογή του δείγματος, η ανίχνευση και παρακολούθηση των οριακών γραμμών των αντικειμένων, η τμηματοποίηση της εικόνας σε επιμέρους ομογενείς τάξεις, η ταξινόμηση της εικόνας. Στην σχετική βιβλιογραφία βρίσκουμε διαφόρων ειδών προσεγγίσεις στο θέμα της αναγνώρισης των προτύπων. Η επιλογή της κατάλληλης κάθε φορά εξαρτάται από την φύση των δεδομένων εισόδου, το μοντέλο των αποφάσεων, καθώς και το είδος των τελικών αποτελεσμάτων. Εδώ, γίνεται προσπάθεια να μετατραπεί η πληροφορία που έχει καταγραφεί στο επίπεδο της εικόνας (ψηφιακή ή αναλογική, αριθμητική ή συμβολική) στίς κατάλληλες εκείνες μορφές που μπορούν να χρησιμοποιούνται σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή και να περιγράφουν κατά το δυνατόν μονοσήμαντα τα υπό εξέταση αντικείμενα ή τάξεις. Διακρίνουμε επομένως τις δύο παρακάτω βασικές λειτουργίες:

1) Εξομοίωση-περιγραφή του δείγματος που προέρχεται από τις τηλεπισκοπικές απεικονίσεις σε συνδιασμό με τις εργασίες εδάφους με κατάλληλα μοντέλα, στην βάση κάποιων στατιστικών ή και συντακτικών κανόνων.

2) Σύγκριση των δεδομένων εισόδου (π.χ ραδιομετρικές τιμές) με τις παραπάνω μοντελοποιημένες μορφές και εξαγωγή της ταυτότητας των αντικειμένων.

Στην σχετική βιβλιογραφία βρίσκουμε την περιγραφή διαφόρων μεθοδολογιών αναγνώρισης των προτύπων. Διακρίνονται δε αυτές σε μαθηματικές ή στατιστικές, συντακτικές ή δομικές και περιγραφικές ή δηλωτικές-γνώσεως. Στην συνέχεια δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των μεθόδων αυτών.

2.1 Στατιστικά μοντέλα: Αυτά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου τα δεδομένα εισόδου συνιστούν ένα αριθμητικό διάνυσμα. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από :

- 1) το πλήθος των δεδομένων εισόδου,
- 2) το μέγεθος της στατιστικά σημαντικής πληροφορίας και
- 3) την χρήση του κατάλληλου αλγορίθμου ταξινόμησης.

Το πρώτο βήμα στις εργασίες αυτές είναι η ανεύρεση και απομόνωση του δείγματος, στο επίπεδο της εικόνας, που αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις κατηγορίες μελέτης. Το στάδιο αυτό φέρεται στην βιβλιογραφία με το όνομα "εξαγωγή του δείγματος". Ειδικές στατιστικές τεχνικές (canonical analysis, principal component analysis), επιτρέπουν την μείωση της διαστάσεως του αριθμητικού διανύσματος, με σκοπό την μείωση των απαιτούμενων υπολογισμών, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η στατιστικά σημαντική πληροφορία εισόδου (Swain P. et al., 1978, Jensen J.R., 1986). Ακολουθεί η ανεύρεση των "στατιστικών υπογραφών" που περιγράφουν κατά το δυνατόν μονοσήμαντα μία τάξη. Εξετάζεται για κάθε κατηγορία η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του δείγματος και στην συνέχεια αφού γίνει η απαραίτητη υπόθεση σε σχέση με την μορφή της (κανονική κατανομή Gauss), υπολογίζονται οι παράμετροι που την περιγράφουν (μέση τιμή, πίνακας μεταβλητότητας/συμεταβλητότητας). Για τον λόγο αυτό οι ταξινομήσεις αυτές ονομάζονται και παραμετρικές. Οι παραπάνω εργασίες φέρουν το όνομα "εκμάθηση του ταξινομητή" (training). Στο τελικό στάδιο της ταξινόμησης, γίνεται χρήση ενός κατάλληλου στατιστικού μοντέλου αποφάσεων (ταξινομητής μεγίστης πιθανοφάνειας, ελάχιστης ευκλιδείου αποστάσεως), που μελετά την πιθανότητα ταύτησης του υπό εξέταση διανύσματος (π.χ. ραδιομετρικών τιμών) με κάθε μία κατηγορία ξεχωριστά. Στο διάνυσμα αυτό αποδίδεται η ετικέτα της τάξης (κατηγορίας) για την οποία παρουσιάζει την μεγαλύτερη πιθανότητα να ανήκει.

2.2 Στατιστικά-χωρικά μοντέλα: Η παραπάνω μέθοδος παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι εξετάζει το κάθε pixel (μικρότερο εικονικό στοιχείο με αποδομένη τιμή) ανεξάρτητα από το περιβάλλον του. Αυτό οδηγεί σε ταξινομήσεις, όπου η ετικέτα μερικών pixels δεν συμφωνεί

καθόλου με αυτήν(ες) του περιβαλλοντός τους. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικά στατιστικά μοντέλα (Ketting R. et al. 1976, Merchant J.W. 1984, Zucker S.W. et al. 1978), που λαμβάνουν υπ' όψη τους όχι μόνο την ραδιομετρία της εικόνας αλλά και πληροφορία άλλη (ποιοτική ή ποσοτική, σε μία ή περισσότερες χρονικές στιγμές) που περιγράφει την υφιστάμενη κατάσταση στην γειτονιά του pixel. Αυτά τα μοντέλα αποβλέπουν σε ταξινομήσεις όπου οι ετικέτες των pixels σε μία μικρή ή μεγαλύτερη γεωγραφική ενότητα είναι "συμβατές" μεταξύ τους. Η χρήση τους οδηγεί σε ταξινομήσεις μεγαλύτερης ακρίβειας (θεματική και στατιστική) και κατά την γνώμη μας αποτελούν απαραίτητο στάδιο μετά-ταξινόμησης (Kontoes C.C., 1990), ειδικά στις περιπτώσεις όπου διατίθενται το πολύ μία ή δύο δορυφορικές απεικονίσεις.

