

Επισκόπηση των Τεχνικών Επεξεργασίας και Ανάλυσης Εικόνων με Εφαρμογή στη Γεωπληροφορική

Η. Γκρίνιας

Επιστημονικός Συνεργάτης, Τμήμα Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας, ΤΕΙ Σεργών
Τέρμα Μαγνησίας, 62124, Σέρρες

Δ. Κοτζίνος*

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας, ΤΕΙ Σεργών
Τέρμα Μαγνησίας, 62124, Σέρρες

Τηλ.: 2321049394, Φαξ: 2321049107, E-mail: kotzino@teiser.gr *

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία αποτελεί μια εκτεταμένη και περιεκτική επισκόπηση των μεθόδων επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων που χρησιμοποιούνται στη Γεωπληροφορική. Ο τομέας της επεξεργασίας εικόνων είναι ένας από τους βασικούς τομείς της Επιστήμης των Υπολογιστών και οι εξελίξεις σε αυτόν εφαρμόζονται στη Γεωπληροφορική κυρίως στα πλαίσια επεξεργασίας εικόνων (δορυφορικών, αεροφωτογραφιών, κλπ) που αφορούν γεωσχετιζόμενη πληροφορία. Στο πρώτο μέρος του άρθρου περιγράφονται μέθοδοι προεπεξεργασίας και ειδικότερα τεχνικές αναγωγής ή/και ταυτοποίησης των εικόνων σε γνωστές εικόνες/σημεία αναφοράς. Η σωστή αναγωγή και ταυτοποίηση αποτελούν βασική προϋπόθεση για την επιτυχή ανάλυση των τηλεπισκοπικών δεδομένων, η οποία ακολουθεί την προεπεξεργασία. Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τεχνικές κατάταξης και τμηματοποίησης πολυφασματικών δεδομένων (που προέρχονται από τις αντίστοιχες επεξεργασμένες εικόνες), οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των μεθόδων ποιοτικής ανάλυσης εικόνων και αναλύονται οι εφαρμογές τους στη Γεωπληροφορική και ιδιαίτερα στην τηλεπισκόπηση. Μέσω εκτενούς παράθεσης αναφορών γίνεται σύγκριση των κλασικών μεθόδων ανάλυσης εικόνων που έχουν χρησιμοποιηθεί σε τηλεπισκοπικά δεδομένα και υπογραμμίζονται οι διαφορές τους καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθεμιάς από αυτές. Επίσης, εξηγούνται οι παρατηρήσεις που οδήγησαν στην επιτυχή εφαρμογή σχετικά νέων τεχνικών ανάλυσης εικόνων στην τηλεπισκόπηση και τονίζεται η στενή σχέση και αλληλεπίδραση που υπάρχει σε ερευνητικό επίπεδο μεταξύ των χώρων της επεξεργασίας/ανάλυσης εικόνων από τη μια και της Γεωπληροφορικής από την άλλη.

Λέξεις Κλειδιά: τηλεπισκόπηση, αναγωγή, ταυτοποίηση, ποιοτική ανάλυση εικόνων

ABSTRACT: This paper constitutes an extensive and comprehensive review of digital image preprocessing and analysis methods used in remote sensing imagery. First, well known rectification and registration methods, of sensor images to known base maps, are presented. Correct rectification or/and registration constitute a prerequisite for the successful remote sensing image data analysis, that usually follows preprocessing. Next, qualitative data analysis techniques, for multispectral data classification and segmentation, are presented in extent. Through extensive apposition of references, traditional digital image analysis methods that have been used in remote sensing data are compared and their differences as well as the advantages and disadvantages of each one of them, are underlined. Also, the observations that led to the successful application of relatively new techniques of image analysis to

remote sensing are explained and the close relationship and interaction that exists in research level between image analysis and geoinformatics is emphasized.

Keywords: remote sensing, rectification, registration, qualitative image analysis

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τηλεπισκόπηση ή τηλεανίχνευση (*remote sensing*) είναι η επιστήμη παρατήρησης φαινομένων και χαρακτηριστικών από απόσταση, με μεγάλο εύρος εφαρμογών, εκτός των άλλων και στη Γεωπληροφορική [1]. Σήμερα, με τον όρο τηλεπισκόπηση εννοούμε την επιστήμη και τεχνολογία παρατήρησης και μελέτης των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας από απόσταση, βάσει της αλληλεπίδρασης των υλικών που βρίσκονται επάνω σε αυτή με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τα επιτεύγματα της τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές της Γεωπληροφορικής όπως το Κτηματολόγιο, το σχεδιασμό χρήσεων γης και τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων γης.

Η παρατήρηση της επιφάνειας της γης είναι δυνατή με τη χρήση τηλεπισκοπικών ανιχνευτών που ανιχνεύουν την αντανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της γήινης επιφάνειας και την αναπαριστούν ως ψηφιακή εικόνα. Εάν χρησιμοποιείται το ορατό τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για την αναπαράσταση, προκύπτει μια έγχρωμη εικόνα, ισοδύναμη με αυτές που καταγράφουν οι ψηφιακές μηχανές φωτογράφισης που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Στην πράξη, οι ανιχνευτές «βλέπουν» πολύ πέρα από το ορατό φάσμα με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε μια ποικιλία εικόνων. Έτσι, το αποτέλεσμα ποικίλει ανάλογα με τη φασματική ζώνη στην οποία λειτουργεί ο αισθητήρας του ανιχνευτή. Η σωστή αξιοποίηση των τηλεπισκοπικών δεδομένων προϋποθέτει την προεπεξεργασία τους ώστε να απαλειφθούν μια σειρά από σφάλματα, αλλοιώσεις και μεταβολές που εάν παραμείνουν θα υποβαθμίσουν την ποιότητα της τελικής πληροφορίας και θα οδηγήσουν σε εσφαλμένα ή αλλοιωμένα συμπεράσματα. Οι διορθώσεις στην εικόνα που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή μπορεί να είναι:

