

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών

**ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**



**NATIONAL TECHNICAL
UNIVERSITY OF ATHENS**
School of Rural & Surveying Engineering

**GEOINFORMATICS
POST-GRADUATE PROGRAMME**

Θεμελιώδεις Επεξεργασίες Χωρικής Πληροφορίας σε Δίκτυα Γεωαισθητήρων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Ευγένιου-Δημήτριου Γουλιμή

Επιβλέπων : Τιμολέων Σελλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

(Υπογραφή)

.....

ΕΥΓΕΝΙΟΣ-ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΓΟΥΛΙΜΗΣ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2012 – All rights reserved

Περίληψη

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία ξεκινάει με τη θεώρηση ενός υποδείγματος επεξεργασίας στο φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας –συλλογή, αποθήκευση-διαχείριση, ανάλυση και απόδοση γεωγραφικών δεδομένων– το οποίο επιτείνεται από τις τεχνολογικές εξελίξεις στην πληροφορική και τα συστήματα. Συγκεκριμένα, τεχνουργήματα ενσωματωμένης τεχνολογίας, αισθητήρων και ασύρματης τεχνολογίας καθιστούν εφικτή την αδιάλειπτη σύζευξη της φυσικότητας αντικειμένων, φαινομένων, συμβάντων του γεωγραφικού χώρου με τα υπολογιστικά συστήματα. Το σύνολο των δομικών στοιχείων οργανωμένων σε δίκτυα επικοινωνούντων αισθητηριακών στοιχείων παρέχει μια συστημική ολοκλήρωση με εκτεταμένες ανιχνευτικές, αντιδραστικές, εποπτικές, ελεγκτικές και άλλες δυνατότητες, που οδηγεί στην εικονικοποίηση όλο και περισσότερων καταστάσεων και συμβάντων που αφορούν την γεωγραφική πραγματικότητα.

Η εργασία αυτή περαιτέρω, καταπιάνεται ουσιαστικά με συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων. Εστιάζει, στο τεχνολογικό κομμάτι που αφορά τις υπολογιστικές διαδικασίες επεξεργασίας της χωρικής πληροφορίας που συλλέγεται από τα δίκτυα αυτά. Στα δίκτυα γεωαισθητήρων a priori δεν υπάρχει υπολογιστικό σημείο με καθολική γνώση του συστήματος μήτε είναι αποτελεσματικό να δημιουργηθεί. Γι' αυτό το λόγο εφαρμόζονται επεξεργασίες πληροφοριών βάση μιας αποκεντρωμένης προσέγγισης δηλ. τα ανεπεξέργαστα ή συλλεγόμενα δεδομένα των κόμβων δεν εξωθούνται προς έναν απομακρυσμένο κόμβο για να υποστούν εκεί όλες τις απαραίτητες επεξεργασίες, αλλά εφαρμόζονται συνεργατικές επεξεργασίες εντός των κόμβων του δικτύου προς επίτευξη του απαιτούμενου υπολογιστικού έργου και ειδικά στη προκειμένη περίπτωση επιδιώκοντας κατά το δυνατόν αυτονομία και μείωση του επικοινωνιακού κόστους. Η αποκεντρωμένη προσέγγιση εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται θεμελιώδεις αλγόριθμοι επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας σε δίκτυα γεωαισθητήρων που είναι άλλωστε και υπόνοια του περιεχόμενου, βάση του τίτλου αυτής της εργασίας.

Abstract

This master thesis begins with the consideration of a processing paradigm on the operating “spectrum” of geoinformation -acquisition, storage-management, analysis and communicating of geographical data- which is exacerbated by the technological advances in computing and systems. Specifically, artifacts of embedded technology, sensors and wireless technology make possible the seamless coupling of physicality of objects, phenomena, and events of the geographical space with computer systems.

The set of components organized in communicating sensor network elements provides system integration with extended detective, reactionary, monitoring, controlling and other capabilities that leads to virtualization of more and more situations and events related to the geographical reality.

This work further deals, substantially, with geosensor networks. It focuses on the technological aspect of the computational processing of spatial information collected from these networks. In geosensor networks there is a priori neither computing point with global knowledge of the entire system nor is it efficient to create one. For this reason, the information processing is applied based on a decentralized approach i.e. the raw or collected data are not pushed to a remote node in order to undergo all the necessary processing, but cooperative processing is applied in the network nodes for the achievement of the required computational task. Decentralization implies a high degree of independent operation and autonomous control and in this special case, aims to reduce the communication cost. The decentralized approach is effective in geosensor networks in solving various problems. In this context, fundamental spatial information processing algorithms in geosensor networks are presented which is implied, with respect on the title of this work.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract	5
Ευχαριστίες.....	9
Πρόλογος.....	11
Διάρθρωση εργασίας	12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η λειτουργία της γεωπληροφορίας ενταγμένη ανάμεσα στα άκρα αισθητηριακών και αντιδραστικών στοιχείων

15

1.1 Η θεώρηση ενός υποδείγματος επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας βάση τεχνολογικών εξελίξεων	15
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων

25

2.1 Η τεχνολογία – Η ασύρματη επικοινωνιακή διασύνδεση, η ενσωματωμένη τεχνολογία και οι αισθητήρες.....	26
2.2 Συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων, Γεωεπιστήμες και άλλα συστήματα συλλογής χωρικών δεδομένων	29
2.3 Τρεις εφαρμογές συστημάτων δικτύων Γεωαισθητήρων	31
2.4 Ερευνητικά θέματα συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μοντελοποίηση δικτύων γεωαισθητήρων

51

3.1 Μοντέλο γειτονιάς (Neighborhood-Based Model)	51
3.2 Εκτεταμένο χωρικό μοντέλο	53
3.3 Χωροχρονικό μοντέλο	56
3.4 Μερική και αβέβαιη γνώση	58
3.5 Καθορισμός περιορισμών στην κίνηση της πληροφορίας	59
σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Υπολογιστικό μοντέλο για την ανάπτυξη αλγορίθμων για συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων.....

67

4.1 Υπολογιστικό μοντέλο	67
4.2 Ένας απλός αλγόριθμος καταμέτρησης.....	71
4.3 Ανάλυση Αλγορίθμων	72
4.4 Η επαναληπτική διαδικασία της ανάπτυξης.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αλγόριθμοι εν γνώσει γειτονιάς.....	77
5.1 Η γειτονιά ενός κόμβου σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων.....	77
5.2 Διάχυση και δρομολόγηση πληροφοριών σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων.....	78
5.2 Κατασκευή a posteriori τοπολογιών συνδεσιμότητας δικτύου γεωαισθητήρων.....	85
5.3 Εκλογή κόμβου ηγέτη σε δίκτυο γεωαισθητήρων.....	90
5.4 Ποιοτικές επεξεργασίες χωρικής ανάλυσης σε δίκτυο γεωαισθητήρων.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αλγόριθμοι εν γνώσει θέσης.....	97
6.1 Κατασκευή επίπεδων τοπολογιών συνδεσιμότητας δικτύου.....	97
6.2 Γεωγραφική δρομολόγηση (Georouting).....	100
6.3 Δρομολόγηση γύρω από όρια περιοχών.....	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αλγόριθμοι δυναμικής.....	113
7.1 Αλλαγές καταστάσεων στο ρου του χρόνου.....	113
7.2 Ιστορίες δυναμικών περιβαλλόντων ανίχνευσης.....	116
7.3 Ιστορίες κινητών αντικειμένων.....	120
7.4 Χρονικά κινητών κόμβων.....	125
7.5 Χρονικά δυναμικών περιβαλλόντων ανίχνευσης.....	128
7.6 Χρονικά Τοπολογικών αλλαγών περιοχών.....	133

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Επίλογος.....	139
8.1 Προσομοίωση.....	139
8.2 Μοντέλα ερωτημάτων.....	143
8.3 Ρεύματα δεδομένων.....	144
8.4 Οπτικοποίηση.....	145
8.5 Τελικά Συμπεράσματα.....	147
Βιβλιογραφία.....	149

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για την ζωτική υποστήριξη υλική και ηθική καθώς και συμπαράσταση για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ το ΙΚΥ (Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών) για την χορήγηση υποτροφίας για την διεξαγωγή μεταπτυχιακών σπουδών στην ειδικότητα της Γεωπληροφορικής. Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον καθηγητή και επιβλέποντα αυτής της εργασίας κ. Τίμο Σελλή.

Πρόλογος

Ένας αριθμός τάσεων και τεχνολογικών εξελίξεων επιτείνουν την σύγκλιση των τεχνολογικών κλάδων της υπολογιστικής τεχνολογίας και της τεχνολογίας των συστημάτων που ολοένα και περισσότερο επηρεάζουν την επιστήμη της Γεωπληροφορικής με καινοτόμα υποδείγματα επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών. Στο πλαίσιο αυτό ιδιαίτερα κρίσιμες τεχνολογίες είναι οι εξής:

- η ενσωματωμένη τεχνολογία,
- τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών,
- η τεχνολογία των αισθητήρων.

Οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν τεχνουργήματα που οργανωμένα σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνούντων αισθητηριακών στοιχείων καθιστούν εφικτή την αδιάλειπτη σύζευξη σε γεωγραφική κλίμακα της φυσικότητας αντικειμένων, φαινομένων, συμβάντων με τα υπολογιστικά συστήματα.

Η συστημική αυτή ολοκλήρωση γνωστή ως *δίκτυα αισθητήρων ή δίκτυα γεωαισθητήρων* (το δεύτερο τονίζει την σύζευξη γεωγραφικών καταστάσεων δηλ. καταστάσεων με χωρική αναφορά) παρέχει ιδιαίτερα σύνολα δεδομένων και πληροφοριών, αυξημένης χωροχρονικής ανάλυσης στα όρια πραγματικού χρόνου και ωθεί όλο και περισσότερες καταστάσεις και συμβάντα που αφορούν την γεωγραφική πραγματικότητα σε συστήματα επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών. Αλλά ωστόσο ενέχει και πολλές νέες ερευνητικές προκλήσεις. Τα δομικά στοιχεία που παρέχουν εκτεταμένες ανιχνευτικές, αντιδραστικές, εποπτικές, ελεγκτικές και άλλες δυνατότητες, που αφορούν αντικείμενα, φαινόμενα, συμβάντα και καταστάσεις στο γεωγραφικό χώρο απαιτούν ιδιαίτερο λογισμικό (δικτυακά πρωτόκολλα, τεχνολογίες βάσεων δεδομένων, εξειδικευμένη διαχείριση χωρικής πληροφορίας κ.α.) για να επιτύχουν το σκοπό τους.

Πάνω σε αυτό το πλαίσιο η μεταπτυχιακή αυτή εργασία αρχικά ξεκινάει με τη θεώρηση του υποδείγματος το οποίο απλά τοποθετεί τις προκείμενες τεχνολογικές τάσεις στο φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας –συλλογή, αποθήκευση-διαχείριση, ανάλυση και απόδοση χωρικών δεδομένων– και φιλοσοφεί επί τούτου.

Στη συνέχεια η εργασία καταπιάνεται ουσιαστικά με τα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων στοχεύοντας στη διερεύνηση της υπολογιστικής τεχνολογίας που εφαρμόζεται στα συστήματα αυτά, εστιάζοντας ειδικά σε επεξεργασίες χωρικής πληροφορίας. Τα δίκτυα γεωαισθητήρων αποτελούν επικοινωνούντα σύνολα ανιχνευτικών/μετρητικών στοιχείων τα οποία εγκαθίστανται σε διάφορα σημεία του χώρου για να ανιχνεύουν ή/και να μετρούν περιγραφικά χαρακτηριστικά καταστάσεων, αντικειμένων, φαινομένων, γεγονότων και συμβάντων της γεωγραφικής πραγματικότητας, δηλ. αποτελούν *de facto* συστήματα συλλογής χωρικών δεδομένων. Περαιτέρω οι πληροφορίες των κόμβων δύναται να υφίστανται κατάλληλες επεξεργασίες για παραγωγή νέων πληροφοριών, επεξεργασία χωρικών ερωτημάτων κ.κ.