2.3) Μοντέλα Δομής: Τα στατιστικά μοντέλα παρουσιάζουν σημαντική αδυναμία στο να περιγράψουν ότι διαισθητικά αντιλαμβάνεται ο φωτο-ερμηνευτής σαν "δομή" ενός αντικειμένου, στο επίπεδο της εικόνας. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται ένα υδρολογικό δίκτυο σαν σύνθεση του κύριου ποτάμιου όγκου και των παραποτάμων του, αποδίδοντας σε κάθε ένα από τα συνθετικά αυτά στοιχεία συγκεκριμένο χαρακτήρα και θέση. Τα μοντέλα δομής ή συντακτικά ή γλωσσικά μοντελα, αποσκοπούν :

- 1) στην αποσύνθεση των αντικειμένων στα απλούστερα συνθετικά τους στοιχεία,
- 2) στην μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πρωτογενών δομικών στοιχείων,
- 3) στην ανεύρεση και περιγραφή των μεταξύ-δομικών στοιχείων συσχετίσεων, στην βάση συντακτικών κανόνων, και
- 4) στην ταξινόμηση των αντικειμένων.

Στο στάδιο της ταξινόμησης έχουν ακολουθηθεί δύο προσεγγίσεις. Στην πιο παραδοσιακή, η δομή του υπό εξέταση αντικειμένου, οφείλει να συμφωνεί απόλυτα με αυτήν του προτύπου όπως αυτή περιγράφεται από τούς συντακτικούς κανόνες του μοντέλου. Αντιθέτως σε σύγχρονες εφαρμογές χρησιμοποιούνται έννοιες στατιστικής ομοιότητας (likelihood function-Tsai et al. 1980), αποβλέπουν στην αποφυγή του θορύβου που προέρχεται από την ελλιπή γνώση της δομής ή από τις ενδεχόμενες παρεκλίσεις από την δομή του προτύπου.

2.4 Εμπειρα συστήματα : Ένα από τα βασικά και πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά των εμπειρών συστημάτων είναι ότι χρησιμοποιούν την γνώση, εμπειρία και λογική επαγωγή του ανθρώπου με σκοπό να δώσουν λύση στο πρόβλημα των ταξινομήσεων. Οι διαφορές των προσεγγίσεων αυτών από τις προηγούμενες είναι :

- 1) Σε ένα έμπειρο σύστημα είναι δυνατόν να περιγραφούν με λεπτομέρεια πολλές ειδικές περιπτώσεις και εξαιρέσεις που αφορούν το πρόβλημα της ταξινόμησης.

2) Στο περιβάλλον ενός εμπειρικού συστήματος η διάκριση ανάμεσα στη βάση γνώσεως και στο μοντέλο αποφάσεων είναι σαφής. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χειριστούν αποφάσεις σε περιβάλλον αβεβαιότητας που αφορά είτε τα δεδομένα εισόδου, είτε το στατιστικό ή συντακτικό κανόνα περιγραφής των αντικειμένων. Τα εμπειρικά συστήματα δίνουν λύση στο πρόβλημα της ταξινόμησης στην βάση της διατιθέμενης γνώσης που έχει αναπτυχθεί στις τράπεζες γνώσης τους. Είναι δε δυνατόν να εκφράσουν με μαθηματικό τρόπο και να συμπεριλάβουν σε διαδικασίες αποφάσεων (Dempster-Shafer theory) έννοιες όπως "ελλειπής γνώση" και "αβεβαιότητα". Αντιθέτως σε όλες τις προηγούμενες μεθόδους, η γνώση εμπεριέχεται στο μοντέλο αποφάσεων με παραμετρική μορφή (Gaussian distribution, πιθανολογικό μοντέλο Zucker). Επίσης το στατιστικό ή συντακτικό μοντέλο θα οδηγήσει σε τελική ταξινόμηση, ακόμη και αν αυτή χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα και μικρή στατιστική και θεματική ακρίβεια. Αντιθέτως το εμπειρικό σύστημα δεν καταλήγει σε ταξινομήσεις ή οδηγεί την απόφαση σε ταξινομήσεις που αφορούν γενικευμένες τάξεις και αντικείμενα, εφόσον δεν αποστέλλονται ικανοποιητικά μεγέθη ενδείξεων σε επιμέρους κατηγορίες. Ο λόγος είναι ότι ο φωτοερμηνευτής προτιμά να διαθέτει ένα μέσο που θα επιτρέψει να γνωρίζει με βεβαιότητα ότι μία περιοχή καλύπτεται από δημητριακά εν γένει, από ένα άλλο μοντέλο που θα καταλήξει με μικρή βεβαιότητα ότι η ίδια περιοχή καλύπτεται μερικώς από ένα συγκεκριμένο δημητριακό (π.χ σιτάρι) και το υπόλοιπο από άλλες καλλιέργειες.

Τα μοντέλα αποφάσεων που χρησιμοποιούνται διαφέρουν. Ένα από αυτά που πολύ ταυτατικά έχει αρχίσει να βρίσκει εφαρμογή στην αυτοματοποιημένη φωτοερμηνεία, είναι βασισμένο στην θεωρία των πιθανολογικών ενδείξεων Dempster-Shafer. Η εφαρμογή του δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα (Wilkinson G.G et al. 1990).