- *Γεωμετρικές διορθώσεις* που έχουν να κάνουν με την αναγωγή της καμπύλης γεωμετρίας της εικόνας σε επίπεδη γεωμετρία απαλείφοντας τα σφάλματα που προέρχονται από την επιφάνεια του γήινου ελλειψοειδούς αλλά και της κίνησης της γης καθώς και του τεχνητού δορυφόρου πάνω στον οποίο βρίσκεται ο ανιχνευτής. Επίσης, γεωμετρικές διορθώσεις επιβάλλονται ώστε να διορθωθούν σφάλματα που οφείλονται στο έντονο ανάγλυφο μιας περιοχής, διαδικασία που είναι γνωστή ως *ορθοδιόρθωση* ή *ορθοαναγωγή* [2]-[3]. Τέλος η εικόνα θα πρέπει να αναχθεί σε ένα σύστημα γεωγραφικών ή προβολικών συντεταγμένων ώστε να μπορεί να συνδυασθεί με άλλα γεωγραφικά δεδομένα [4].
- *Ραδιομετρικές διορθώσεις*, που αναφέρονται στην απαλοιφή σφαλμάτων τα οποία προέρχονται από τα τεχνικά στοιχεία της διαδικασίας καταγραφής και μετάδοσης [5].
- *Ατμοσφαιρικές διορθώσεις*, που αφορούν στην απαλοιφή σφαλμάτων τα οποία προέρχονται από την επίδραση των συστατικών της ατμόσφαιρας. Καθώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που αντανακλάστηκε από την γήινη επιφάνεια επιστρέφει στο διάστημα, διέρχεται μέσα από την ατμόσφαιρα, τα συστατικά της οποίας (νερό σε αέρια φάση και αερολύματα) αλλοιώνουν την ποσότητα της εισερχόμενης στον αισθητήρα ακτινοβολίας. Οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις διακρίνονται σε μεθόδους *σταθερής τιμής* και σε μεθόδους *μετάδοσης ακτινοβολίας* [6]-[9].

Μεγάλο μέρος των διορθώσεων αυτών γίνονται με τεχνικές επεξεργασίας εικόνων [10]. Η επεξεργασία ψηφιακών εικόνων (*digital image processing*) αποτελεί τομέα συνεχιζόμενης έρευνας για περισσότερα από 60 χρόνια στην επιστήμη υπολογιστών, με σημαντικά αποτελέσματα και πληθώρα εφαρμογών, από την τηλεόραση έως και την τομογραφία [11]-[12]. Θεωρώντας την ψηφιακή εικόνα ως διδιάστατο σήμα, η επεξεργασία εικόνων αποτελεί επέκταση της επεξεργασίας σημάτων (*signal processing*) στις 2 διαστάσεις. Υπό αυτή τη θεώρηση, αρκετές τεχνικές επεξεργασίας σημάτων εφαρμόζονται και στην επεξεργασία εικόνων. Η έξοδος της επεξεργασίας μπορεί να είναι μια νέα βελτιωμένη εικόνα ή κάποιες παράμετροι ενδιαφέροντος που εξάγονται από την εικόνα εισόδου.

Μετά το στάδιο της προεπεξεργασίας, λαμβάνει χώρα η *ανάλυση* των επεξεργασμένων εικόνων της τηλεπισκόπησης [10]. Η ανάλυση των τηλεπισκοπικών δεδομένων μπορεί να διακριθεί σε τρεις γενικές κατηγορίες: *ποσοτική*, *ποιοτική* και *οπτική ανάλυση* ή *φωτοερμηνεία*. Στην πρώτη περίπτωση ζητούμενο είναι η μέτρηση μιας ιδιότητας-μεταβλητής, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας, γνωστή ως *Sea Surface Temperature (SST)*. Στην περίπτωση της ποιοτικής ανάλυσης ζητούμενο είναι η αποτύπωση χαρακτηριστικών όπως οι χρήσεις

της ή ο εντοπισμός και αναγνώριση συγκεκριμένων υλικών. Τέλος όταν ο αναλυτής εικόνας ερμηνεύει τα δεδομένα με οπτικό τρόπο, δηλαδή μεταφράζει το μοτίβο, το χρώμα και το σχήμα της διάταξης των pixels ώστε να εξάγει πληροφορίες, αναφερόμαστε σε οπτική ανάλυση. Κάθε κατηγορία απαιτεί διαφορετική αντιμετώπιση και διαφορετικές μεθόδους και εργαλεία ανάλυσης. Επίσης, ακόμα και σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες απαιτείται διαφορετική αντιμετώπιση ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων δεδομένων (*χωρική*, *φασματική* και *ραδιομετρική ανάλυση*).

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τεχνικές γεωμετρικών διορθώσεων και ειδικότερα αναγωγής/ταυτοποίησης εικόνων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες σε γνωστούς χάρτες αναφοράς. Στην ενότητα III περιγράφονται αναλυτικά οι διεργασίες ποιοτικής ανάλυσης πολυφασματικών δεδομένων τηλεπισκόπησης που βασίζονται σε γνωστές τεχνικές κατάταξης και τμηματοποίησης οπτικών δεδομένων από τον τομέα ανάλυσης εικόνων της επιστήμης υπολογιστών.

II. ΑΝΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ

Τα ψηφιακά δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από τους αισθητήρες των δορυφόρων υφίστανται προεπεξεργασία ώστε να αναχθούν γεωμετρικά σε ένα χάρτη αναφοράς (*base map*), βάσει συγκεκριμένου συντελεστή κλίμακας και πίνακα προβολής (*projection map*) [4]. Εναλλακτικά, η γεωμετρική προεπεξεργασία μπορεί να αναφέρεται στην αντιπαραβολή ή ταυτοποίηση (*registration*) της ληφθείσας εικόνας σε σχέση με μια δοσμένη σειρά εικόνων που έχουν ληφθεί προγενέστερα, με σκοπό για παράδειγμα, την παρακολούθηση αλλαγών που έχουν συντελεστεί στο μεσοδιάστημα. Γενικά, η ταυτοποίηση είναι μια αυτόματη διαδικασία κατά την οποία η θέση του δορυφόρου σε σχέση με τη γη κατά τη στιγμή λήψης της εικόνας προσδιορίζεται με βάση

- το λεγόμενο μοντέλο *ephemeris* των παραμέτρων τροχιάς του δορυφόρου,
- τις προδιαγραφές λήψης του αισθητήρα και
- ενός σήματος χρόνου

που στέλνονται στην επίγεια βάση [13]-[15].

Αν και οι αλγόριθμοι υπολογισμού θέσης βασίστηκαν αρχικά στην υπόθεση ότι οι δορυφόροι βρίσκονται συνεχώς στη σωστή στάση (*attitude*) και ακολουθούν ακριβώς την προδιαγεγραμμένη τροχιά τους, κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην πράξη [16]. Λόγω των παρεκλίσεων από τις σχεδιαστικές τιμές στάσης και τροχιάς καθώς και της διασποράς αυτών των παρεκλίσεων, για κάποιες από τις λαμβανόμενες εικόνες δεν υπάρχει κατάλληλος χάρτης αναφοράς στον οποίο θα μπορούσαν να αναχθούν με ακρίβεια.

Οι δορυφορικές εικόνες πάσχουν επίσης από γεωμετρικές παραμορφώσεις λόγω παραγόντων όπως η πανοραμική παραμόρφωση, η καμπυλότητα της γης,

η διάθλαση λόγω της ατμόσφαιρας, μετατοπίσεις λόγω του αναγλύφου και η μη γραμμικότητα του πεδίου θέασης των αισθητήρων [17]. Τα λάθη αυτά μπορεί να είναι συστηματικά ή τυχαία. Η γεωμετρική διόρθωση των συστηματικών λαθών περιλαμβάνει συνήθως τη μοντελοποίηση των πηγών λάθους με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και στη συνέχεια την εφαρμογή αυτών των μοντέλων στα δεδομένα της εικόνας υπό διόρθωση [18].

Η διόρθωση των τυχαίων παραμορφώσεων βασίζεται στη μέτρηση της μετατόπισης γνωστών σημείων ελέγχου (ground control points -- GCP), δηλ. διακριτικών γεωγραφικών χαρακτηριστικών με γνωστή θέση πάνω στην εικόνα αναφοράς. Η θέση των σημείων αυτών προσδιορίζεται από την τομή ποταμών, αυτοκινητοδρόμων, αεροδρομίων, χειμάρων ή από μικρές λίμνες, μικρά νησιά κλπ. Στη συνέχεια, η εικόνα του ανιχνευτή δειγματοληπτείται ξανά βάσει αυτής της μετατόπισης, οδηγώντας στη νέα, διορθωμένη εικόνα. Ειδικότερα, με τον όρο «μετατόπιση» εννοούμε τη σχέση f μεταξύ των συντεταγμένων (X, Y) της εικόνας του αισθητήρα και των δεδομένων ελέγχου με γνωστό γεωγραφικό πλάτος και μήκος (x, y) , αντίστοιχα. Η σχέση αυτή προσδιορίζεται συνήθως με την εφαρμογή τεχνικών στρέβλωσης (warping), με βάση τις εξισώσεις:

$$x' = f_1(X, Y)$$

$$y' = f_2(X, Y)$$

Η έξοδος των μεθόδων είναι το γεωμετρικά σωστό πλέγμα (grid) συντεταγμένων για τη ληφθήσα εικόνα [19]. Η αντιστοίχιση της πληροφορίας των pixel της ληφθήσας εικόνας στο νέο πλέγμα γίνεται με την απλή μέθοδο παρεμβολής (interpolation) του πλησιέστερου γειτονικού pixel (nearest neighboring pixel) ή με τις πιο «λεπτομερείς» μεθόδους παρεμβολής βάσει διγραμμικών (bilinear) ή κυβικών (cubic) splines [20]-[21]. Η σύγκριση των μεθόδων αυτών επαναδειγματοληψίας δίνεται στο [22]. Σε κάθε περίπτωση, οι μέθοδοι αυτές μπορεί να μεταβάλλουν τη ραδιομετρική πιστότητα και πρέπει να εφαρμόζονται με ιδιαίτερη προσοχή [23]. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, τα πιο πρόσφατα συστήματα χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το μοντέλο ephemeris και τη διαδικασία αναγωγής βάσει γνωστών σημείων ελέγχου [24].