Στα δίκτυα γεωαισθητήρων όπως και ουσιαστικά σε όλα τα καταναμημένα συστήματα ακολουθείται η αποκεντρωμένη προσέγγιση στην επεξεργασία των πληροφοριών. Τα δεδομένα που συλλέγονται δεν εξωθούνται προς έναν απομακρυσμένο κόμβο για να υποστούν εκεί τις απαραίτητες επεξεργασίες αλλά υφίστανται κατάλληλες συνεργατικές επεξεργασίες εντός των κόμβων του δικτύου και κατά το δυνατόν αυτόνομα από κάθε κόμβο. Δηλ. το υπολογιστικό έργο ανατίθεται στο σύνολο των κόμβων του δικτύου παρά σε έναν μεμονωμένο κόμβο.

Στο πλαίσιο της αποκεντρωμένης προσέγγισης όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το ενδιαφέρον της εργασίας στρέφεται προς θεμελιώδεις επεξεργασίες που αφορούν την χωρική πληροφορία.

Διάρθρωση εργασίας

Στο 1^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεώρηση ενός υποδείγματος επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας βάση των επικείμενων τεχνολογικών εξελίξεων.

Στο 2^ο Κεφάλαιο επιχειρείται μια ενδελεχής εισαγωγή στα συστήματα δικτύων γεωασθητήρων παρουσιάζοντας μεταξύ άλλων και ένα σύνολο ερευνητικών προκλήσεων που υφίστανται και ενδιαφέρουν ιδιαίτερα την Γεωπληροφορική.

Στα επόμενα κεφάλαια επιχειρείται γενικώς η διερεύνηση της υπολογιστικής τεχνολογίας μέσω μιας «μυσταγωγίας» στο χώρο θεμελιωδών αλγορίθμων επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας για τα συστήματα αυτά. Η διερεύνηση ξεκινάει στο 3^ο Κεφάλαιο με την παρουσίαση θεμάτων αναπαράστασης των πληροφοριών και μοντελοποίησης των δικτύων γεωασθητήρων, συνεχίζει στο 4^ο Κεφάλαιο με την παρουσίαση ενός υπολογιστικού μοντέλου για την ανάπτυξη διαδικασιών και καταλήγει με την παρουσίαση διαφόρων θεμελιωδών αλγορίθμων επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας σε δίκτυα γεωασθητήρων (5^ο, 6^ο και 7^ο Κεφάλαιο).

Το υπολογιστικό μοντέλο που περιγράφεται στο 4^ο Κεφάλαιο αξιοποιείται για την περιγραφή των αλγορίθμων στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης μπορεί να αξιοποιείται γενικώς για την ανάπτυξη αλγοριθμικών διαδικασιών (καθορισμό πρωτοκόλλων) για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν είτε την επεξεργασία χωροχρονικών ερωτημάτων είτε την υλοποίηση χωρικών τελεστών είτε οποιαδήποτε άλλη επίλυση προβλημάτων που ενέχει επεξεργασίες χωρικής πληροφορίας σε ένα δίκτυο.

Στα επόμενα τρία κεφάλαια (5^ο, 6^ο και 7^ο Κεφάλαιο) παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις επεξεργασίες χωρικής πληροφορίας για τα συστήματα αυτά, βάση μιας αφαιρετικής προσέγγισης. Συγκεκριμένα το 5^ο κεφάλαιο –«Αλγόριθμοι εν γνώσει γειτονιάς» είτε χάριν απλότητας «Αλγόριθμοι γειτονιάς»– προχωρεί στην παρουσίαση αλγορίθμων, θεωρώντας δεδομένη μια απλή τοπολογία δικτύου γεωασθητήρων με τις ανιχνευόμενες τιμές και τις συνδεσιμότητες των κόμβων δίχως πληροφορίες χωρικών θέσεων των στοιχείων του δικτύου, μήτε θεωρώντας υποκείμενες αλλαγές που να αφορούν το περιβάλλον ανίχνευσης είτε το ίδιο το σύστημα. Ωστόσο αυτή η απλή δομή επαρκεί για το σχεδιασμό θεμελιωδών διαδικασιών επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας. Συγκεκριμένα επαρκεί για την ανάπτυξη κοινότυπων σε ασύρματα δίκτυα αλλά βασικών διεργασιών όπως διάχυση, και δρομολόγηση πληροφορίας, κατασκευή a posteriori τοπολογιών συνδεσιμότητας, εκλογή κόμβων ηγετών αλλά και για διεργασίες που αφορούν ειδικά την χωρική πληροφορία όπως ποιοτικές επεξεργασίες χωρικής ανάλυσης. Για αυτές τις διαδικασίες παρουσιάζονται αντίστοιχα πρωτόκολλα.

Στην συνέχεια στο επόμενο κεφάλαιο –«Αλγόριθμοι εν γνώσει θέσης» είτε χάριν απλότητας «Αλγόριθμοι θέσης»-(6^ο Κεφάλαιο) επεκτείνοντας ένα βήμα παραπέρα το μοντέλο, συγκεκριμένα θεωρώντας δεδομένη τη θέση του κάθε κόμβου στο δίκτυο, παρουσιάζονται πρωτόκολλα που αξιοποιούν χωρικές συντεταγμένες είτε άλλες χρήσιμες παράγωγες μορφές πληροφορίας χωρικής θέσης. Στο πλαίσιο αυτό όπως είναι αναμενόμενο μπορούν να αναπτυχθούν πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται αλγόριθμοι για την κατασκευή επίπεδων τοπολογιών συνδεσιμότητας δικτύου ένα σημαντικό προαπαιτούμενο για την ανάπτυξη αποδοτικών διαδικασιών επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών, ένας αλγόριθμος γεωγραφικής δρομολόγησης (δρομολόγηση πληροφοριών σε κόμβο δικτύου γνωστών

συντεταγμένων), καθώς και αποκεντρωμένες διαδικασίες για τον υπολογισμό εμβαδού και κεντροειδούς περιοχής και περαιτέρω γίνεται νύξη και για πιο σύνθετους αλγορίθμους.

Η μυσταγωγία στον χώρο των θεμελιωδών αλγορίθμων επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας σε δίκτυα αισθητήρων ουσιαστικά ολοκληρώνεται στο επόμενο κεφάλαιο (7^ο Κεφάλαιο), όπου στο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη υποκείμενες αλλαγές στο περιβάλλον ανίχνευσης αλλά και στο σύστημα. Εξάλλου τα δίκτυα αισθητήρων είναι η κατάλληλη τεχνολογία για εφαρμογή σε δυναμικές καταστάσεις. Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται πρωτόκολλα για την ιχνηλάτηση ορίου ανιχνευόμενης περιοχής, την ιχνηλάτηση κινητών αντικειμένων, την ανίχνευση προτύπων κίνησης κινούμενων κόμβων, την ανίχνευση κορυφών-βυθισμάτων του περιβάλλοντος ανίχνευσης και για την ανίχνευση τοπολογικών αλλαγών περιοχών.

Τέλος η εργασία κλείνει στο 8^ο κεφάλαιο με διάφορα ενδιαφέροντα θέματα καθώς και τα τελικά συμπεράσματα από την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Συγκεκριμένα τα θέματα στα οποία γίνεται νύξη στο 8^ο Κεφάλαιο αφορούν την προσομοίωση, τα μοντέλα διαχείρισης δεδομένων και την οπτικοποίηση δεδομένων δικτύων αισθητήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η λειτουργία της γεωπληροφορίας ενταγμένη ανάμεσα στα άκρα αισθητηριακών και αντιδραστικών στοιχείων

«Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου σε γεωγραφική κλίμακα;»

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τη θεώρηση ενός υποδείγματος επεξεργασίας στο φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας –συλλογή, αποθήκευση-διαχείριση, ανάλυση και απόδοση γεωγραφικών δεδομένων- το οποίο επιτείνεται από τις τεχνολογικές εξελίξεις στην πληροφορική και τα συστήματα. Συγκεκριμένα, τεχνουργήματα ενσωματωμένης τεχνολογίας, αισθητήρων και ασύρματης τεχνολογίας καθιστούν εφικτή την αδιάλειπτη σύζευξη της φυσικότητας αντικειμένων, φαινομένων, συμβάντων του γεωγραφικού χώρου με τα υπολογιστικά συστήματα. Τέτοιου είδους δομικά στοιχεία, όταν περαιτέρω οργανώνονται καταλλήλως σε δίκτυα επικοινωνούντων στοιχείων παρέχουν μια συστημική ολοκλήρωση με εκτεταμένες ανιχνευτικές, αντιδραστικές, εποπτικές, ελεγκτικές και άλλες δυνατότητες που αφορούν αντικείμενα, φαινόμενα, συμβάντα και καταστάσεις στο γεωγραφικό χώρο. Αναδυόμενα δίκτυα αισθητηριακών και αντιδραστικών στοιχείων έντονα συζευγμένα με καταστάσεις φυσικότητας του χώρου οδηγούν σε εικονικοποίηση όλο και περισσότερων καταστάσεων και συμβάντων που αφορούν την γεωγραφική πραγματικότητα. Αυτή η συστημική ολοκλήρωση επιτάσσει πολλές νέες ευκαιρίες και δυνατότητες για τη δημιουργία εφαρμογών, αλλά και πολλές νέες ερευνητικές προκλήσεις σε διάφορα θέματα που υπεισέρχονται.

1.1 Η θεώρηση ενός υποδείγματος επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας βάση τεχνολογικών εξελίξεων

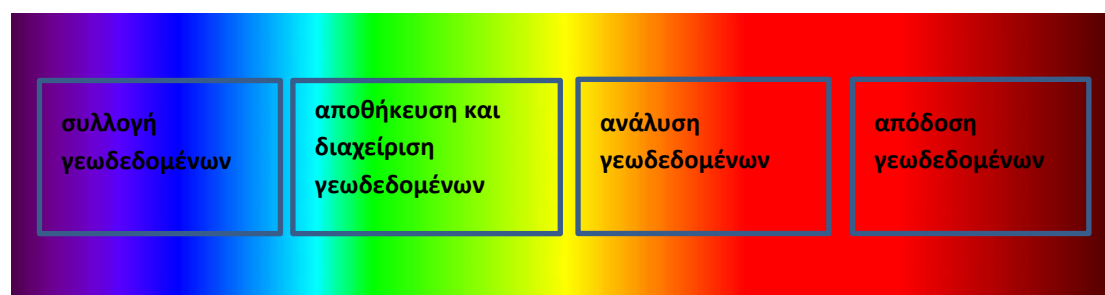
Η λειτουργία της γεωπληροφορίας - οι τρόποι που αυτή γίνεται διαθέσιμη, υφίσταται επεξεργασίες και αξιοποιείται - επηρεάζεται από τις ραγδαίως εξελισσόμενες τεχνολογίες πληροφορικής και συστημάτων και τις εφαρμογές που διαμορφώνονται βάση αυτών των νέων τεχνολογιών. Πάνω στο τεχνολογικό πλαίσιο των δυνατοτήτων οι επιπτώσεις που επιτάσσονται στο φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας αρχίζουν να πραγματώνονται από οραματισμούς σε ερευνητικές εργασίες και εν κατακλείδι να γίνονται πράξη στην επίλυση προβλημάτων με την ανάπτυξη εφαρμογών. Δίχως να μπορεί κανείς να προβλέψει τι ακριβώς πρόκειται να συμβεί στις επόμενες δεκαετίες μπορεί να ξεχωρίσει μέσα από τις έρευνες, ορισμένες τεχνολογικές τάσεις που έχουν ιδιαίτερα, καινοτόμο αντίκτυπο, διευρύνοντας όλο και περισσότερο τις δυνατότητες και εφαρμογές της γεωπληροφορίας:

Κατά την τελευταία δεκαετία, όλες αυτές οι τεχνολογικές τάσεις μπορούν να συνοψιστούν καθολικώς, στο υπόδειγμα ενός συνόλου πανταχού παρόντων ενσωματωμένης τεχνολογίας υπολογιστικών μονάδων με «αισθητηριακή αντίληψη» (ανιχνευτική ή/και μετρητική ικανότητα) της φυσικότητας – καταστάσεων αντικειμένων, συμβάντων, και φαινομένων - φυσικών και τεχνουργημάτων του γεωγραφικού χώρου, με ικανότητα ασύρματης επικοινωνιακής διασύνδεσης, κινητικότητας, φορητότητας και με διασυνδέσεις πολυτροπικής απόδοσης (πολυτροπικές διεπαφές) καθώς και με δυνατότητα διασύνδεσης σε στοιχεία αντιδραστικής εξόρμησης (reactivity). (βλ. [1], [2], [3], [4]).