2.5 Τεχνητά δίκτυα νευρώνων : Στις μεθόδους εκείνες που λιγότερο ή περισσότερο μιμούνται τις λειτουργίες του μυαλού του φωτοερμηνευτή συγκαταλέγεται και η χρήση των "τεχνητών δικτύων νευρώνων". Οι τεχνητοί νευρόνες προσομοιάζουν τους άξονες και δυνάμεις των βιολογικών δικτύων με συνδέσμους νοητών κόμβων, ενώ τις διεγέρσεις τους από κατάλληλες αριθμητικές συναρτήσεις. Τά δίκτυα αυτά αποτελούνται από τρία ή περισσότερα επίπεδα συνδεδεμένων μεταξύ τους κόμβων. Ένα επίπεδο εισόδου της πληροφορίας, ένα επίπεδο εξαγωγής των αποτελεσμάτων καθώς και τα μεταξύ αυτών ένα ή περισσότερα "κρυφά" επίπεδα. Για κάθε κόμβο που βρίσκεται σε ένα επίπεδο πάνω από το επίπεδο εισόδου, υπολογίζεται το ανισοβαρές άθροισμα των τιμών, που έχουν αποδοθεί στους κόμβους του αμέσως κατώτερου επιπέδου. Στο επίπεδο εξόδου γίνεται η αναγνώριση (ταξινόμηση) των αντικειμένων. Ο σκοπός είναι να μπορέσει το δίκτυο να "μάθει" τα βάρη που αντιστοιχούν στις μεταξύ κόμβων συνδέσεις, ώστε όταν το διάλυμα ραδιομετρικών τιμών ενός νέου pixel εισέλθει στο επίπεδο εισόδου, να υπολογίζεται δια μέσου του δικτύου η τάξη του pixel αυτού. Στην εργασία των Key J. et al. (1989), περιγράφεται η επιτυχημένη εφαρμογή των δικτύων νευρώνων στην

ταξινόμηση επηυξημένου διανύσματος ραδιομετρικών τιμών, αποτελούμενου από τα 5 συν 2 κανάλια AVHRR και SMRR απεικονίσεων αντίστοιχα. Επίσης οι Gualtieri J.A. et al. (1988), περιγράφουν μία άλλη εφαρμογή των δικτύων στην διαίρεση του δείγματος σε μικρότερες κατηγορίες (clustering).

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ

3.1 Πλοήγηση της εικόνας: Σαν πλοήγηση της εικόνας ορίζεται :

1) Η διόρθωση της από λάθη που οφείλονται :

α) στην παρέκλιση του δορυφόρου από την προβλεπόμενη τροχιά του (π.χ. μεταβολές στο ύψος πτήσης που συνεπάγονται μεταβολές στην κλίμακα της εικόνας),

β) στην αλλαγή της ταχύτητας του δορυφόρου κατά την μετακίνηση του (παραμορφώσεις των αντικειμένων κατά μήκος της τροχιάς),

γ) στην διατάραξη της εσωτερικής γεωμετρίας του οπτικού συστήματος του δορυφόρου και

δ) στην περιστροφή της Γης (στρέβλωση της εικόνας ως προς τον άξονα πτήσης του δορυφόρου.

2) Η προβολή της σε ένα από τα γνωστά χαρτογραφικά προβολικά συστήματα.

Στην βιβλιογραφία περιγράφονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα των γεωμετρικών διορθώσεων. Η μία από αυτές δεν απαιτεί ιδιαίτερη γνώση της γεωμετρίας της τροχιάς του δορυφόρου. Βασίζεται στην ανεύρεση χαρακτηριστικών σημείων του εδάφους, με γνωστές γεωγραφικές συντεταγμένες (σημεία ελέγχου), που είναι διακριτά στο επίπεδο της εικόνας. Έτσι ο αναλυτής περνά από το προβολικό επίπεδο της εικόνας σε αυτό του χάρτη, χρησιμοποιώντας πολυωνυμικές συναρτήσεις 1^{ου} ή και μεγαλύτερου βαθμού και οι οποίες εκφράζουν γραμμικές συσχετίσεις των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί δεδομένα εφημερίδας δορυφόρου (παραμέτρους τροχιάς) και υπολογίζει την γεωγραφική του θέση συναρτήσει του χρόνου. Η χρήση και εδώ ενός σημείου ελέγχου θεωρείται απαραίτητη, για την διόρθωση από μεταβολές στο ύψος πτήσης. Οι γεωμετρικές διορθώσεις της εικόνας θεωρούνται απαραίτητες :

1) σε γεωγραφικές και χαρτογραφικές μελέτες καθώς και μελέτες χρήσεων Γης

2) όταν απαιτείται η ταυτόχρονη χρήση περισσότερων της μίας τηλεπισκοπικών απεικονίσεων

3) όταν απαιτείται η δημιουργία φωτομωσαϊκών.

3.2 Προσδιορισμός της ραδιομετρίας της διορθωμένης εικόνας :

Οι εργασίες αυτές γίνονται επειδή το προβολικό σύστημα της αρχικής εικόνας (εικόνα-εισόδου) και αυτό της διορθωμένης (εικόνα-αποτέλεσμα) είναι εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους και μία αντιστοιχία ένα προς ένα δεν είναι δυνατή. Έτσι αφού κάθε σημείο της εικόνας-αποτέλεσμα προβάλλεται στο σύστημα αναφοράς της εικόνας-εισόδου, χρησιμοποιώντας την αντίστροφη συνάρτηση προβολής από αυτήν που εφαρμόστηκε για την γεωμετρική διόρθωση, σε αυτό το σημείο αποδίδεται ραδιομετρική τιμή που είναι συνάρτηση της ραδιομετρίας των γειτονικών pixels. Διακρίνουμε τρεις μεθόδους παρεμβολής :

1) Πλησιέστερο pixel. Αποδίδεται στο pixel αποτέλεσμα η τιμή του πλησιέστερου pixel εισόδου.