Επίσης, είναι γνωστό το πρόβλημα των δεδομένων που προκύπτουν από αισθητήρες οι οποίοι μεταφέρονται από δορυφόρους που διαγράφουν πολική τροχιά. Στην περίπτωση αυτή τα δεδομένα είναι σειρές από «λωρίδες» (strips) οι οποίες αφού πρώτα ταυτοποιηθούν μεταξύ τους και διορθωθούν γεωμετρικά, συνδυάζονται στη συνέχεια σε διαδοχικές εικόνες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απώλεια χωρικής ανάλυσης (spatial resolution) που μπορεί να εμφανισθεί κατά την ταυτοποίηση ή την αναγωγή των εικόνων, δεν αποτελεί πάντα πρόβλημα στις εφαρμογές της τηλεπισκόπησης. Αντίθετα, σε μερικές περιπτώσεις αρκεί μια «χονδρική» χωρική περιγραφή των δεδομένων, σε ανάλυση πολύ μικρότερη από αυτή του pixel. Τέλος, σε μερικές

περιπτώσεις, η τελική ταυτοποίηση επιτυγχάνεται με την επικάλυψη (overlay) της επεξεργασμένης εικόνας με κάθε έναν από τους χάρτες αναφοράς [25].

III. ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ

Η ταχεία ανάπτυξη στη συλλογή τηλεσκοπικών δεδομένων τις δύο τελευταίες δεκαετίες, έχει οδηγήσει στη ύπαρξη πολλαπλών πηγών δεδομένων εικόνων, με ολοένα αυξανόμενη ανάλυση και αριθμό διαστάσεων χωρικής, χρονικής, φασματικής και ακτινοβολίας πληροφορίας.

Για την ποιοτική ανάλυση ψηφιακών εικόνων τηλεπισκόπησης, χρησιμοποιούνται κυρίως τεχνικές κατάταξης (classification) και τμηματοποίησης (segmentation) από τον τομέα της αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition), της επιστήμης υπολογιστών [26]-[27]. Η ανάλυση βασίζεται τόσο σε τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί με επιτυχία από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, όσο και σε νεότερες καινοτόμες ιδέες, οι οποίες βρίσκονται σε πολλές περιπτώσεις στο στάδιο έρευνας ακόμη, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα στους τομείς που έχουν εφαρμοσθεί.

A. Κατάταξη ή Ταξινόμηση Ψηφιακών Δεδομένων Εικόνων

Με τον όρο «κατάταξη» εννοούμε την ταξινόμηση των pixel της εικόνας σε κλάσεις ως προς κάποια χαρακτηριστικά όπως τιμές φάσματος, το χρώμα ή η υφή (texture). Η πολυφασματική κατάταξη (multi-spectral classification) είναι μια από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για την εξαγωγή χρήσιμης πληροφορίας. Θεωρώντας την οργάνωση των δεδομένων για μια γεωγραφική περιοχή σε πολλαπλές ζώνες (bands) ή επίπεδα (layers) με καλή γεωμετρική ταυτοποίηση, κάθε pixel χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα τιμών, μία τιμή για κάθε ζώνη ή επίπεδο δεδομένων. Υπό αυτή την έννοια, κάθε pixel αντιστοιχίζεται μέσω του διανύσματος χαρακτηριστικών του σε ένα σημείο του πολυδιάστατου χώρου χαρακτηριστικών (attribute space). Οι άξονες του χώρου αυτού αντιστοιχούν σε κάθε μια από τις ζώνες της πολυεπίπεδης οργάνωσης των δεδομένων.

Κάθε ομάδα από pixel, με αναφορά στον πολυδιάστατο χώρο χαρακτηριστικών, ονομάζεται συλλογή (cluster). Δύο pixel ανήκουν στην ίδια συλλογή όταν τα διανύσματά τους ή κάποιες από τις τιμές των διανυσμάτων τους είναι «παρόμοια». Κάθε κλάση αντιστοιχεί σε μια ομάδα από pixel. Στην περίπτωση πολυφασματικών εικόνων τηλεπισκόπησης οι κλάσεις περιγράφουν δάσος, νερό, εκτάσεις καλλιέργειας δημητριακών κλπ.

Οι προσεγγίσεις κατάταξης διακρίνονται σε εποπτευόμενες (supervised) και μη εποπτευόμενες (unsupervised). Κατά την εποπτευόμενη κατάταξη, οι

κλάσεις ή ετικέτες (labels) είναι γνωστές εκ των προτέρων. Επιπλέον είναι γνωστές κάποιες αντιπροσωπευτικές θέσεις της μελετούμενης περίπτωσης (case study) για κάθε κλάση. Οι θέσεις αυτές αποτελούν τα δεδομένα εκπαίδευσης (training data) και πρέπει να επιλέγονται από τον αναλυτή ώστε και να περιγράφουν ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης και να διακρίνουν την κάθε κλάση από τις υπόλοιπες. Ο σκοπός σε αυτή την περίπτωση είναι να ανατεθεί σε κάθε μονάδα χώρου μια από τις ετικέτες με βάση κάποιον αλγόριθμο κατάταξης. Γνωστοί αλγόριθμοι εποπτευόμενης κατάταξης είναι [26]:

- ο αλγόριθμος κατάταξης ελάχιστης απόστασης (minimum distance) [28],
- ο αλγόριθμος κατάταξης του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor) [29]-[30],
- αλγόριθμοι βασισμένοι σε νευρωνικά δίκτυα [31]-[32] και
- ο αλγόριθμος μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood) [33].