Η προηγούμενη διατυπωθείσα θέση χρήζει αναλυτικής επεξήγησης η οποία είναι ουσιώδης στα πλαίσια αυτής της εργασίας, εφόσον είναι ακριβώς το είδος των διαφόρων υποσυστημάτων που εκτοπίζει τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών σε χρήσεις και τρόπους εφαρμογής πέρα από τις συνηθισμένες. Η αναλυτική επεξήγηση μπορεί να αρχίσει με την περιγραφή των χαρακτηριστικών του παραπάνω υποδείγματος τα οποία είναι τα εξής:

α) Αδιάλειπτη σύζευξη από τη φυσικότητα προς τη φυσικότητα

Εντάσσοντας στο παραδοσιακό πλαίσιο λειτουργίας της γεωπληροφορίας – φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας - όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 την παραπάνω θέση και



Σχήμα 1.1 Το φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας

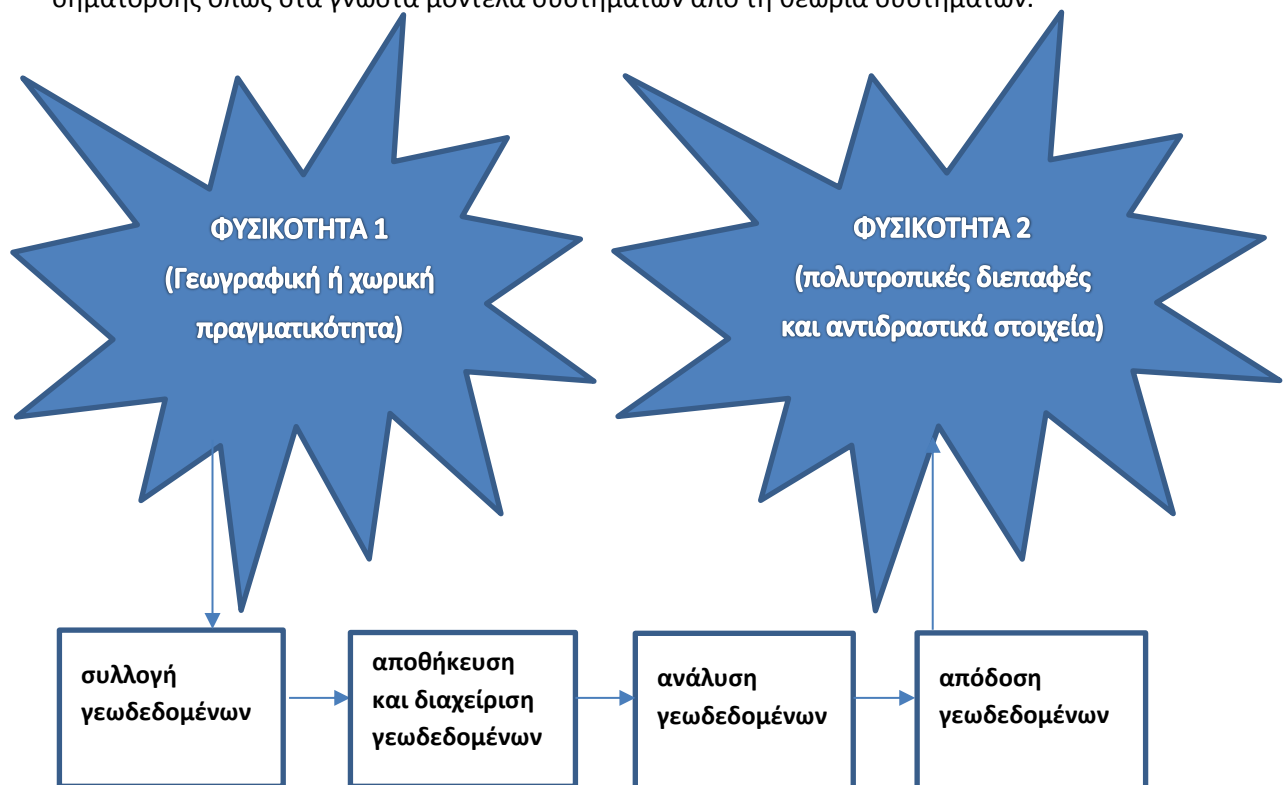
επιβάλλοντας τις υφιστάμενες τεχνολογίες σε συνεχή και αδιάλειπτη σύνδεση οδηγείται κανείς προς τη σύνθεση/ολοκλήρωση συστημάτων **‘συζευγμένων συνιστωσών’** κάθε μία από τις οποίες τελεί καθορισμένες εργασίες στο φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας όπως εκτείνεται συγκαταβατικά – από τη συλλογή γεωδεδομένων (data acquisition), την αποθήκευση-διαχείριση γεωδεδομένων, την ανάλυση γεωδεδομένων και την απόδοση.

Εάν και η έννοια της **απόδοσης** στο φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας παραδοσιακώς ορίζεται ως ο μετασχηματισμός της χωρικής πληροφορίας σε εύληπτη από τον άνθρωπο μορφή για την αποτελεσματικότητα της μετάδοσης αυτής (με το τελικό προϊόν της απόδοσης στην περίπτωση αυτή μιας χαρτογραφικής αναπαράστασης) στο προκείμενο υπόδειγμα η έννοια της απόδοσης επεκτείνεται σε δύο φάσεις για να συμπεριλάβει περαιτέρω χαρακτηριστικά: Σε πρώτη φάση η έννοια της απόδοσης επεκτείνεται για να συμπεριλάβει πέρα από την απλή εικονική διασύνδεση και την έννοια της **πολυτροπικής διεπαφής**. Η πολυτροπική διεπαφή αποτελεί μια γενικευμένη διεπαφή όπου μπορούν να ενυπάρχουν πέρα από το οπτικό και άλλα κανάλια αντίληψης (ήχος, ομιλία, αφή κλπ) [5]. Σε δεύτερη φάση η έννοια της απόδοσης επεκτείνεται για να συμπεριλάβει πέρα από την συμβατική έννοια και τη γενικευμένη έννοια (χάρτης και πολυτροπική διεπαφή) περαιτέρω και διαδικασίες που συντελούν στην **‘απόδοση δράσεων’** σε αντικείμενα με χωρική αναφορά τα οποία μπορεί να είναι πέρα από τον άνθρωπο και

μηχανές ή όποιου άλλου τύπου τεχνουργήματα. Η διασύνδεση αυτών στο σύστημα συντελείται μέσω ειδικών δραστικών στοιχείων προς τη φυσικότητα που είναι γνωστά στη θεωρία ελέγχου ως στοιχεία ενεργοποιητές ή αντιδραστικά στοιχεία¹ ή δραστικά στοιχεία (actuators) [6].

Τα αντιδραστικά στοιχεία αποτελούν κατάλληλα στοιχεία για διασύνδεση χωρικών επεξεργασιών προς μηχανές και άλλες εν γένει φυσικά μοντελοποιούμενες διαδικασίες. Περαιτέρω δίνοντας έμφαση στο υπόδειγμα επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας, τα αντιδραστικά στοιχεία αποτελούν στοιχεία που εν γένει αλλάζουν καταστάσεις που αφορούν χωρικά αντικείμενα, φαινόμενα και συμβάντα ή εν γένει μεταβάλλουν καταστάσεις φυσικότητας με χωρική αναφορά π.χ. η δράση ενός ελεγκτή αεροσκάφους ή οχήματος που μπορεί να προκαλεί την αλλαγή πορείας, οι δράσεις ενός ελεγκτή διασωστικού ρομπότ πυρόσβεσης για την πλοήγηση του ρομπότ, η ενεργοποίηση βαλβίδων σε ένα δίκτυο άρδευσης που προκαλεί το πότισμα μιας καλλιέργειας κ.α.. Αρκετές διατάξεις και τεχνουργήματα έχουν ανάγκη από χωρική «σκέψη» και χωρικούς υπολογισμούς. Οι υπολογισμοί αυτοί μπορεί να αφορούν απλές γεωμετρικές πράξεις, μέχρι σύνθετες πράξεις χωρικής και χωροχρονικής ανάλυσης.

Συνολικά, η θεώρηση εικονίζεται παραστατικά στο Σχήμα 1.2 όπου η σύζευξη (πραγματούσιμη με επικοινωνιακές διασυνδέσεις) των συνιστωσών παριστάνεται με βέλη σηματοροής όπως στα γνωστά μοντέλα συστημάτων από τη θεωρία συστημάτων.



Σχήμα 1.2 Υπόδειγμα επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας όπου φαίνεται η συνεχής-αδιάλειπτη σύνδεση «από τη φυσικότητα» (Φυσικότητα 1 – Γεωγραφική ή χωρική πραγματικότητα) «προς τη φυσικότητα» (Φυσικότητα 2 – Πολυτροπικές διεπαφές, αντιδραστικά/ενεργοποιητικά στοιχεία).

Στο σχήμα παριστάνεται η συνεχόμενη και αλληλένδετη ολοκλήρωση συστημικών συνιστωσών σε όλο το εύρος του φάσματος λειτουργίας της γεωπληροφορίας που ξεκινάει

¹ Θεωρώντας την διέγερση από την φυσικότητα στην είσοδο του συστήματος ως δράση, χρησιμοποιείται ο όρος *αντιδραστικό στοιχείο* για την απόκριση στην έξοδο του συστήματος προς τη φυσικότητα (είτε μέσω πολυτροπικής διεπαφής είτε μέσω κάποιας άλλης μορφής «αντιδραστικής» ενέργειας).

από την ανιχνευτική-μετρητική ικανότητα του υποσυστήματος της συλλογής γεωδομένων από τον φυσικό κόσμο, διέρχεται τη συνιστώσα της αποθήκευσης και της διαχείρισης που παρέχει είσοδο στην ανάλυση και φτάνει εν κατακλείδι στην απόδοση.

Η ιδιαιτερότητα του παραπάνω υποδείγματος είναι από τη μια η συνεχής και αδιάλειπτη σύνδεση της φυσικότητας χαρακτηριστικών οντοτήτων του χώρου (Φυσικότητα 1) με το υπολογιστικό σύστημα η οποία υλοποιείται με τους αισθητήρες και από την άλλη η εκτεταμένων δυνατοτήτων απόδοση προς τη φυσικότητα (Φυσικότητα 2) δηλ. προς πολυτροπικές διεπαφές και στοιχεία αντιδραστικής εξόρμησης (αντιδραστικά στοιχεία).

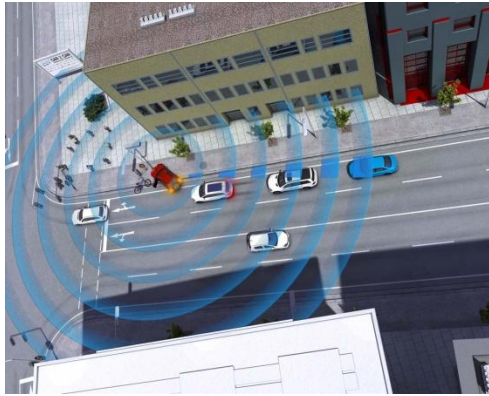
Ως φυσικότητα εν γένει παραπάνω νοείται το σύνολο των ανιχνευόμενων ή μετρήσιμων φυσικών χαρακτηριστικών αντικειμένων, συμβάντων, φαινομένων. Η φυσικότητα αφορά κάθε είδους μετρούμενο ή ανιχνευόμενο χαρακτηριστικό στο χώρο είτε φυσικής είτε τεχνικής προέλευσης. Δηλ. διόλου δεν υπονοούνται μόνο γεωφυσικές καταστάσεις, αλλά περιλαμβάνει κάθε είδους ανιχνεύσιμο φυσικό χαρακτηριστικό, όπως κίνηση στους δρόμους μιας πόλης, παρουσίες ανθρώπων σε ένα κτιριακό συγκρότημα κα. Μπορεί κανείς να την καλέσει και *γεωγραφική φυσικότητα* δίνοντας έμφαση στην χωρική αναφορά των χαρακτηριστικών (Σχήμα 1.3 και Σχήμα 1.4).

Ιδιότητες της φυσικότητας, όπως θόρυβος, κραδασμοί, δυναμικότητα και άλλα μεταφέρονται και αντιμετωπίζονται καταλλήλως από το υπολογιστικό σύστημα και μπορούν να αποτελούν πλέον περιγραφικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών οντοτήτων που λαμβάνονται υπ' όψιν.



Σχήμα 1.3 Γεωγραφική φυσικότητα ίσως και αφυσικότητα !