2) Διγραμμική παρεμβολή. Χρησιμοποιούνται τα 4 πλησιέστερα pixels.

3) Παρεμβολή 3^{ου} βαθμού. Χρησιμοποιούνται τα 16 πλησιέστερα pixels.

Η τελευταία μέθοδος επιστρέφει τα καλύτερα αποτελέσματα. Έχει όμως μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις. Η διγραμμική παρεμβολή επιστρέφει καλύτερα αποτελέσματα από αυτήν του πλησιέστερου pixel, χαρακτηρίζεται όμως από εξομάλυνση (ομογενοποίηση) των ραδιομετρικών τιμών. Τέλος η μέθοδος (1) είναι η ταχύτερη από όλες σε υπολογισμούς, αλλά χαρακτηρίζεται από το ενοχλητικό φαινόμενο της ανώμαλης μεταβολής των ραδιομετρικών τιμών κατά μήκος διαγωνίων γραμμών και καμπυλών.

3.3) Ενισχύσεις/Βελτιώσεις της εικόνας: Είναι κατάλληλοι μετασχηματισμοί οι οποίοι αποβλέπουν στην εμφατική παρουσίαση της πληροφορίας που είναι σημαντική στο στάδιο της φωτοερμηνείας. Οι μετασχηματισμοί αυτοί χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, αναλόγως των μεγεθών που ενδιαφέρουν και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Έτσι διακρίνουμε τις βελτιώσεις σε "φασματικές", "χωρικές" καθώς και σε βελτιώσεις του χώρου των "συχνοτήτων". Στις "φασματικές" περιλαμβάνονται:

- 1) μετασχηματισμοί ιστογράμματος,
- 2) σύμπτωση ιστογραμμάτων.

Από τους πιο βασικούς μετασχηματισμούς ιστογράμματος είναι η "εξίσωση του ιστογράμματος". Η εφαρμογή του έχει σαν αποτέλεσμα την ισοπίθανη εμφάνιση όλων των ραδιομετρικών τιμών στο επίπεδο της

μετασχηματισμένης εικόνας. Επιτυγχάνεται έτσι, για σημαντικά επίπεδα του γκρί, εντονότερη μεταξύ τους αντίθεση, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται στο επίπεδο της εικόνας όλη η προυπάρχουσα πληροφορία. Η συνάρτηση μετασχηματισμού περιγράφεται από το αθροιστικό ιστογράμμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των ραδιομετρικών τιμών εισόδου (Gonzalez et al. 1977).

Η "σύμπτωση του ιστογράμματος" επιτρέπει την ταύτιση του ιστογράμματος συχνοτήτων των ραδιομετρικών τιμών μιας εικόνας με αυτό μιας άλλης. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι χρήσιμος :

1) Στην δημιουργία φωτομωσαϊκών. Επιχειρήται να ταυτιστεί η ραδιομετρία γειτονικών εικόνων που έχουν όμως ληφθεί από δέκτες διαφορετικών οπτικών ιδιοτήτων, ώστε τα ίδια αντικείμενα να παρουσιάζονται με τους ίδιους τόνους του γκρί (Kontoes C.C., 1980).

2) Στην περίπτωση που θέλουμε να αυξήσουμε το εύρος των ραδιομετρικών τιμών μιας εικόνας, χρησιμοποιώντας μια άλλη που απεικονίζει την ίδια περιοχή, αλλά έχει ληφθεί από δέκτη μεγαλύτερης διακριτικής (φασματικής) ικανότητας.

Οι προς ταύτιση εικόνες πρέπει να παρουσιάζουν την ίδια περιοχή ή διαφορετικές περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά (χρήσεις Γής, εδάφη, κ.α).

Οι "χωρικές" βελτιώσεις (Jensen J.R., 1986) σε αντίθεση με τις "φασματικές", μεταβάλλουν την ραδιομετρία του κάθε pixel συναρτήσει των ραδιομετρικών τιμών των περιβαλλόντων pixels. Έχουν δε σαν αποτέλεσμα τον μετασχηματισμό των συχνοτήτων εμφάνισης των ραδιομετρικών τιμών ανά μονάδα επιφανείας στο επίπεδο της εικόνας. Ενεργούν σαν φίλτρα και χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες :

- 1) Φίλτρα υψηλής χωρικής συχνότητας (highpass filtering)
- 2) Φίλτρα χαμηλής χωρικής συχνότητας (lowpass filtering)
- 3) Φίλτρα μηδενικής χωρικής συχνότητας (zero-sum filtering)

Η χρήση των φίλτρων υψηλών συχνοτήτων, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των συχνοτήτων. Έτσι επιτυγχάνεται η εμφατική παρουσία ακμών στο επίπεδο της εικόνας, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται όλη η προυπάρχουσα πληροφορία ραδιομετρίας. Τα αντίθετα αποτελέσματα έχει η εφαρμογή των φίλτρων χαμηλής συχνότητας (εξομάλυνση-γενικοποίηση). Τέλος τα φίλτρα μηδενικής συχνότητας αποβλέπουν :

- 1) Στον μηδενισμό της χωρικής συχνότητας για εντελώς ομοιογενή τμήματα της εικόνας,
- 2) Στην μείωση των χαμηλών συχνοτήτων
- 3) Στην υπερβολική αύξηση των υψηλών συχνοτήτων. Τά φίλτρα

αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφατική παρουσία ακμών και μόνο στο επίπεδο της εικόνας και για τον λόγο αυτό ονομάζονται και "ανιχνευτές ακμών".