Ο τελευταίος ανήκει στους παραμετρικούς αλγορίθμους κατάταξης, αφού, σε σχέση με τους άλλους αλγορίθμους, προϋποθέτει ότι είναι γνωστή η στατιστική κατανομή των δεδομένων κάθε κλάσης.

Η μη εποπτευόμενη κατάταξη αναφέρεται στη βιβλιογραφία με τον αγγλικό όρο (unsupervised) clustering [34]-[35]. Αποτελεί επίσης μια αποτελεσματική προσέγγιση διαμέρισης δεδομένων του πολυφασματικού χώρου χαρακτηριστικών. Σε αντίθεση με την εποπτευόμενη κατάταξη, απαιτείται ελάχιστη καθοδήγηση από τον αναλυτή της μελετούμενης περίπτωσης διότι δεν είναι αναγκαία η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων εκπαίδευσης. Η ομαδοποίηση των πολυφασματικών δεδομένων σε συλλογές γίνεται από γνωστούς υπολογιστικούς αλγορίθμους, βάσει στατιστικών κριτηρίων [10], [36]-[37]. Ειδικότερα, οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται σε επαναληπτικές, αριθμητικές μεθόδους για τη διερεύνηση της φυσικής ομαδοποίησης των χαρακτηριστικών των pixel. Μετά την ομαδοποίηση ακολουθεί ο μετασχηματισμός των φασματικών ομάδων στις θεματικές κλάσεις πληροφορίας της μελέτης (δάσος, γεωργικές καλλιέργειες κλπ.).

Σύγκριση αλγορίθμων και των δύο προσεγγίσεων κατάταξης επιχειρείται στο [38]. Πάντως, κοινό γνώρισμα και των δύο προσεγγίσεων είναι ότι ακολουθείται η λογική της ακριβούς ή σαφούς κατάταξης (hard classification), ώστε να προκύψει ένας χάρτης αντιστοίχισης της κάθε μονάδας χώρου σε ακριβώς μία, διακριτή κατηγορία χαρακτηριστικών. Στον αντίποδα, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μη ακριβούς ή ασαφούς λογικής (fuzzy classification) οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την ανομοιογένεια και ασάφεια που παρατηρείται στον πραγματικό κόσμο [39].

Για την κατάταξη έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί δένδρα απόφασης (decision trees) που βασίζονται σε κανόνες (rule based classification) [40]-[41]. Για τη διατύπωση των κανόνων κατάταξης χρησιμοποιούνται τεχνικές

εξόρυξης γνώσης από δεδομένα (data mining). Στόχος των τεχνικών αυτών είναι η περιγραφή της εξειδικευμένης γνώσης, που προϋπάρχει για την υπό μελέτη περίπτωση, από λειτουργικούς κανόνες. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται στην κατάταξη τόσο δεδομένων που παίρνουν τιμές σε κάποιο διάστημα των πραγματικών αριθμών, όσο και σε προεπεξεργασμένα δεδομένα με ονομαστικές ή διακριτές ακέραιες τιμές.

Μια τελευταία, σημαντική διάκριση των μεθόδων κατάταξης προκύπτει από το αν αυτές αναφέρονται στην ανάθεση ετικέτας σε επίπεδο pixel ή αντικειμένων (objects) [41], [42]. Η συνήθης πρακτική στην κατάταξη ψηφιακών εικόνων είναι η ταξινόμηση να βασίζεται στην επεξεργασία όλης της εικόνας, pixel προς pixel. Αντίθετα, οι τεχνικές κατάταξης που βασίζονται σε αντικείμενα, επιτρέπουν στον αναλυτή να αποσυνθέσει την εικόνα σε πολλά, σχετικά ομοιογενή αντικείμενα, τα οποία αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως τμήματα (segments) ή τεμάχια (patches), χρησιμοποιώντας κάποια από τις διαδικασίες τμηματοποίησης της εικόνας οι οποίες περιγράφονται στην επόμενη υποενότητα. Σε αυτή την περίπτωση, αντικείμενο των παραδοσιακών μεθόδων σαφούς ή ασαφούς κατάταξης είναι η ταξινόμηση των αντικειμένων, αντί των pixel, με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Η κατάταξη βάσει αντικειμένων εφαρμόζεται κυρίως σε δεδομένα μεσαίας και μεγάλης χωρικής ανάλυσης, τα οποία είναι γνωστό ότι χαρακτηρίζονται από χωρικό πλεονασμό (spatial redundancy), λόγω της τοπικής ομοιογένειας τμημάτων της εικόνας.

Η χρήση αυτής της νέας προσέγγισης ενισχύθηκε από τη διαπίστωση ότι η απόδοση των μεθόδων κατάταξης των pixel δεν αυξάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό καθώς αυξάνεται η χωρική ανάλυση [43]-[44]. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι το επίπεδο της απαιτούμενης λεπτομέρειας κατά την αντιστοίχιση των pixel σε κλάσεις, υπαγορεύει και το επίπεδο χωρικής ανάλυσης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί [45]-[46]. Με άλλα λόγια, η χωρική ανάλυση των τηλεπισκοπικών εικόνων, καθορίζει σε σημαντικό βαθμό το επίπεδο λεπτομέρειας που μπορεί να επιτευχθεί από τους αλγορίθμους κατάταξης. Τέλος, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας επιτυχούς κατάταξης είναι η σωστή επιλογή ενός αριθμού από τις διαθέσιμες ζώνες των φασματικών δεδομένων, έχοντας ως κριτήριο τη σχετικότητα τους με τη μελετούμενη περίπτωση.