Καιγόμενο δάσος, Πετρελαιοκηλίδα, Μολυσμένο νερό, Ρομπότ πυρόσβεσης
(πηγή: <http://phys.org/news/2012-10-robot-firefighters-mitigate-hazardous-conditions.html>)



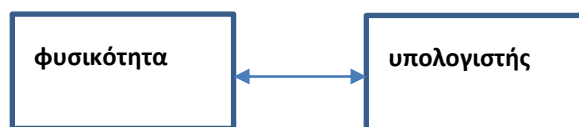
Σχήμα 1.4 Γεωγραφική φυσικότητα, Κυκλοφορία οχημάτων.

β) Σύζευξη δυναμικής της φυσικότητας - Δυναμικά συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας

Εκ των πραγμάτων τέτοιου είδους κατασκευές «αδιάλειπτης σύζευξης» καθιστούν δυνατή την υλοποίηση δυναμικών συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας, αφού η συνεχής και αδιάλειπτη σύνδεση προς τη φυσικότητα είναι ικανή και αναγκαία για μια προς τείνουσα αδιάλειπτη δειγματοληψία της δυναμικότητάς της. Τέτοιου είδους δομικά στοιχεία, παρέχουν μια συστημική ολοκλήρωση με εκτεταμένες ανιχνευτικές, αντιδραστικές, εποπτικές, ελεγκτικές και άλλες δυνατότητες, που αφορούν αντικείμενα, φαινόμενα, συμβάντα και καταστάσεις με χωρική αναφορά ειδικά όταν οργανώνονται σε δίκτυα επικοινωνούντων στοιχείων, όπως θα περιγραφεί και παρακάτω.

Από την όψη των δεδομένων από μία τέτοιου είδους διάταξη δύναται να παράγονται 'αισθητήρια ρεύματα γεωδεδομένων'- συνεχείς ροές πληροφορίας, αφού οι συζευγμένες αισθητήριες διατάξεις ως ανιχνευτικά και μετρητικά μέσα δύναται να εφοδιάζουν το σύστημα άμεσα με χωροχρονικές πλειάδες ή/και περαιτέρω εφαρμόζοντας κατάλληλες αλληλένδετες αναλυτικές διαδικασίες να παρέχουν και άλλες περισσότερο σύνθετες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο.

Η αποτελεσματική πραγμάτωση της σύνδεσης-σύζευξης της φυσικότητας σε υπολογιστικά μοντέλα επιτάσσει μια υβριδικού τύπου θεώρηση στην ανάπτυξη των συστημάτων και αποτελεί μια σύγχρονη τάση στην επιστήμη των υπολογιστών, ειδικά στην περιοχή της ενσωματωμένης υπολογιστικής όπως αναφέρεται στο [7], όπου προωθούνται πολλές δυναμικές εφαρμογές σύνδεσης φυσικότητας-υπολογιστή (Σχήμα 1.5).



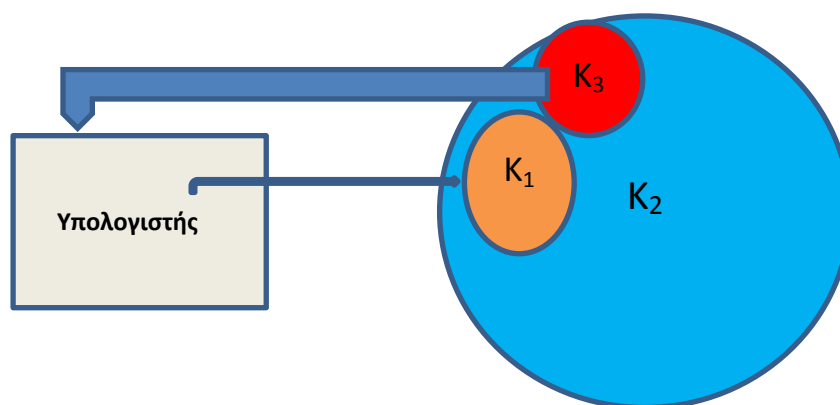
Σχήμα 1.5 Η σύζευξη της φυσικότητας με τον υπολογιστή προωθεί πολλές δυναμικές εφαρμογές

Ας αφήσουμε ξανά τη φυσικότητα να εννοηθεί ως ο γεωγραφικός χώρος (γεωγραφική φυσικότητα) με όλα τα αντικείμενα, τις μορφές και τα φαινόμενα που δύναται να περιλαμβάνει (είτε φυσικά είτε τεχνουργήματα). Η σύζευξη σε μικρή τοπική κλίμακα ως αδιάλειπτη σύνδεση έχει εφαρμοσθεί σε πλειάδα συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Και η

σύζευξη από τη φυσικότητα σε γεωγραφική κλίμακα, μπορεί να υλοποιηθεί με ανιχνευτικά-μετρητικά στοιχεία. Τέτοιου είδους στοιχεία είναι γνωστά στις γεωδαιτικές επιστήμες και γενικότερα στις γεωεπιστήμες ως συστήματα συλλογής γεωγραφικών δεδομένων. Αλλά οι δυνατότητες επαυξάνεται περαιτέρω από το χαρακτηριστικό της Δικτύωσης.

Αισθητήρια και Αντιδραστικά στοιχεία

Η διασύνδεση προς τη φυσικότητα K_2 , υλοποιείται με στοιχεία των οποίων η κατάσταση K_1 επηρεάζεται από τον υπολογιστή και τα οποία περαιτέρω επηρεάζουν την κατάσταση της φυσικότητας K_2 . Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται *αντιδραστικά/ενεργοποιητικά στοιχεία*. Και με στοιχεία K_3 των οποίων η κατάσταση επηρεάζεται από την κατάσταση K_2 της φυσικότητας. Αυτού του τύπου τα στοιχεία ονομάζονται *αισθητήρια*. Αυτές οι αλληλεξαρτήσεις εικονίζονται παραστατικά στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 Υπολογιστής, Φυσικότητα K_2 , αισθητηριακά K_3 , αντιδραστικά στοιχεία K_1

γ) Δικτύωση

Τα αρχέτυπα δομικά «αισθητηριακά» στοιχεία μπορούν περαιτέρω να οργανώνονται καταλλήλως σε δίκτυα επικοινωνούντων στοιχείων παρέχοντας μια συστημική ολοκλήρωση με εκτεταμένες ανιχνευτικές, αντιδραστικές, εποπτικές, ελεγκτικές και άλλες δυνατότητες, που αφορούν αντικείμενα, φαινόμενα, συμβάντα και καταστάσεις στο γεωγραφικό χώρο.

Αναδυόμενα δίκτυα -αισθητηριακών και αντιδραστικών στοιχείων- άμεσα συζευγμένα με καταστάσεις φυσικότητας του χώρου οδηγούν σε εικονικοποίηση όλο και περισσότερων καταστάσεων και συμβάντων που αφορούν την γεωγραφική πραγματικότητα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το συστατικό της ασύρματης επικοινωνίας που παρέχεται από την ενσωματωμένη τεχνολογία το οποίο πλεονεκτεί εν σχέση με την καλωδιωμένη επικοινωνία παρέχοντας δυνατότητες ελεύθερης μετακίνησης και εγκατάστασης. Τέτοιου είδους συστήματα θα εξεταστούν στα επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας.

δ) Φορητότητα και κινητικότητα

Περαιτέρω η ιδιότητα της φορητότητας και της κινητικότητας ανοίγει νέες ευκαιρίες καθώς τα στοιχεία δύναται με εύκολο τρόπο να φέρονται και να μετακινούνται από ανθρώπους, οχήματα ή άλλες κινούμενες κατασκευές, να εγκαθίστανται σε μη συνηθισμένους χώρους κοκ.

Όλα τα παραπάνω συνθέτουν μια συστημική ολοκλήρωση που επιτάσσει πολλές νέες ευκαιρίες και δυνατότητες για τη δημιουργία εφαρμογών αλλά και πολλές νέες ερευνητικές προκλήσεις στα διάφορα θέματα που υπεισέρχονται στο φάσμα λειτουργίας της γεωπληροφορίας.

Ακολούθως, για την κατανόηση των παραπάνω θα παρουσιαστούν και ορισμένα υποδείγματα εφαρμογών που μπορούν να ενταχθούν στο εν λόγω υπόδειγμα.

Συστήματα δικτύων (γεω)αισθητήρων

Ένα δίκτυο αισθητήρων είναι μία υποδομή που αποτελείται από αισθητήρια στοιχεία, καθώς και αντιδραστικά στοιχεία και κάθε αισθητήρας είναι επιφορτισμένος με την ανίχνευση μιας μεταβλητής ενός δυναμικού φαινομένου στο σημείο που βρίσκεται εγκατεστημένος [8]. Παραδείγματα μεταβλητών δυναμικών φαινομένων αποτελούν η θερμοκρασία, η πίεση, η ταχύτητα του ανέμου, η μόλυνση κ.α.. Μέσω ενός δικτύου αισθητήρων μπορούν να ανιχνεύονται και να μετρούνται τέτοιου είδους μεταβλητές για ένα σύνολο σημείων του χώρου και με κατάλληλες επεξεργασίες της χωρικής πληροφορίας να εξάγονται άλλες πληροφορίες οι οποίες περαιτέρω δύναται να αξιοποιείται για εκπλήρωση πληροφοριακών αναγκών ανθρώπων και συστημάτων.

Μια διαδικασία μπορεί να νοείται από ένα σύνολο σημείων στο χώρο με τις χαρακτηριστικές της ιδιότητες. Οι καταστάσεις που ανιχνεύονται μπορεί να είναι γεωφυσικά φαινόμενα καθώς και άλλες μεμονωμένες καταστάσεις. Τέτοιου είδους συστήματα περιγράφονται αναλυτικότερα στο 2ο Κεφάλαιο.

Τα ανιχνευτικά-μετρητικά στοιχεία είναι γνωστά ως αισθητήρες και στην προκειμένη περίπτωση 'γεωσύζευξης' καλούνται *γεωαισθητήρες*.

Context Aware κινητά συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών

Πρόκειται πραγματικά για συστήματα τα οποία επιδιώκεται να κατέχουν όσο το δυνατόν περισσότερη γνώση για το πλαίσιο που εφαρμόζονται, ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στις πληροφοριακές-διαδραστικές ανάγκες του εν κινήσει εβρισκόμενου χρήστη [9]. Ζωτικής σημασίας για την υλοποίηση τέτοιου είδους συστημάτων και σε σχέση με την εφαρμογή τους σε καταστάσεις που αφορούν χωρικές πληροφορίες η υποδομή ενός συνόλου 'αισθητηριακών στοιχείων' εγκατεστημένων καταλλήλως που θα παρέχουν εν πρωτίστως αρχέτυπες πληροφορίες προς αξιοποίηση είναι απαραίτητη. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται οι γνωστές εφαρμογές LBS (Location based Services) όπου αξιοποιείται η διαθέσιμη πληροφορία της θέσης που παρέχεται στα συστήματα μέσω αισθητήρα σήματος GPS [1]. Η πληροφορία της θέσης μαζί με άλλες πληροφορίες υφίσταται επεξεργασίες που μπορεί να οδηγούν περαιτέρω σε σημασιολογική επαύξηση της χωρικής πληροφορίας π.χ. ο χρήστης βρίσκεται στη θέση (λ, φ) που είναι μια θέση μέσα στο κέντρο της πόλης, σε περιοχή χαμηλής εγκληματικότητας, κεντραρισμένος γύρω από διάφορα αξιόλογα αξιοθέατα ή να οδηγούν σε παραγωγές άλλων πληροφοριών κοκ.

Για την δόμηση τέτοιου είδους συστημάτων που λειτουργούν εν κινήσει ο χρήστης καθώς κινείται βρίσκεται δυναμικά συζευγμένος, σαν μέρος ενός δυναμικού συστήματος και υποστηρικτικά ανιχνευόμενα σήματα από παρακείμενους αισθητήρες παρέχουν

πληροφορίες ζωτικής σημασίας για να επαυξάνουν σημασιολογικά το πλαίσιο εφαρμογής ή να παράγουν άλλες γεωγραφικές πληροφορίες προς εκπλήρωση των πληροφοριακών αναγκών (βλ. [1] και [9]). Το σύνολο των αισθητήρων μπορεί να είναι εγκατεστημένο στην ίδια τη συσκευή αλλά και να είναι διασπαρμένο σε ποικίλα σημεία του χώρου (Context Awareness with Inertial Sensors) [9].