Οι βελτιώσεις του "χώρου των συχνοτήτων" (frequency domain) οδηγούν σε παρόμοια συμπεράσματα με αυτά των "χωρικών βελτιώσεων", αλλά διαφέρουν στην μεθοδολογία που ακολουθείται στην μεταβολή των συχνοτήτων. Αυτές επεμβαίνουν στο φάσμα των συχνοτήτων του μετασχηματισμού Fourier της εικόνας και άλλοτε μειώνουν τις υψηλές συχνοότητες (lowpass filtering), άλλοτε τις αυξάνουν (highpass filtering). Η τελική εικόνα λαμβάνεται με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της φιλτραρισμένης εικόνας.

3.4) Μετρήσεις Υφής : Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούν την χωρική κατανομή των ραδιομετρικών τιμών στο επίπεδο της εικόνας για να εκφράσουν με την βοήθεια αριθμών μεγέθη όπως ομοιογένεια, αντίθεση, γραμμική συσχέτιση, εντροπία, τραχύτητα, διεύθυνση ακμών και γραμμών. Συστηματική αναφορά στις μετρήσεις αυτές βρίσκουμε στους Haralick R. (1979) και Vilnrotter F.M. et al. (1986). Στις πρώτες προσεγγίσεις του θέματος γίνεται προσπάθεια να απομονωθούν στο επίπεδο της εικόνας κάποια εικονικά στοιχεία-πρότυπα (π.χ. ένα ή περισσότερα pixels του ιδίου τόνου γκρι που σχηματίζουν μικρές ακμές), και στην συνέχεια μετριέται το μέγεθος τους. Έτσι διασπορά τέτοιων τονικών προτύπων μεγάλου μεγέθους συνεπάγεται χονδροειδή υφή, ενώ μικρότερου μεγέθους λεπτή υφή. Πιο σύγχρονες μελέτες θεωρούν το φάσμα δυνάμεων της μετασχηματισμένης Fourier της εικόνας (FF^*) και στην συνέχεια εκτιμούν τις μέσες τιμές αυτού, που αντιστοιχούν άλλοτε σε διακριτές τιμές " ρ " και φάσμα γωνιών $0 < \theta < 2\pi$, άλλοτε σε διακριτές τιμές γωνιών και εύρος ακτίνων $0 < \rho < \infty$, σε ένα σύστημα πολικών συντεταγμένων ακτίνας " ρ " και γωνίας " α ". Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μέτρηση μεγεθών, όπως προσανατολισμός και τραχύτητα της υφής. Πιο συγκεκριμένα εάν το μέγεθος FF^* παίρνει μεγάλες τιμές συναρτήσει της γωνίας " θ ", σημαίνει ότι έχουμε υφή που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο προσανατολισμό (π.χ. ακμές ή γραμμές στο επίπεδο της εικόνας με παράλληλη διεύθυνση). Αντιθέτως υψηλές τιμές του φάσματος δυνάμεων συναρτήσει της ακτίνας " ρ ", υποδηλώνει τραχεία προς λεπτή υφή καθώς περνάμε από μικρά μεγέθη " ρ " σε μεγαλύτερα. Οι στατιστικές μετρήσεις υφής υπολογίζουν την συχνότητα εμφάνισης δύο διαφορετικών τόνων γκρι, που αντιστοιχούν σε pixels που βρίσκονται σε συγκεκριμένη γεωμετρική απόσταση μεταξύ τους και σε ορισμένη κατεύθυνση. Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις αυτές σαν δεδομένα εισόδου σε κατάλληλους μαθηματικούς τύπους, εκφράζουν με αριθμητικά μεγέθη έννοιες όπως ομοιογένεια, μεταβλητότητα, ετερογένεια, γραμμική συσχέτιση κ.α. Οι πιο πρόσφατες μελέτες ανιχνεύουν ακμές, γραμμικά στοιχεία, γωνίες ή άλλα δομικά στοιχεία της εικόνας και στην συνέχεια προσπαθούν να βρουν τους κανόνες εκείνους που τα συσχετίζουν μεταξύ τους.

3.5 Ραδιομετρικές διορθώσεις: Τα λάθη που αφορούν την ραδιομετρία της εικόνας οφείλονται στους παρακάτω λόγους:

1) Διαφορετική απόκριση των αισθητήρων με τους οποίους είναι εφοδιασμένοι οι τηλεπισκοπικοί δέκτες στο ιδίας έντασης οπτικό σήμα.

2) Ατμοσφαιρική παρεμβολή. Η ατμόσφαιρα αλλοιώνει το οπτικό σήμα στην πορεία του από το αντικείμενο στον δέκτη. Η αλοίωση αυτή οφείλεται άλλοτε σε διάχυση από μοριακά σωματίδια (Rayleigh), άλλοτε σε διάχυση και απορρόφηση από αιωρούμενα σωματίδια (aerosols) και άλλοτε σε απορρόφηση από συγκεκριμένες μοριακές συνιστώσες της ατμόσφαιρας (αέρια).