B. Τμηματοποίηση Εικόνων και Video

Πέρα από τη χρήση της στην κατάταξη αντικειμένων, η τμηματοποίηση ή κατάτμηση (segmentation) εικόνων αποτελεί αυτόνομη διεργασία ανάλυσης πολυμεσικών δεδομένων εικόνων και video με πληθώρα εφαρμογών στην επεξεργασία και μετάδοση των δεδομένων αυτών [47]. Η χρησιμότητά της έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι μειώνει τον χωρο-χρονικό πλεονασμό (spatio-temporal redundancy) που διαπιστωμένα χαρακτηρίζει

τα οπτικά δεδομένα. Η μείωση του πλεονασμού οδηγεί σε μείωση του υπολογιστικού χρόνου επεξεργασίας και, με κατάλληλη κωδικοποίηση, του χρόνου μετάδοσης εικόνων/video.

Με τον όρο «τμηματοποίηση» εννοούμε την αποσύνθεση της εικόνας σε αντικείμενα ενδιαφέροντος. Τυπικά, ως αντικείμενα ορίζονται συνεκτικές περιοχές pixel στο χώρο συντεταγμένων της εικόνας οι οποίες χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια ως προς κάποια γνωρίσματα. Η καταλληλότητα των γνωρισμάτων κρίνεται από το κατά πόσο είναι ικανά να διακρίνουν τα αντικείμενα από την υπόλοιπη εικόνα. Οπτικά γνωρίσματα (visual cues) που έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην τμηματοποίηση video είναι για παράδειγμα η κίνηση αντικειμένων και η ανίχνευση αλλαγών (change detection) [48]-[49]. Για την τμηματοποίηση στατικών (still) εικόνων έχουν χρησιμοποιηθεί χαρακτηριστικά όπως οι ακμές (edges) και η ομοιογένεια περιοχών ως προς την ένταση ή φωτεινότητα (intensity), το χρώμα και την υφή (texture) [50]-[52]. Σε πολλές περιπτώσεις τα χαρακτηριστικά αυτά συνδυάζονται για καλύτερα αποτελέσματα [53]. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η τμηματοποίηση μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιαδήποτε χωρικά κατανεμημένη μεταβλητή, έστω κι αν η κατανομή της στο χώρο δεν έχει τη μορφή του πλέγματος (grid) των εικόνων.

Οι κυριότεροι αλγόριθμοι τμηματοποίησης τηλεπισκοπικών εικόνων έχουν τη βάση τους στον τομέα μηχανικής όρασης και ρομποτικής της επιστήμης υπολογιστών. Γνωστοί αλγόριθμοι τμηματοποίησης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε τηλεπισκοπικά δεδομένα είναι

- αλγόριθμοι που βασίζονται σε κατώφλια [54],
- αλγόριθμοι επέκτασης περιοχών (region growing) [55]-[57],
- αλγόριθμοι πλημμυρίδας (flooding) [58]-[59],
- τεχνικές που βασίζονται στα ισοσταθμικά σύνολα (level sets) [60],
- αλγόριθμοι ενεργών περιγραμμάτων (active contours) [61].

Κύριο χαρακτηριστικό των αλγορίθμων τμηματοποίησης είναι ότι συνδυάζουν τη φασματική με τη χωρική πληροφορία. Στις εικόνες τηλεπισκόπησης, το αποτέλεσμα της τμηματοποίησης είναι διακριτές περιοχές που χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια ως προς το φάσμα και το σχήμα τους και αποτελούν τμήματα ή τεμάχια του απεικονιζόμενου τοπίου. Σε πολλές περιπτώσεις, η εξαγωγή αντικειμένων οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό χαρακτηριστικών που περιγράφουν καλύτερα την υπό μελέτη διεργασία και οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα κατάταξης των τμημάτων σε κλάσεις. Από την άλλη πλευρά, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι όπου η κατάταξη των pixel σε κλάσεις προηγείται ή συνδυάζεται με το αποτέλεσμα της τμηματοποίησης βάσει κυρίως της στατιστικής μοντελοποίησης κατά Bayes, με πολύ καλά αποτελέσματα [62]-[63].

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στην επισκόπηση αυτή καταγράψαμε τις τεχνικές επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων που έχουν εφαρμογή στη Γεωπληροφορική, προσπαθώντας να ανιχνεύσουμε τη στενή σχέση των δύο χώρων ώστε να αξιολογήσουμε σε επόμενο στάδιο αν και κατά πόσο οι εξελίξεις στον τομέα της Πληροφορικής που ασχολείται με την επεξεργασία εικόνων εισάγονται και αλληλεπιδρούν με την Γεωπληροφορική. Επίσης, σε ένα επόμενο στάδιο μπορεί κανείς να αξιολογήσει και την ανάποδη διαδρομή: κατά πόσο δηλαδή η επίλυση προβλημάτων που ανακύπτουν στη Γεωπληροφορική και κυρίως στην Τηλεπισκόπηση, συνεισφέρει επιστημονικά με νέες τεχνικές, στην εξέλιξη του τομέα της επεξεργασίας εικόνων και πολυμέσων.

V. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] "Introduction to remote sensing", 3rd Edition, The Guilford Press, 2002.
- [2] Hemmleb M. and Wiedemann A., "Digital Rectification and Generation of Orthoimages in Architectural Photogrammetry", CIPA International Symposium, IAPRS, XXXII, Part 5C1B: pp. 261-267, Göteborg, Sweden, 1997.
- [3] Rosenholm D. and Akerman D., "Digital Orthophotos from IRS-Production and Utilization", GIS-Between Visions and Applications, ISPRS, 32, Stuttgart, German, 1998.
- [4] "Map projections-a working manual", Snyder J.P., U.S. Geological Survey professional paper 1395, Washington DC: United States Government Printing Office, 1987.
- [5] "A comparative study of radiometric correction methods for optical remote sensing imagery: the IRC vs. other image-based C-correction methods", Kobayashi S. and Sanga-Ngoie K., International Journal of Remote Sensing, Vol. 30, 2009, pp. 285-314.
- [6] "Reflectance properties of West African savanna trees from ground radiometer measurements. II. Classification of components", Hanan N.P., Prince S.D. and Franklin J., International Journal of Remote Sensing, Vol. 14, 1993, pp. 1081-1097.
- [7] "Surface temperature retrieval in a temperate grassland with multi-resolution sensors", Goetz S.J., Halthore R., Hall F.G. and Markham B.L., Journal of Geophysical Research, No. 100, 1995, pp. 25397-25410.
- [8] "Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery", Kaufman J. Y. and Sendra C., Int. J. Remote Sensing, Vol. 9, 1988, pp. 1357-1381.
- [9] "Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery", Fraser R. S., Ferrare R. A., Kaufman Y. J., Markham B. L., and Mattoo S., Int. J. Remote Sensing, Vol. 13, 1992, pp. 541-557.
- [10] Introductory digital image processing: a remote sensing perspective, 3rd Edition, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2005.
- [11] "Digital Image Processing", 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1991.

- [12] "Fundamentals of Digital Image Processing", Prentice Hall, US Edition, 1988.
- [13] "The navigation of AVHRR imagery", Brush R.J.H., International Journal of Remote Sensing, Vol. 9, 1988, pp. 1491-1502.
- [14] "AVHRR image navigation: summary and review", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, No. 55, 1989, pp. 1175-1183.
- [15] "Spacecraft attitude variations of NOAA-11 inferred from AVHRR imagery", Baldwin D. and Emery W.J., International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, pp. 531-548.
- [16] "Some considerations for using AVHRR data in climatological studies: I. Orbital characteristics of NOAA satellites", McGregor J. and Gorman, A.J., International Journal of Remote Sensing, Vol. 15, 1994, pp. 537-548.
- [17] "Remote Sensing and Image Interpretation", 4th Edition, New York: Wiley & Sons, 2000.
- [18] "A simplified method of accurate geometric correction for NOAA AVHRR 1B data", Wu B.F. and Liu, H.Y., International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, 1997, pp. 1795-1808.
- [19] "A review of image warping methods", Glasbey C.A. and Mardia K.V., Journal of Applied Statistics, No. 25, 1998, pp. 155-171.
- [20] "The optimisation of higher-order resampling methods in the multiprocessor environment", Khan B., Hayes L. and Cracknell, A.P., Parallel Computing, No. 18, 1992, pp. 1335-1347.
- [21] "The effects of higher-order resampling on AVHRR data", Khan B., Hayes L.W.B. and Cracknell A.P., International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, 1995 pp. 147-163.
- [22] Zhang L, An Y., Ma H., Sun W., "The Application of Data Fitting in Direct Geolocation of Remote Sensing Data", International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Vol. 1, pp. 270-273, 2009.
- [23] "Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer", Goward S.N., Markham B., Dye D.G., Dulaney W. and Yang J., Remote Sensing of Environment, No. 35, 1991, pp. 257-277.
- [24] "A new method for high accuracy navigation of NOAA AVHRR imagery", Marçal A.R.S., International Journal of Remote Sensing Vol. 20, 1999, pp. 3273-3280.
- [25] "The problem of AVHRR image navigation revisited", Krasnopolsky V.M. and Breaker L.C., International Journal of Remote Sensing, Vol. 15, 1994, pp. 979-1008.
- [26] "Pattern Classification", J. Wiley and Sons, 2001.
- [27] "Pattern Recognition", 3rd Edition, Academic Press, 2006.
- [28] Wacker A.G. and Landgrebe D.A., "Minimum Distance Classification in Remote Sensing", LARS Tech. Report No. 030772, 1972.
- [29] Xiuping Jia and Richards J.A., "Cluster-space classification: a fast k-nearest neighbour classification for remote sensing hyperspectral data", IEEE Workshop on Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data, 2003, pp. 407-410.
- [30] "A Parallel Network of Modified 1-NN and K-NN Classifiers: Application to Remote Sensing Image Classification", Jozwik A., Serpico S. and Roli, F., Pattern Recognition Letters, 1998, pp. 57-62.
- [31] Kanellopoulos I., Wilkinson G.G. and Megier J., "Integration of neural network and statistical image classification for land cover mapping", Proc. IGARSS 93, 1993, pp. 511-513.
- [32] "Classification of multisensor remote-sensing images by structured neural networks". Serpico S.B. and Roli F., IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, 1995, pp. 562-578.
- [33] "A fast maximum likelihood classifier", Venkateswarlu N.B. and Singh R.P., International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, 1995, pp 313-320.
- [34] "Finding Groups in Data. An Introduction to Cluster Analysis", John Wiley and Sons, 1990.
- [35] "Data clustering: A review", Jain A.K., Murty M.N. and Flynn P.J., ACM Computing Surveys, vol. 31, no. 3, pp. 264-323, 1999.
- [36] Jian Zheng, Zhanzhong Cui, Anfei Liu, Yu Jia, "A K-Means Remote Sensing Image Classification Method Based On AdaBoost", 4th International Conference on Natural Computation, Vol. 4, 2008, pp. 27-32.
- [37] Phillips S., "Reducing the computation time of the Isodata and K-means unsupervised classification algorithms", IGARSS'02, Vol. 3, 2002, pp. 1627-1629.
- [38] Akgün A., Eronat A.H. and Turk N., "Comparing Different Satellite Image Classification Methods: An Application In Ayvalık District, Western Turkey", XXth International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, 2004.
- [39] "Fuzzy sets in remote sensing classification", Gomez D. and Montero J., Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, Vol. 12, 2007, pp. 243-249.
- [40] "Decision Tree Classification of Land Cover From Remotely Sensed Data", Friedl M.A. and Brodley C.E., Remote Sensing of Environment, 61, 1997, pp. 399-409.
- [41] "Expert System Based on Object-oriented Approach for Land Cover Mapping", Zhang Lei, Zhou Yueming and Wu Bingfang, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B7, Beijing, 2008.
- [42] "Review of Remotely Sensed Imagery Classification Patterns Based on Object-oriented Image Analysis", Liu Y., Li M., Mao L., Xu F. and Huang S., Chinese Geographical Science, 16(3), 2006, pp. 282-288.
- [43] "An evaluation of simulated TM data and Landsat MSS data for discriminating suburban and regional land use and land cover", Toll D., Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 50, 1984, pp. 1713-1724.
- [44] "Multi-spectral classification of land use at the rural-urban fringe using SPOT data", Martin L. R. G., Howarth P. J., Holder G., Canadian Journal of Remote Sensing, 14, 1988, pp. 72-79.
- [45] "Spatial resolution requirements for urban studies", Welch R., International Journal of Remote Sensing, Vol. 3, 1982, pp. 139-146.
- [46] "The effects of spatial resolution on land cover/land use theme extraction from airborne digital data", Johnson D. D., Howarth P. J., Canadian Journal of Remote Sensing, No. 13, 1987, pp. 68-74.