Συστήματα Γεωγραφικών πληροφοριών σε ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα σύνολο αισθητήρων καταλλήλως εγκατεστημένων στο χώρο μπορεί να παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο στην εξέλιξη του φαίνεται να εξαρτάται όλο και περισσότερο από συντελούμενες χωρικές διαδικασίες και να γίνεται όλο και πιο δυναμικό. Η δρομολόγηση των δεδομένων σε ένα ΣΓΠ θα λειτουργεί ως μία πηγή δεδομένων για την τροφοδότηση περαιτέρω χρονικά κρίσιμων εφαρμογών. Τα συστήματα αυτά είναι εν γέννη σημαντικά για την διαχείριση του δικτύου ενέργειας, την απόκριση σε απαιτήσεις ισχύος καθώς και την ασφαλή εργασία στις διάφορες γραμμές του δικτύου αλλά καθώς το δίκτυο ενέργειας γίνεται περισσότερο δυναμικό π.χ. ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν ενεργητικά κομμάτια του δικτύου που αλλάζουν συνεχώς θέση, ένα καταλλήλως εξελιγμένο γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών μπορεί να εκπληρώσει αυτού του είδους τις πραγματικού χρόνου απαιτήσεις. Εδώ απαιτούνται όμως νέες αρχιτεκτονικές ΣΓΠ, νέες τεχνολογίες βάσεων δεδομένων, τεχνολογίες αισθητήρων και ενεργοποιητών σε σύζευξη με τις βάσεις δεδομένων κοκ. ([10] και [11]).

Και στα τρία παραπάνω συστήματα υφίστανται τεχνολογίες που καθιστούν αδιάλειπτη τη σύζευξη των υπολογιστικών συστημάτων με έναν εν γένει δυναμικό φυσικό κόσμο μέσω των αισθητήρων, χρήση δικτύων επικοινωνιών και αξιοποίηση γεωγραφικών πληροφοριών και χωρικών υπολογισμών για τη ικανοποίηση πληροφοριακών αναγκών.

Παράλληλη υβριδική υπόσταση εικονικών και φυσικών πραγμάτων – Το Διαδίκτυο των γεωγραφικών πραγμάτων

Όπως μπορεί να φανταστεί κανείς η εφαρμογή των τεχνολογιών του υποδείγματος οδηγεί σε επαύξηση της εικονικότητας (virtuality) της γεωγραφικής πληροφορίας [12]. Δηλαδή όλο και περισσότερες πληροφορίες με χωρική αναφορά και λειτουργίες που τις αφορούν αποκτούν θέση υπόστασης σε υπολογιστικά συστήματα. Μια θέση υπολογιστικής διαχείρισης ενός συζευγμένου δυναμικού κόσμου. Ενός κόσμου, που με την εξέλιξη της τεχνολογίας, την επικύρωση και επαλήθευση των προϊόντων του, αναμένεται να εξωθηθεί και στον Κυβερνοχώρο. Νέου τύπου οντότητες - οντότητες με «παράλληλη υβριδική» υπόσταση (φυσική και εικονική) δημιουργούν το λεγόμενο καλούμενο *Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things)* ή διατείνοντας την έννοια σε *Διαδίκτυο των γεωγραφικών πραγμάτων* (αφού τα πράγματα κατέχουν έτσι και αλλιώς μια θέση στο χώρο) [13].

Αξίζει να αναφερθεί ότι υφίστανται περιπτώσεις όπου ένα μέρος των γεωγραφικών πραγμάτων που υφίστανται στα συστήματα ως «υβριδική υπόσταση» δηλ. είναι εικονικά και πραγματικά ταυτοχρόνως μπορεί 'καν να μην έχουν κυριολεκτική χειροπιαστή υπόσταση στην πραγματικότητα. Μοιάζει αντιφατικό αλλά εάν αναλογιστεί κανείς τις άυλες υποστάσεις πληροφορίας που καθοδηγούν συστήματα όπως εναέριες λεωφόροι οχημάτων, χωρικές σκέψεις ατόμων και έχουν τελικά πραγματική επιρροή στις χωρικές διαδικασίες του ιστού των γεωγραφικών αντικειμένων η αντίφαση φαίνεται να παραμερίζεται.

Μια διαφορετική υψηλότερου επιπέδου θεώρηση εν σχέση με το υπόδειγμα αποτελεί το όραμα της περιβάλλουσας χωρικής ευφυΐας (ambient spatial intelligence) [14] της ενσωμάτωσης στο χώρο - στο δομημένο και φυσικό περιβάλλον- της απαιτούμενης υπολογιστικής «ευφυΐας» ώστε να απαντώνται κάθε τύπου χωροχρονικά ερωτήματα. Η υπολογιστική χωρική ευφυΐα έχει και αυτή τις ρίζες της στο φαινόμενο του πανταχού παρόντα υπολογισμού [15] και το υπόδειγμα αυτού του κεφαλαίου σχετίζεται άμεσα με αυτήν.

Στο επόμενο κεφάλαιο ως μια εξειδίκευση στο προκείμενο υπόδειγμα η εργασία αυτή εστιάζει ουσιαστικά σε συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων

«Οτιδήποτε ανιχνεύεται στο χώρο μπορεί να συζευχτεί με ένα υπολογιστικό σύστημα.»

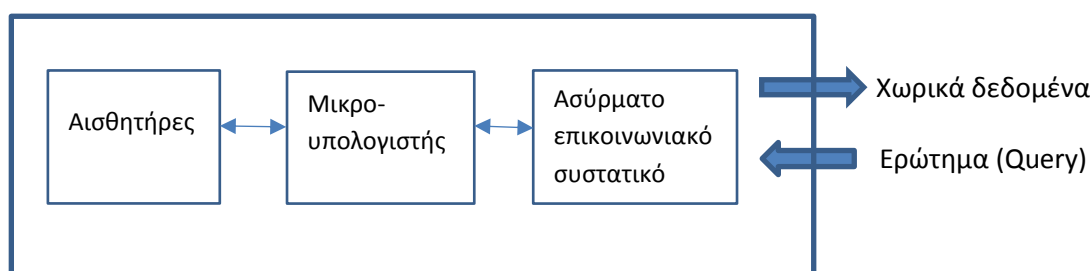
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων και οι διάφορες ερευνητικές προκλήσεις που αφορούν το επίπεδο του λογισμικού το οποίο ενδιαφέρει ιδιαίτερα την γεωπληροφορική.

Πρόκειται για συστήματα δικτύων που υλοποιούνται βάση ενός συνόλου γεωγραφικά κατανεμημένων σημειακών κόμβων μικροϋπολογιστικών μονάδων με αισθητηριακή αντίληψη (ανιχνευτική ή/και μετρητική ικανότητα) χωρικών χαρακτηριστικών φαινομένων, συμβάντων ή γεγονότων με δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους κατά το πλείστον ασύρματης για λόγους που θα αναφερθούν παρακάτω [2].

Κάθε κόμβος πραγματώνει άμεσα ένα σύστημα σημειακής συλλογής χωρικών δεδομένων καθώς εγκαθίσταται η «αισθητήρια» υπολογιστική μονάδα κάπου στο γεωγραφικό χώρο.

Το συνολικό πλήθος τέτοιου είδους στοιχείων που τοποθετούνται μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέχρι και χιλιάδες.

Η κάθε μονάδα του συστήματος έχει την δομή² που φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

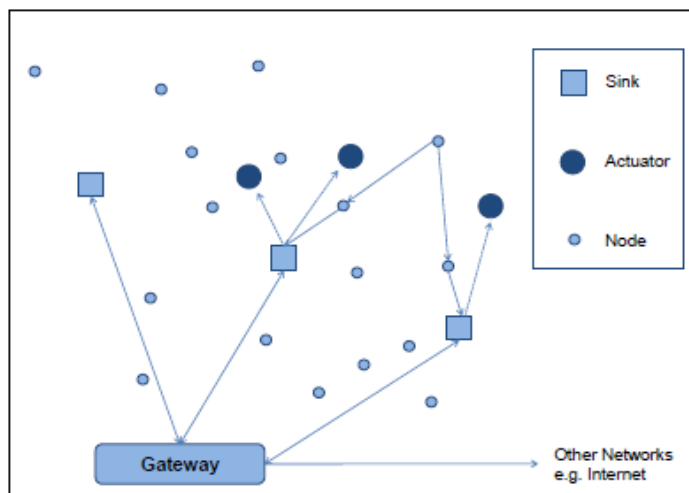


Σχήμα 2.1 Κομβική συνιστώσα δικτύου γεωαισθητήρων

Στο σύνολο των στοιχείων περαιτέρω μπορεί να υφίστανται επιπλέον και αντιδραστικά στοιχεία [16] μέσω των οποίων δύναται να ενεργοποιούνται διαδικασίες ή εν γένει να μεταβάλλονται φυσικές καταστάσεις.

² Μια τέτοιου είδους ολοκληρωμένη μονάδα στην βιβλιογραφία απαντάται και ως «ευφυής αισθητήρας» (smart sensor), δηλ. μια μονάδα ικανή να συλλέγει δεδομένα, να εκτελεί κώδικα και να επικοινωνεί με άλλες μονάδες.

Ένα τέτοιο σύνολο στοιχείων υλοποιεί ένα δίκτυο επικοινωνούντων στοιχείων λόγω της συνδεσιμότητας των στοιχείων που επιτελείται συνήθως από το ασύρματο επικοινωνιακό συστατικό. Το δίκτυο αυτό περαιτέρω μπορεί να διασυνδέεται και με άλλα δίκτυα όπως απομακρυσμένους κόμβους, Internet κοκ.. Όλα αυτά φαίνονται παραστατικά στο Σχήμα 2.2. και περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.



Σχήμα 2.2 Ένα τυπικό δίκτυο αισθητήρων όπου υφίστανται και αντιδραστικά/ενεργοποιητικά στοιχεία

2.1 Η τεχνολογία – Η ασύρματη επικοινωνιακή διασύνδεση, η ενσωματωμένη τεχνολογία και οι αισθητήρες

Σημαντικό χαρακτηριστικό των κομβικών συνιστωσών ενός συστήματος δικτύου γεωαισθητήρων αποτελεί η **δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας**. Οι γεωγραφικά κατανομημένοι κόμβοι μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους ή/και να επικοινωνούν με κάποιο κεντρικό σταθμό βάσης. Μέσω του συστήματος ασύρματης επικοινωνίας γίνεται εφικτή η πρόσβαση στα δεδομένα τα οποία συλλέγονται από τους αισθητήρες οι οποίοι μπορούν να έχουν εγκατασταθεί σε απομακρυσμένες ή/και σε δυσπρόσιτες μέχρι απρόσιτες ή/και επικίνδυνες περιοχές³. Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να μην υφίσταται καν στους τόπους εγκατάστασης ενσύρματη επικοινωνιακή διασύνδεση, είτε ηλεκτρική ενεργειακή γραμμή προς τροφοδότηση των διατάξεων. Οι αναιθέριοι κόμβοι⁴ (Untethered nodes) καθίστανται γενικώς κατάλληλοι και σε εφαρμογές όπου οι κόμβοι είναι κινητοί π.χ. όταν είναι προσαρτημένοι σε ανθρώπους, ζώα, ή ρομπότ είτε μεταφέρονται από τα νερά ή ρεύματα αέρα. Ακόμη και όταν οι κόμβοι είναι ακίνητοι, η δυνατότητα να εγκαθίστανται χωρίς να απαιτούνται πολύπλοκες ή ακριβές καλωδιώσεις είναι σημαντική ειδικά για την επίτευξη υψηλής λεπτομέρειας (όπου απαιτείται η

³ Παρακολούθηση ευαίσθητων, επικίνδυνων ή απομακρυσμένων περιοχών: Πολλές εφαρμογές είναι πολύ δαπανηρές, επικίνδυνες, ή λεπτές ώστε να ελέγχονται αποτελεσματικά με τη χρήση άλλων τεχνολογιών συλλογής δεδομένων που απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση ή λειτουργία.

⁴ *Untethered nodes*: κόμβοι για τους οποίους δεν υφίστανται εκ των πραγμάτων καλωδιώσεις είτε για σκοπούς επικοινωνίας είτε ενεργειακής τροφοδότησης.

εγκατάσταση πυκνού δικτύου κόμβων), για τηλεαυτοματοποίηση διαδικασιών συλλογής και ευέλικτα δίκτυα.