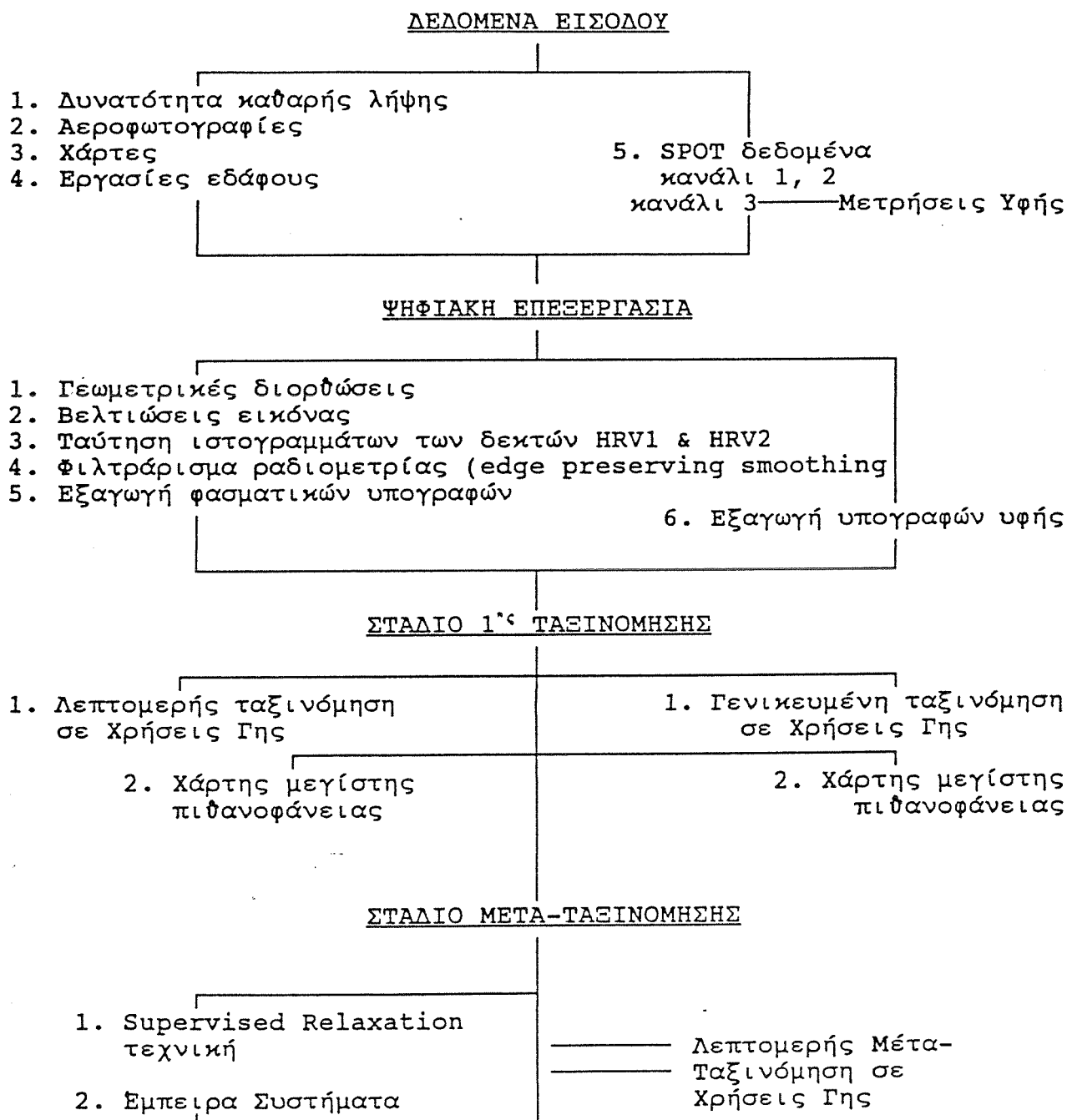
Η εξίσωση του σήματος των αισθητήρων γίνεται με την μέθοδο της "επιπρόσθετης διόρθωσης", κατά την οποία συγκρίνονται και εξισώνονται μεταξύ τους τα εξερχόμενα σήματα, με την προϋπόθεση ότι όλοι οι αισθητήρες βλέπουν μία ομοιόμορφης ανακλαστικότητας επιφάνεια. Σχετικά με την διόρθωση που αφορά την απαλλαγή του σήματος που φθάνει στον δέκτη από τις επιρροές της ατμόσφαιρας, θα ήταν σκόπιμο να αναφερθεί ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν διάφορα επίπεδα συνθετότητας. Έτσι άλλα προϋποθέτουν ένα γεγονός διάχυσης και άλλα πολλαπλής διάχυσης. Όσο αφορά την ατμόσφαιρα, άλλες φορές αντιμετωπίζεται σαν ένα στρώμα, άλλοτε οι υπολογισμοί αφορούν μία διαστρωματοποιημένη ατμόσφαιρα. Όλα τα μοντέλα προϋποθέτουν ότι η ατμόσφαιρα είναι οριζόντια και ομοιογενής. Ειδικότερα τα μοντέλα ενός στρώματος δεν λαμβάνουν υπ' όψη κάθετες μεταβολές της συνάρτησης διάχυσης (phase function) και ως μοναδική τιμή της θεωρούν την ανισοβαρή μέση τιμή των συναρτήσεων φάσης λόγω μοριακών σωματιδίων (Rayleigh) και σκόνης (aerosols). Σ' αυτή την περίπτωση τα βάρη είναι αναλογικά με τα συνολικά οπτικά πάχη των συντελεστών διάχυσης (Turner R.E., 1972, Tanre et al., 1985). Τα μοντέλα που θεωρούν ατμόσφαιρα περισσοτέρων επιπέδων χρησιμοποιούν μία συνάρτηση φάσης που μεταβάλλεται με το ύψος και οι τιμές της υπολογίζονται με την ίδια τεχνική της ανισοβαρούς μέσης τιμής με την διαφορά όμως ότι τα βάρη είναι αναλογικά με τα αντίστοιχα οπτικά πάχη σε κάθε στρώμα (Diner D.J. et al., 1984).