- [47] "Region-based representations of image and video: segmentation tools for multimedia services", Salembier P. and Marques F., IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol. 9, pp. 1147-1169, Dec. 1999.
- [48] "Video segmentation using fast marching and region growing algorithms", Sifakis E., Grinias I. and Tziritis G., EURASIP Journal on Applied Signal Processing, pp. 379-388, April 2002.
- [49] "Image sequence analysis for emerging interactive multimedia services -the European COST 211 framework", Alatan A.A. et al., IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, Vol 8, 802-813, November 1998.
- [50] "A computational approach to edge detection", Canny J.F., IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 8, pp. 679-698, 1986.
- [51] "Seeded region growing", Adams R. and Bischof L., IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol. 16, pp. 641-647, June 1994.
- [52] "Texture classification and segmentation using wavelet frames", Unser M., IEEE Trans. Image Processing, Vol. 4, pp. 1549-1560, Nov. 1995.
- [53] Belongie S., Carson C., Greenspan H. and Malik J., "Color- and texture based image segmentation using EM and its application to content based image retrieval", in Proc. IEEE International Conference of Compute Vision (ICCV98), 1998.
- [54] "Segmentation of remotely sensed images with fuzzy thresholding, and quantitative evaluation", Pal S.K., Ghosh A. and Uma Shankar B., International Journal of Remote Sensing, Vol. 21, 2000, pp. 2269-2300.
- [55] Samy R. A. and Lucas A., "I.R. aerial images segmentation based on correlation of local histograms", Applications of digital image processing XII, San Diego, USA, 1989.
- [56] Bins L., Fonseca L. and Erthal G., "Satellite imagery segmentation: a region growing approach", In VIII Brazilian Symposium on Remote Sensing, 1996, pp. 677-680.
- [57] Ho P.-G.P and Chen C.H., "Time series model based region growing method for image segmentation in remote sensing images", International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, pp. 3802 - 3805.
- [58] Yun Zhang, Xuezhi Feng and Xinghua Le, "Segmentation on Multispectral Remote Sensing Image Using Watershed Transformation", Congress on Image and Signal Processing, Vol. 4, 2008, pp. 773-777.
- [59] "Multispectral image segmentation by a multichannel watershed-based approach", P. Li and X. Xiao, International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, 2007.
- [60] Ball J.E. and Bruce L.M., "Level set segmentation of remotely sensed hyperspectral images", International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005, pp. 5638-5642.
- [61] Matsumoto N., Yoshida N. and Narazaki S., "Cooperative active contour model and its application to remote sensing", ACM Symposium on Applied Computing, 2006, pp. 44-45.
- [62] Mohammadpour A., Feron E. and Mohammad-Djafari A., "Bayesian segmentation of hyperspectral images", 24th International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering, 2004, AIP Conference Proceedings, Vol. 735, pp. 541-548.
- [63] I. Grinias, N. Komodakis and G. Tziritis, "Bayesian Region Growing and MRF-Based Minimization for Texture and

Colour Segmentation", Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, Santorini, Greece, June 2007.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Δημήτρης Κοτζίνος

Τμήμα Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας
Τεχνολογικός Εκπαιδευτικός Ίδρυμα Σεργίων
Τέρμα Μαγνησίας
62124 Σέρρες - Ελλάδα

Τηλ.: 2321049394, Φαξ: 2321049117

E-mail: kotzino@teiser.gr

Χωρογραφίες/ Τόμος 1/ Αρ 1/ 2010 – σελ 1-7