Έτσι για τους παραπάνω λόγους πλεονεκτεί η ασύρματη επικοινωνιακή διασύνδεση και η τεχνολογία τροφοδοσίας μέσω μπαταριών έναντι της συρμάτωσης.

Περαιτέρω η **ενσωματωμένη τεχνολογία** υπολογιστικών συστημάτων – παρέχει όλο και πιο μικρότερες, τείνοντας προς μικροσκοπικές «αόρατες» μονάδες με χαρακτηριστικά ιδιαίτερα χαμηλής κατανάλωσης [2]. Η τροφοδοσία των μονάδων γίνεται όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μέσω μπαταριών, χωρίς να αποκλείεται η χρήση πλακετών ηλιακών συλλεκτών όταν είναι δυνατόν (π.χ. μέσα στο νερό δεν είναι) κ.α.. Όμως προς το παρόν η απόκτηση ενέργειας από το περιβάλλον για παράδειγμα χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες ή θερμικούς μετατροπείς ή αξιοποίηση άλλων ενεργειακών πηγών (όπως δονήσεων ήχου) είναι απλά υποστηρικτική για τη μπαταρία [20]. Το επίπεδο της ενέργειας που μπορεί να αποκτηθεί σε τέτοιες περιπτώσεις είναι τάξεις μεγέθους κατώτερο από αυτό που παρέχεται από τις μπαταρίες.

Πέρα από τις τεχνολογίες της ασύρματης επικοινωνιακής διασύνδεσης και της αυτόνομης τροφοδοσίας το τρίτο και πιο σημαντικό συστατικό αυτών των συστημάτων αποτελούν οι **αισθητήρες**. Ως αισθητήρας νοείται ένα στοιχείο μετασχηματισμού που μετατρέπει διάφορες μορφές φυσικής ενέργειας σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και από εκεί σε δεδομένα κάποιου καταχωρητή [17]. Οι αισθητήρες δηλ. μετατρέπουν περιβαλλοντικές διεγέρσεις (environmental stimuli), όπως θερμοκρασία, φως ή εν γένει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ψηφιακά σήματα. Η κύρια τάση σήμερα στην κατασκευή αισθητήρων είναι η δημιουργία όσο το δυνατόν μικρότερων και «ευφυέστερων» αισθητήρων [17]. Όσο αναφορά το μέγεθος η σύγχρονη τεχνολογία περιλαμβάνει την εξέλιξη των παραδοσιακών διατάξεων σε αισθητώς μικρότερα μεγέθη και την τεχνολογία των *μικροαισθητήρων*⁵ - αισθητήρες πολύ μικρών διαστάσεων. Το ζήτημα 'ευφυΐα' αισθητήρα σχετίζεται με τις δομικές μονάδες που απαρτίζουν το «σύστημα αισθητήρα». Στο σύστημα αισθητήρα πέρα από την μονάδα του αισθητήρα δύναται να περιλαμβάνεται ένας προεπεξεργαστής σήματος (μετατροπέας) και μια κύρια μονάδα επεξεργασίας (μικροεπεξεργαστής). Ο προεπεξεργαστής σήματος συνήθως φέρει σε πέρας χαμηλού επιπέδου διεργασίες όπως ενίσχυση, φιλτράρισμα, μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα κ.α., ενώ η κύρια μονάδα επεξεργασίας μπορεί να τρέχει κώδικα βάση του οποίου παρέχονται στο σύστημα εξελιγμένες λειτουργίες [17].

Ένας ορισμός για τον «ευφυή» αισθητήρα που πρακτικά τις περισσότερες φορές αποτελεί μια συσκευασμένη ολοκληρωμένη μονάδα (αισθητήρας + μετατροπέας + μικροεπεξεργαστής) όπως προτάθηκε από τους Breckenbridge και Husson λαμβάνει υπόψη του και τη δουλειά που έχει γίνει στην τεχνική νοημοσύνη [17]:

«Ο αισθητήρας από μόνος του έχει μία λειτουργία επεξεργασίας δεδομένων όπως και μία λειτουργία αυτόματης βαθμονόμησης/αυτόματης αντιστάθμισης κατά την οποία ο αισθητήρας ανιχνεύει και εξαλείφει μη κανονικές ή ακραίες τιμές. Ενσωματώνει έναν αλγόριθμο, ο οποίος είναι δυνατόν να τροποποιηθεί και έχει συγκεκριμένο βαθμό λειτουργιών μνήμης. Πρόσθετα επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι ο αισθητήρας να είναι συζευγμένος με άλλους αισθητήρες, να προσαρμόζεται στις αλλαγές συνθηκών του περιβάλλοντος και να μπορεί να διακρίνει μεταξύ καταστάσεων».

⁵ Οι αισθητήρες και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται εξελίσσονται συνεχώς, ουσιαστικά με την ανάπτυξη τεχνολογιών πακεταρίσματος των ημιαγωγών. Τα συστατικά αυτών κυμαίνονται σε διαστάσεις μεταξύ 1 ως 10 μm (δηλαδή 0.001 ως 0.1 mm). Κατασκευάζονται από πυρίτιο, πολυμερή ή μέταλλα όπως χρυσό, τιτάνιο ή λευκόχρυσος. Οι μικροαισθητήρες χρησιμοποιούν τυποποιημένες διασυνδέσεις για την σύνδεση τους με τις υπολογιστικές συσκευές.

Βάση των παραπάνω τα συστήματα αισθητήρων που έχουν αναπτυχθεί και αναπτύσσονται περιλαμβάνουν ελαφριά, φορητά συστήματα, συστήματα 'μινιατούρες' (σε μέγεθος κόκκων άμμου δηλ. διαστάσεων 1 χιλιοστού), συστήματα που διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω ασύρματης επικοινωνίας κ.α.. Η εφαρμογή τέτοιου είδους στοιχείων σε ένα κομμάτι του γεωγραφικού χώρου μοιάζει σαν να ραντίζει κανείς τη γη με 'rixie dust'. Αυτό το τεχνολογικό φαινόμενο έχει γίνει γνωστό και ως *έξυπνη σκόνη* από ερευνητές του Μπέρκλεϋ [18]. Τέτοιου είδους προσπάθειες είναι μάλιστα σήμερα εμπορικά διαθέσιμες (βλ. εταιρεία *Dust Networks* [19]).

Γενικώς η τεχνολογία των αισθητήρων σήμερα βρίσκεται σε αρχικό στάδιο [2]. Το μέγεθος των αισθητηριακών κόμβων (αισθητήρας + υπολογιστικό σύστημα) σήμερα είναι του ενός κυβικού χιλιοστού και οι αισθητήρες έχουν το μέγεθος του 1 χιλιοστού του χιλιοστού. Η τεχνολογική ανάπτυξη των αισθητήρων έχει επηρεάσει και το υπόδειγμα της συλλογής των δεδομένων καθώς έχει μετασχηματίσει τις συσκευές των αισθητήρων από απλούς καταγραφείς δεδομένων (data loggers) σε 'ευφυείς-προσαρμοστικές' συσκευές. Η υπολογιστική τους ικανότητα παρέχει τη δυνατότητα τοπικού υπολογισμού (on board computing) π.χ. σε κάθε αισθητήριο κόμβο μπορούν να εκτελούνται τοπικά, αναλύσεις δεδομένων, φιλτραρίσματα, προσαρμοσμένη δειγματοληψία ανάλογα με τα γεγονότα που εμφανίζονται κ.α.. Και περαιτέρω το σύστημα των 'ευφύων' αισθητήρων, μπορεί να συνδέεται και στο Διαδίκτυο και να τροφοδοτεί με δεδομένα πραγματικού χρόνου απομακρυσμένες εφαρμογές [2].

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει διάφορους τύπους αισθητήρων κατηγοριοποιημένων με βάση τον τύπο της εισερχόμενης περιβαλλοντικής διέγερσης [20].

Πίνακας 2.1 Τύποι αισθητήρων βάση της εισερχόμενης περιβαλλοντικής διέγερσης [20]

Τύπος εισερχόμενης περιβαλλοντικής διέγερσης	Παραδείγματα αισθητήρων
Ακουστική	Οι ακουστικοί αισθητήρες ανιχνεύουν ήχους. <i>Παθητικοί ακουστικοί αισθητήρες</i> ανιχνεύουν τους "φυσικούς" ήχους του περιβάλλοντος και είναι οι εξής: μικρόφωνα, αισθητήρες υπερήχων, σεισμικοί αισθητήρες. <i>Ενεργητικοί ακουστικοί αισθητήρες</i> , όπως SONAR (sound navigation and ranging), εκπέμπουν ηχητική ενέργεια και ανιχνεύουν τα σήματα από την επιστροφή του περιβάλλοντος.
Χημική	Σήμερα οι περισσότεροι αισθητήρες για την ανίχνευση χημικών δεν είναι αποκλειστικά χημικοί παρά ανταποκρίνονται απλά σε μία από τις πέντε διεγέρσεις που παρουσιάζονται σε αυτόν τον πίνακα. Ωστόσο, νέοι τύποι αισθητήρων διεγείρονται άμεσα από χημικές ουσίες. Για παράδειγμα, ορισμένοι τύποι αισθητήρων που κατασκευάζονται για την ανίχνευση χημικών ανιχνεύουν άμεσα συγκεκριμένες χημικές αντιδράσεις με τη χρήση κατάλληλα κατασκευασμένων επιμεταλλωμένων μεμβρανών προσαρμοσμένων σε μικροσκοπικές εστίες.
Ηλεκτρομαγνητική	Οι ηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες περιλαμβάνουν τις παθητικές διατάξεις όπως: μαγνητικούς αισθητήρες, αισθητήρες ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και ενεργητικούς αισθητήρες όπως το RADAR (radio detection and ranging). Αμιγώς μαγνητικοί αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν αλλαγές ή διαταραχές σε μαγνητικά πεδία.
Οπτική	Οι οπτικοί αισθητήρες περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα ιδιαίτερα γνωστών αισθητήρων συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων ορατού φωτός -

Θερμική	ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές (συστοιχίες αισθητήρων φωτός) και τους αισθητήρες υπερύθρων. Λιγότερο γνωστοί οπτικοί αισθητήρες είναι οι αισθητήρες οπτικών διεγέρσεων στο εγγύς υπέρυθρο (NIR) π.χ. όπως ο αισθητήρας διοξειδίου του άνθρακα που μετρά την απορρόφηση CO ₂ .
Μηχανική	Οι θερμικοί αισθητήρες μετρούν τη θερμοκρασία ή κλίσεις θερμοκρασίας (gradients). Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ψηφιακών θερμικών αισθητήρων π.χ. το θερμίστορ είναι ένας τύπος ηλεκτρικού μεταβλητού αντιστάτη με μεταβλητή αντίσταση ανάλογη της θερμοκρασία περιβάλλοντος.
	Οι μηχανικοί αισθητήρες αποκρίνονται άμεσα σε μηχανικές δράσεις π.χ. πίεση, ροή, ή κίνηση. Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται τα επιταχυνσιόμετρα (accelerometers), τα αλτίμετρα (altimeters), τα ανεμόμετρα, βαρόμετρα και μια σειρά από διαφορετικούς τύπους μετρητών ροής (flow), καθώς και διάφοροι τύποι αισθητήρων υγρασίας (humidity).

2.2 Συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων, Γεωεπιστήμες και άλλα συστήματα συλλογής χωρικών δεδομένων

Τα τρία χαρακτηριστικά της τεχνολογίας - ασύρματη επικοινωνία, αυτόνομη τροφοδοσία και καινοτομικοί μικροαισθητήρες- σαν σύνολο έχουν επηρεάσει σημαντικά την τελευταία δεκαετία τις γεωεπιστήμες.

Για τις γεωεπιστήμες είναι διαθέσιμοι και βρίσκουν εφαρμογή σήμερα διάφοροι τύποι αισθητήρων όπως: θερμοκρασίας, υγρασίας αέρα (humidity), φωτός, ήχου ή δόνησης κ.α.[2].