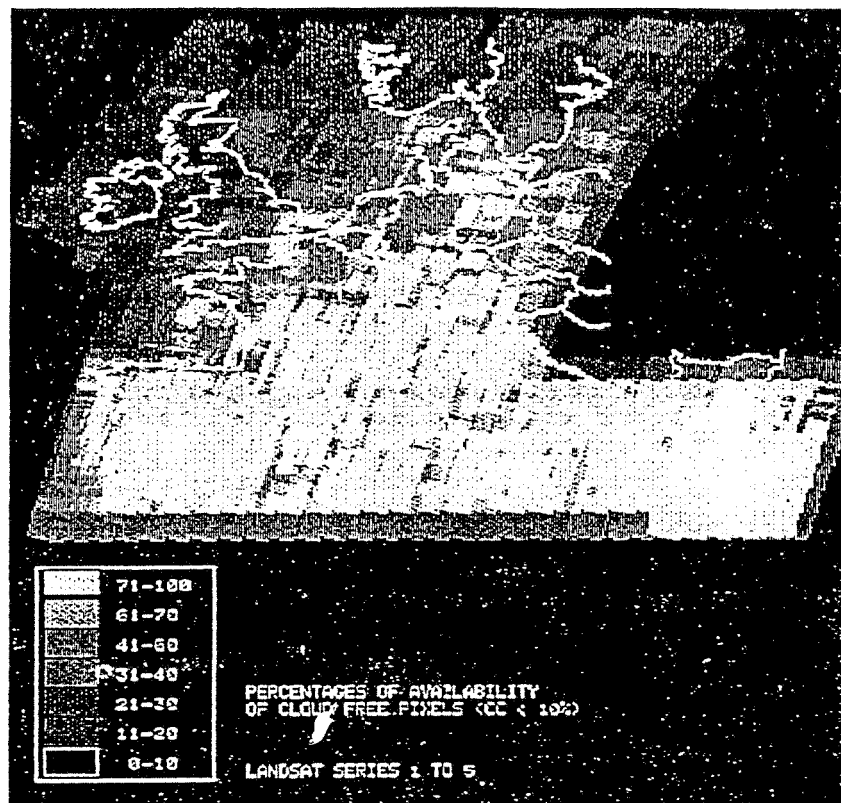
Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός συνθετότητας του μοντέλου που χρησιμοποιείται, τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα που επιστρέφονται. Η ακρίβεια όμως δεν συμβαδίζει με τους βραχείς χρόνους υπολογισμών. Έτσι ο χρήστης καλείται κάθε φορά να επιλέξει την κατάλληλη μέθοδο που απαιτεί η εφαρμογή και το κόστος πραγματοποίησής της.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

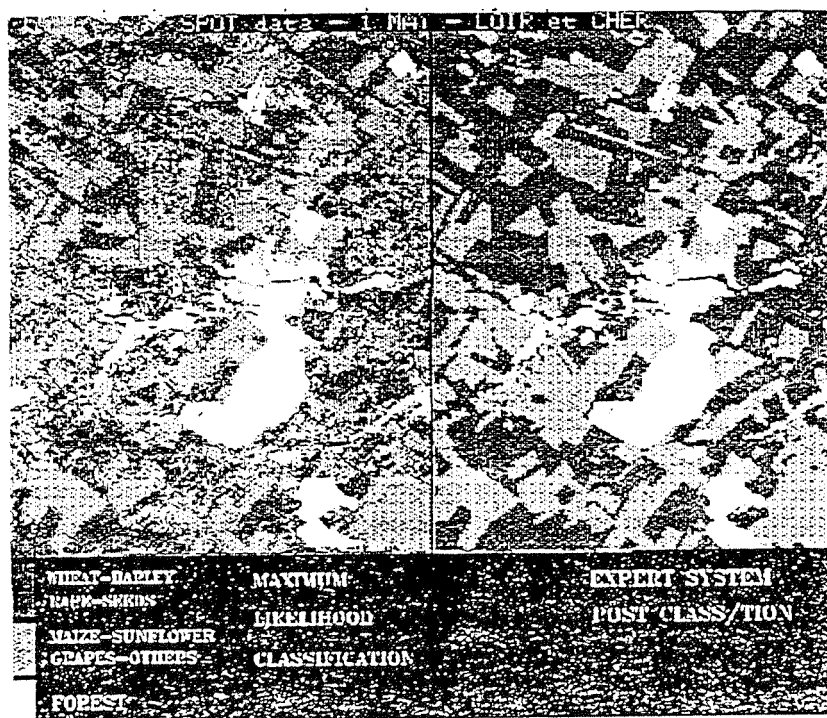
Η αποτελεσματική εφαρμογή της αυτοματοποιημένης φωτοερμηνείας φαίνεται να αποτελεί δύσκολο μα ρεαλιστικό στόχο στην εποχή μας, με την συστηματική ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών. Ωστόσο, η χρήση ταχυτάτων μονάδων Η.Υ. και πολύ ειδικών προγραμμάτων για την επεξεργασία της εικόνας, αποθήκευση και λήψη πληροφορίας σε καί από βάσεις δεδομένων, καθώς και η ανάπτυξη ειδικών στατιστικών μοντέλων αποφάσεων δεν είναι πάντα αρκετά για να επιλυθεί το πρόβλημα της φωτοερμηνείας των τηλεπισκοπικών απεικονίσεων. Απαραίτητο στάδιο πριν από την πλήρη (;) αυτοματοποίηση είναι η κατανόηση των εργασιών του φωτοερμηνευτή, των μεγεθών που αυτός αντιλαμβάνεται και μετρά κάθε φορά ανάλογα με το πρόβλημα, καθώς και τα βήματα λογικής επαγωγής που αυτός ακολουθεί για να οδηγηθεί σε λύση. Επίσης η ολοκληρωμένη εκτίμηση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών του χώρου, των συσχετίσεων τους καθώς και των μεταβολών τους δια μέσω του χρόνου, απαιτεί την εναρμονισμένη διαχρονική και διεπιστημονική συνεργασία. Δεδομένων των παραπάνω απαιτήσεων και αποβλέποντας πάντα στην ταχεία, δια μέσου Η.Υ., επεξεργασία του τεράστιου αυτού όγκου πληροφορίας, πιστεύουμε ότι η ανάπτυξη των Εμπείρων Συστημάτων αποτελεί το μέσο που θα κάνει την μηχανή να απομιμηθεί ότι εξ' ορισμού οφείλει να είναι η φωτοερμηνευτική μεθοδολογία, δηλαδή το "τυποποιημένο ολοκλήρωμα του πολυδιάστατου αθροίσματος της εμπειρίας, λογικής και ειδικής επιστημονικής γνώσης καθώς και των απαραίτητων επιγείων ελέγχων και τηλεπισκοπικών εικόνων". Οποσδήποτε μια τέτοια προσέγγιση αποτελεί αντικείμενο έντασης κεφαλαίων αφού απαιτεί την απόκτηση σύγχρονων μονάδων Η.Υ. και ειδικευμένου προσωπικού. Επίσης ειδικά μαθήματα που αφορούν την χρήση των Εμπείρων Συστημάτων στη Τηλεπισκόπηση, την επεξεργασία ψηφιακών εικόνων σε διάφορα επίπεδα συνθετότητας, την αυτοματοποιημένη χαρτογραφία και τα ειδικά στατιστικά ή και συντακτικά μοντέλα καθώς και μοντέλα αποφάσεων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και αναγνώριση των αντικειμένων, που θα δίνονται στα πανεπιστήμια, αποτελούν την βασική προϋπόθεση για την δημιουργία μίας κατάλληλα καταρτισμένης επιστημονικής κοινότητας που θα φροντίζει για την όλο και πιο αποτελεσματική εφαρμογή της Τηλεπισκόπησης.