Επιπλέον ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μικροχημικοί αισθητήρες, οι βιοχημικοί αισθητήρες και οι υψηλώς ευαίσθητοι αισθητήρες δονήσεων και ήχου [2]. Οι μικροχημικοί αισθητήρες βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο και μπορούν να ανιχνεύουν πολύ μικρές συγκεντρώσεις ορισμένων αερίων ή μιγμάτων αυτών όπως πτητικά οργανικά συμπλέγματα αλογόνων (π.χ. χλώριο, φθόριο) που βρίσκονται σε διαλύτες και ζιζανιοκτόνα. Σύντομα αναμένεται να είναι εμπορικά διαθέσιμοι. Η έρευνα στην περιοχή αυτή είναι ιδιαίτερα ενεργή. Οι βιοχημικοί μικροαισθητήρες είναι διαθέσιμοι και μπορούν να ανιχνεύουν μικρές συγκεντρώσεις σπόρων και βακτηρίων σε μικρά χωρικά τμήματα π.χ. χρήση σε νοσοκομεία, εργαστήρια κοκ.. Οι βιοχημικοί αισθητήρες εφαρμόζονται σε επιστήμες της θάλασσας (Ωκεανογραφία⁶), την παρακολούθηση της μόλυνσης του αέρα

⁶ Η Ωκεανογραφία είναι ένα σύγχρονο διεπιστημονικό πεδίο που στηρίζεται στις βασικές επιστήμες της Φυσικής, της Μηχανικής, της Βιολογίας, και της Χημείας για να μελετήσει τις φυσικές και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στους ωκεανούς και στο παράκτιο περιβάλλον. Χωρίζεται στους τομείς της Φυσικής Ωκεανογραφίας που μελετά τα κύματα, τις παλίρροιες, τα ρεύματα της θάλασσας, τη μετάδοση του ήχου, και την αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας και ωκεανού, της Βιολογικής Ωκεανογραφίας που μελετά τους έμβιους οργανισμούς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, της Χημικής Ωκεανογραφίας που μελετά τη χημική σύσταση της θάλασσας και τις επιπτώσεις των ρύπων στο ωκεάνιο σύστημα, και της Γεωλογικής Ωκεανογραφίας που μελετά τις γεωφυσικές διεργασίες, τη δομή, προέλευση και σύσταση του θαλάσσιου πυθμένα. Οι σπουδές της Ωκεανογραφίας καταρτίζουν σε θέματα επιχειρησιακής ωκεανογραφίας, θαλάσσιας βιολογίας και οικολογίας, ποιότητας θαλάσσιου περιβάλλοντος, διαχείρισης της παράκτιας ζώνης, αλιευτικής διαχείρισης, χημείας, υδροακουστικής τεχνολογίας και γεωλογίας, προσφέροντας ένα ολοκληρωμένο επιστημονικό υπόβαθρο στην πιο σύγχρονη και απαιτητική αγορά εργασίας. Η Ωκεανογραφία είναι μία απαιτητική, αλλά συναρπαστική

κ.α.. Τέλος οι υψηλά ευαίσθητοι αισθητήρες δονήσεων και ήχου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ηφαιστειών.

Στα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων υπάρχει η δυνατότητα συλλογής χωρικών δεδομένων σε ιδιαίτερα υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση [20]. Η αύξηση της πυκνότητας των αισθητήρων σε μια περιοχή οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της χωρικής ανάλυσης και περαιτέρω της ακρίβειας εκτίμησης των μεταβολών ενός χωρικού πεδίου. Η χρονική ανάλυση ενός συστήματος μπορεί να αγγίζει τα όρια πραγματικού χρόνου. Ταυτόχρονα παρέχεται επίσης η δυνατότητα λήψης πολλαπλών σημειακών παρατηρήσεων είτε από ίδιο ή διαφορετικό τύπο ενσωματωμένων αισθητήρων στον ίδιο κόμβο. Η δειγματοληψία και η διάθεση χωρικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων έχει επιφέρει στις γεωεπιστήμες την μοντελοποίηση δυναμικών χωρικών φαινομένων όπως: ατμοσφαιρική και θαλάσσια ρύπανση, ανάλυση κινούμενων ή κινητών αντικειμένων (π.χ. οχήματα στο οδικό δίκτυο μιας πόλης, ζώα σε κάποιο οικοσύστημα κ.ο.κ.).

Βέβαια για την αποτελεσματική εφαρμογή της τεχνολογίας των συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων απαιτείται η κτήση πρακτικής εμπειρίας και ο πειραματισμός [2]. Έτσι θα απαντηθούν ερωτήματα σχετικά με την καταλληλότητα της εφαρμογής συγκεκριμένου τύπου υλικού στα διάφορα φαινόμενα, θα αναγνωριστούν και θα επιλυθούν προβλήματα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των περιοχών εφαρμογής π.χ. εφαρμογή σε επικίνδυνες περιβαλλοντικές συνθήκες και θέματα σχετικά με την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος π.χ. σήμερα η τεχνολογία λόγω των περιορισμών των μπαταριών είναι περισσότερο αποτελεσματική για την ανίχνευση και παρακολούθηση χρονικά περιορισμένων συμβάντων (π.χ. σεισμικών δονήσεων) παρά για συνεχή παρακολούθηση.

Σε αντιπαράθεση με τις συμβατικές τεχνολογίες συλλογής χωρικών δεδομένων η διαθεσιμότητα των «μικροσκοπικών» συστημάτων (δικτύων γεωαισθητήρων) δεν πρόκειται μάλλον να αντικαταστήσει τα μεγάλα όργανα [20]. Εδώ ισχύει ότι, η εφαρμογή της κατάλληλης τεχνολογίας καθορίζεται από το φαινόμενο ή την κατάσταση για την οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Πολλές φορές ίσως να είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα πολλοί διαφορετικοί τύπων συστημάτων. Για παράδειγμα η τηλεπισκόπηση, η εναέρια φωτογραμμετρία και το LIDAR (Light Detection and Ranging)⁷ μπορεί να παρέχουν παρόμοια επίπεδα χωρικής ανάλυσης είτε και να τα υπερβαίνουν εν σχέση με τα δίκτυα γεωαισθητήρων, ωστόσο τα δίκτυα γεωαισθητήρων μπορούν να παρέχουν μοναδικές πηγές πληροφοριών σχετικά με το γεωγραφικό περιβάλλον. Οι δικτυωμένοι κόμβοι ενός δικτύου γεωαισθητήρων με τοπική-συνεργατική επεξεργασία των συλλεγόμενων δεδομένων με τους χωρικά εγγύς τους γείτονες δύναται να οδηγούν περαιτέρω στην ανίχνευση συμβάντων που στο παρελθόν αν και κατά κάποιον τρόπο εφικτό ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να ανιχνευτούν με τις συμβατικές τεχνολογίες συλλογής χωρικών δεδομένων. Επιπλέον παρότι η δορυφορική τηλεπισκόπηση σήμερα μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για

επιστήμη που ταξιδεύει στον μαγευτικό κόσμο της θάλασσας και των κατοίκων της, και επιτρέπει την ενεργή συνεισφορά στην προστασία του πλανήτη. Σπουδές με περιβαλλοντικό και οικονομικό αντίκτυπο: Η οικονομία μιας χώρας σαν την Ελλάδα, που διαθέτει 6000 νησιά και περισσότερα από 13000 χιλιόμετρα ακτογραμμής, εξαρτάται προφανώς από τις θαλάσσιες δραστηριότητες. Το ένα τρίτο του ελληνικού πληθυσμού κατοικεί στην παράκτια ζώνη και σε απόσταση μικρότερη των δύο χιλιομέτρων από την ακτή, ενώ ο τουρισμός και η ναυτιλία αποτελούν δύο βασικούς πυλώνες της οικονομίας μας. Η αλιεία είναι ένας επίσης σημαντικός τομέας που συντηρεί άμεσα ή έμμεσα δεκάδες χιλιάδες ανθρώπους, κυρίως στη νησιωτική χώρα. Υπό αυτές τις συνθήκες οι σπουδές στις Θαλάσσιες Επιστήμες αποκτούν ειδική βαρύτητα, και καλούνται να καλύψουν σύγχρονες ανάγκες για επιστημονικό δυναμικό με ολοκληρωμένη κατάρτιση σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος και βιώσιμης διαχείρισης των πόρων του.

(πηγή: ιστότοπος Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα επιστημών της θάλασσας, <http://www.mar.aegean.gr>)

⁷ Για εφαρμογή μεθόδων επίγειας τοπογραφίας δεν γίνεται λόγος, αφού αυτή είναι ιδιαίτερα δαπανηρή από πλευράς κόστους και χρόνου για να παρέχει δεδομένα υψηλής χωροχρονικής ανάλυσης.

την παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων (σχεδόν παγκόσμιας κάλυψης) και η εφαρμογή της τεχνολογίας συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων για την κάλυψη μεγάλων εκτάσεων υστερεί (σε επίπεδο χώρας σήμερα απέχει πολλά χρόνια μακριά), η τηλεπισκόπηση δεν μπορεί να προσφέρει ανάλογο επίπεδο λεπτομέρειας σε χρονική ανάλυση με ένα σύστημα δικτύου γεωαισθητήρων. Είναι τυπικά τεχνικά ανέφικτη είτε οικονομικά ασύμφορη η «συνεχής» παρακολούθηση αλλαγών σε ένα περιβάλλον με εφαρμογή μεθόδων Τηλεπισκόπησης [20]. Τέλος, η Τηλεπισκόπηση καθώς εφαρμόζεται στη συλλογή χωρικών δεδομένων από μακριά, δεν μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για περιβαλλοντικές διεγέρσεις όπως ακουστικά, χημικά, και μηχανικά ερεθίσματα που απαιτούν τους αισθητήρες σε φυσική εγγύτητα με τις διεγέρσεις. Αυτές οι διεγέρσεις δεν διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις εν αντιθέσει με τις οπτικές ή εν γένει ηλεκτρομαγνητικές και θερμικές διεγέρσεις.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τις άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες συλλογής χωρικών δεδομένων (συστήματα Τηλεπισκόπησης κοκ) με τα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων μπορεί κανείς να χαρακτηρίσει τα δεύτερα ως τεχνολογίες 'περιβαλλοντικά μικροσκόπια', δηλαδή διατάξεις που παρέχουν όψεις των περιβαλλοντικών διαδικασιών στη γη σε πρωτοφανή υψηλό επίπεδο χωροχρονικής ανάλυσης και κατά δεύτερον συμπληρώνουν αντί να υποκαθιστούν τις άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες συλλογής χωρικών δεδομένων [20] (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Τα δίκτυα Γεωαισθητήρων ως τεχνολογίες 'περιβαλλοντικά μικροσκόπια' συμπληρώνοντας αντί να υποκαθιστούν άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες συλλογής χωρικών δεδομένων [20].

2.3 Τρεις εφαρμογές συστημάτων δικτύων Γεωαισθητήρων

Στα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων μπορούν να διακριθούν δύο περιπτώσεις παρατήρησης:

- παρατήρηση βραχυπρόθεσμων συμβάντων,
- συνεχής παρατήρηση

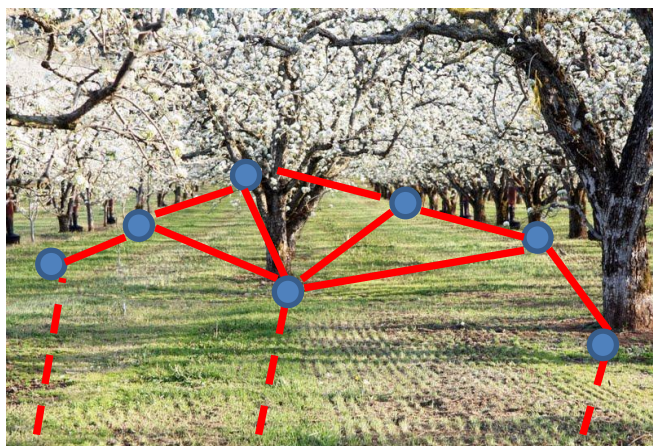
Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις εφαρμογών συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς αυτά τα χαρακτηριστικά παρατήρησης. Η πρώτη εφαρμογή αφορά ένα σύστημα οικολογικής παρατήρησης όπου συντελείται συνεχής παρατήρηση. Η δεύτερη εφαρμογή αφορά ένα δίκτυο γεωαισθητήρων όπου υφίσταται η ανάγκη ανίχνευσης βραχυπρόθεσμων συμβάντων σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η τρίτη εφαρμογή αφορά ένα κινητό δίκτυο όπου κινητοί 'αισθητηριακοί' κόμβοι εφαρμόζονται ως ένα σύστημα παρατήρησης θαλάσσιων υδάτων. Για τις εκάστοτε περιπτώσεις παρουσιάζονται τα αντίστοιχα σχήματα συλλεγόμενων δεδομένων.