Στο διάγραμμα της επόμενης σελίδας, παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια επεξεργασίας εικόνας SPOT που ακολουθούνται στα πλαίσια των αναγκών των προγραμμάτων εφαρμογής MARS και CORINE με σκοπό την ταξινόμηση δορυφορικής εικόνας σε χρήσεις Γης. Η ταξινόμηση ακολουθείται από ένα στάδιο μέτα-ταξινόμησης, όπου τα αρχικά αποτελέσματα αναθεωρούνται στην βάση επιπρόσθετης πληροφορίας που αφορά το περιβάλλον του ταξινομημένου pixel. Είναι φυσικό ότι όλα τα παραπάνω λαμβάνουν χώρα εφόσον είναι πιθανή η διάθεση δορυφορικών εικόνων χωρίς σύννεφα. Η εκτίμηση της πιθανότητας αυτής εξετάζεται σε μία πρώτη φάση των εργασιών και αποφασίζει για την εποχή και την γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης.





Σχ. 1. Χάρτης της διαθεσιμότητας (%) σε καθαρές δορυφορικές λήψεις για την Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Χρονική περίοδος 15/7-15/9.



Σχ. 2. Συγκριτικά αποτελέσματα χαρτών ταξινομήσεως μέγιστης πιθανοφάνειας (αριστερά) και μετα-ταξινομήσεως που έχει βασιστεί στην χρήση εμπείρου συστήματος (δεξιά). Στατιστικό υπόβαθρο στην δεύτερη περίπτωση αποτελεί η θεωρία των Dempster & Shafer.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Argialas P. D., 1988, "Quantitative description and classification of drainage patterns, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, pp. 505-509.
- Diner D.J., Martonchik J.V., "Atmospheric Transfer of Radiation above an Inhomogeneous non-Lambertian reflectance ground - I. THEORY", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 97-125, 1984.
- Fu K., 1981, "Recent Progress in Syntactic Pattern Recognition", Progress in Pattern Recognition, North Holland, Amsterdam, Vol. 1, pp. 1-13.
- Gonzalez R. C., Fittes B. A., 1977, "Gray Level Transformation for Interactive Image Enhancement", Mechanism and Machine Theory, Vol. 12, pp. 111-122.
- Gualtieri J. A., Withers J. (1988), "Godard Researchers Simulate Neural Networks Using Parallel Processing", NASA Information Systems Newsletter, Vol. 15, pp. 12-15.
- Haralick R. M., 1979, "Statistical and Structural Approaches to Texture", IEEE Proceedings, Vol. 67.
- Jensen J. R., 1986, "Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective", Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Kanellopoulos I., Varfis A., Wilkinson G.G., Megier J., "Neural Network Classification of Multi-date Satellite Imagery", to be presented in "1991 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'91)", Helsinki 1991.
- Ketting R., Landgrebe D., 1976, "Classification of Multispectral Image Data by Extraction and Classification of Homogeneous Objects", IEEE Transactions of Geoscience Electronics, GE-14, pp. 119-126.
- Key J., Maslanik J. A., Schweiger A. J., 1989, "Classification of Merged AVHRR and SMMR Arctic Data with Neural Networks", Phot. Eng. and Remote Sensing, Vol. 55, pp. 1331-1338.
- Kontoes C., 1989, "Classification improvement of SPOT data based on the use of filtered data and contextual features. Study of the Loir at Chcr region", Proc. int. Conference on Application of Remote Sensing to Agricultural Statistics, Varese.
- Kontoes C., 1990, "Multi-layered model of spectral, textural and contextual features for pixel labelling", Proc. First European Conference on Geographical Information Systems, Vol. 2, pp. 605-613.
- Kontoes C., Stakenborg J., 1990, "Availability of cloud free LANDSAT images for operational projects. The analysis of cloud cover figures over the countries of the European Communities", Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 11, No. 9, pp. 1600-1608.
- Merchant J. W., 1984, "Using spatial logic in classification of LANDSAT TM data, Univ. of Kansas, Space Technology Centre.
- Rokos D., "Cybernetics and Remote Sensing Methodology. A dialectic