2.3.1 Σύστημα δικτύου γεωαισθητήρων σε καλλιέργεια οπωρώνων.

Η εφαρμογή αυτή αφορά την τοποθέτηση και εγκατάσταση ενός δικτύου αισθητήρων σε καλλιέργεια οπωρώνων [21] (Σχήμα 2.4). Τα δεδομένα που συλλέγονται σε αυτήν την περίπτωση είναι συνεχούς ροής και είναι τα εξής:

ID	x	y	Υψόμετρο (h)	σχετική υγρασία αέρα	περιβάλλον φωτισμός	ηλιακή ακτινοβολία	βαρομετρική πίεση	βροχόπτωση
----	---	---	--------------	----------------------	---------------------	--------------------	-------------------	------------

ID	ταχύτητα ανέμου	κατεύθυνση ανέμου	υγρασία εδάφους βάθος 1	υγρασία εδάφους βάθος 2	υγρασία εδάφους βάθος 3
----	-----------------	-------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------



Σχήμα 2.4 Εφαρμογή συστήματος δικτύου γεωαισθητήρων σε καλλιέργεια οπωρώνων

Η υγρασία εδάφους (βάθος 1, 2, 3) μετράται σε 100 θέσεις κάθε 1 ώρα. Οι πληροφορίες καιρού σχετίζονται στενά με την άρδευση η οποία περαιτέρω σχετίζεται με την υγεία του οπωρώνων.

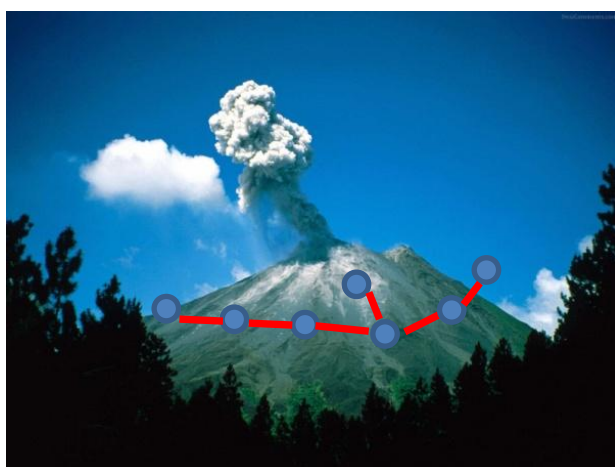
Η ανάλυση των δεδομένων μπορεί να δώσει διάφορες πληροφορίες για την περιοχή της δενδροστοιχίας όπως: μεταβλητότητα εδαφικής υγρασίας σε σχέση με την παραγωγικότητα σε καρπούς, την ανάγκη άρδευσης καθώς και να πυροδοτήσει δράσεις προς ενεργοποιητικά στοιχεία βαλβίδων άρδευσης (πυροδότηση αρδευτικού δικτύου βαλβίδων) κ.α..

2.3.2 Σύστημα δικτύου γεωαισθητήρων ανίχνευσης και μέτρησης συμβάντων δονήσεων ηφαιστείου

Η εφαρμογή αυτή αφορά την τοποθέτηση ενός συνόλου αισθητήρων σε ένα γραμμικό τμήμα περίπου 3 km γύρω από την περιοχή του ηφαιστείου [22] (Σχήμα 2.5). Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι της μορφής:

ID	x	y	Υψόμετρο (h)	Σεισμικά κύματα (f=100 Hz)
----	---	---	--------------	----------------------------

Το δίκτυο εδώ δεν αφορά συνεχή καταγραφή αλλά η καταγραφή εκκινείται βάση συμβάντων. Όταν γίνει η ανίχνευση ενός συμβάντος δόνησης πυροδοτείται η έναρξη της συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 2.5 Εφαρμογή συστήματος δικτύου γεωαισθητήρων σε περιοχή ηφαιστείου

2.3.3 Κινητό σύστημα δικτύου γεωαισθητήρων παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων θαλάσσιου ύδατος για την μελέτη της δυναμικής του πλαγκτόν⁸

Εδώ υφίσταται ένα υβριδικό σύστημα δικτύου γεωαισθητήρων που αποτελείται από ένα σύνολο σταθερών αισθητήρων προσαρμοσμένων σε σημαδούρες και 1 κινητός αισθητήρας προσαρμοσμένος σε ρομποτικό σκάφος [23] (Σχήμα 2.6). Το δίκτυο συλλέγει υψηλής ανάλυσης χωροχρονική πληροφορία διαφόρων περιβαλλοντικών παραμέτρων από τις σταθερές θέσεις και από διάφορες καθορισμένες θέσεις δειγματοληψίας μέσω του ρομπότ και ανάλογα με την δυναμική του φαινομένου. Η περιβαλλοντική πληροφορία και η πληροφορία συμβάντων που συλλέγεται από τους σταθερούς αισθητήρες χρησιμοποιείται επιπλέον σαν ανάδραση για την καθοδήγηση του ρομποτικού σκάφους και είναι της μορφής:

⁸ Με τον όρο Πλαγκτόν (Plankton) χαρακτηρίζεται γενικά το σύνολο έμβιων οργανισμών που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των ωκεανών, θαλασσών και λιμνών και που συνήθως μετακινούνται παρασυρόμενα από τα ρεύματα αυτών των υδάτων. Κάποιοι απ' αυτούς τους οργανισμούς μπορούν να κινηθούν με δικές τους δυνάμεις όχι όμως και τόσο ισχυρές ώστε να κινηθούν ενάντια στα υδάτινα ρεύματα (πηγή: <http://el.wikipedia.org/wiki/Πλαγκτόν>).

ID	x	y	Υψόμετρο (h)	t (χρόνος)	Περιβαλλοντική παράμετρος 1	Περιβαλλοντική παράμετρος 2
----	---	---	--------------	------------	-----------------------------	-----------------------------



Σχήμα 2.6 Υβριδικό σύστημα παρακολούθησης υδάτων

Από τη μέχρι στιγμής περιγραφή που έγινε μπορεί κανείς να συνάγει ότι τα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων έχουν τα εξής σημαντικά χαρακτηριστικά:

- **Αυξημένη χωροχρονική ανάλυση γεωδεδομένων:** Οι αισθητήρες δύναται να απέχουν μεταξύ τους από ορισμένα μέτρα μέχρι και χιλιοστά. Βάση του τελευταίου μπορεί να συλλέγεται χωρική πληροφορία σε υψηλή χωρική ανάλυση. Οι τεχνολογίες στην τηλεπισκόπηση μπορούν να παρέχουν συγκρίσιμα επίπεδα χωρικής ανάλυσης ωστόσο υστερούν σε χρονική ανάλυση καθώς και επισκιάζονται από διάφορους άλλους παράγοντες όπως καιρός, ορατότητα κοκ. Ένα δίκτυο γεωαισθητήρων μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να συλλέγει δεδομένα με συχνότητα της τάξης του μήνα, ημερών, ωρών, λεπτών, δευτερολέπτων ή ακόμα και μικρότερων χρονικών μονάδων. Έτσι παρέχει και χρονικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης σε συνδυασμό με τα υψηλής ανάλυσης χωρικά δεδομένα. Επιπλέον, το δίκτυο μπορεί να προσαρμόζει την χρονική και χωρική ανάλυση του καταλλήλως, ώστε να εστιάζει αποτελεσματικά, ανάλογα με τις αλλαγές του φαινομένου και τις ανάγκες παρακολούθησης.
- **Αυτοματοποιημένη λειτουργία:** μπορεί να εγκατασταθεί σε διάφορα απομακρυσμένα, δυσπρόσιτα, αλλά και επικίνδυνα περιβάλλοντα και να λειτουργεί αποτελεσματικά με αυτόματο τρόπο (πυροδότηση βάση εισερχόμενης περιβαλλοντικής διέγερσης, εκτέλεση κώδικα, ασύρματη επικοινωνία).
- **Ευλυγισία:** το δίκτυο αισθητήρων μπορεί με εύκολο τρόπο να προσαρμοστεί στις ανάγκες της εφαρμογής από την άποψη της κλίμακας κάλυψης, του προγραμματισμού και των αισθητηριακών ικανοτήτων.

Από τα παραπάνω γίνεται προφανής η διάθεση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ουσιαστικά, τα χαρακτηριστικά αυτά είναι που ξεχωρίζουν τους αισθητήρες από άλλες τεχνολογίες συλλογής χωρικών δεδομένων και είναι ακριβώς αυτά που έχουν φέρει νέες ερευνητικές προκλήσεις όσο αφορά την μοντελοποίηση, την παρακολούθηση και την ανίχνευση περιβαλλοντικών διαδικασιών.

2.4 Ερευνητικά θέματα συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων

2.4.1 Ερευνητικά θέματα που τίθενται σε επίπεδο υλικού

Στην ερευνητική περιοχή των γεωαισθητήρων υφίστανται ποικίλα προβλήματα σε επίπεδο υλικού όπως αυτά που αφορούν την ενσωματωμένη τεχνολογία π.χ. ανάπτυξη μικρότερων διαστάσεων υπολογιστικών κόμβων, βελτίωση της τεχνολογίας των μπαταριών, βελτίωση των μικροαισθητήρων, φιλικότητα των υλικών προς το περιβάλλον κ.α. [2]. Αυτά δεν ενδιαφέρουν άμεσα αυτήν την εργασία οπότε και δεν αναλύονται εκτενέστερα.

2.4.2 Ερευνητικά θέματα που τίθενται σε επίπεδο λογισμικού

Ορισμένες προκλήσεις που αφορούν το λογισμικό και ειδικά ενδιαφέρουν την γεωπληροφορική⁹ είναι οι εξής [2]:

- **Φιλικές προγραμματιστικές διεπαφές (APIs):** Για να μπορούν τα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων να χρησιμοποιούνται εύκολα από τους εκάστοτε ειδικούς ενός πεδίου οι οποίοι δεν έχουν ιδιαίτερες γνώσεις προγραμματισμού απαιτούνται στα συστήματα αυτά φιλικές προγραμματιστικές διεπαφές.
- **Αλγόριθμοι χωρικών υπολογισμών 'εντός δικτύου' (in-network):** Στα δίκτυα γεωαισθητήρων όπως και ουσιαστικά σε όλα τα καταναμημένα συστήματα ακολουθείται η αποκεντρωμένη προσέγγιση στην επεξεργασία των πληροφοριών. Τα δεδομένα που συλλέγονται δεν εξωθούνται προς έναν απομακρυσμένο κόμβο για να υποστούν εκεί τις απαραίτητες επεξεργασίες αλλά υφίστανται επεξεργασίες εντός των κόμβων του δικτύου και κατά το δυνατόν αυτόνομα από κάθε κόμβο. Στο πλαίσιο αυτό οι επεξεργασίες που αφορούν χωρικά δεδομένα αποτελούν διαδικασίες μιας 'αποκεντρωμένης προσέγγισης' χωρικών υπολογισμών ενόψει της συνήθους συγκεντρωμένης προσέγγισης χωρικής επεξεργασίας, όπως αυτή συντελείται στα παραδοσιακά ΣΓΠ. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορεί να αφορούν διαδικασίες χωρικής ανάλυσης, παρακολούθησης, χωρικής ιχνηλασίας (tracking) γεωγραφικών φαινομένων κ.α.. Όπως αναφέρθηκε και στον πρόλογο οι αλγόριθμοι αυτοί αποτελούν ουσιώδες τμήμα αυτής της εργασίας και θα

⁹ Οι παραπάνω αναφερόμενες ερευνητικές προκλήσεις αφορούν ιδιαίτερα τα χωρικά δεδομένα και την γεωπληροφορική, αφού τα δίκτυα γεωαισθητήρων σαν συστήματα άμεσης σύζευξης με το γεωγραφικό χώρο, συλλέγουν χωρική πληροφορία η οποία απαιτεί εξειδικευμένες επεξεργασίες χωρική ανάλυσης, χωρικά ερωτήματα κ.α. Το πεδίο της χωρικής επιστήμης έχει συσσωρεύσει μεγάλη γνώση τα τελευταία 40 χρόνια που αφορά μεθόδους χωρικής ανάλυσης φαινομένων. Τα μοντέλα όμως που παρέχονται με τους αντίστοιχους αλγόριθμους, αφορούν περιπτώσεις 'αραιής' εφαρμογής αισθητήρων και τη χρήση ισχυρών υπολογιστών. Η πρόκληση είναι να εφαρμοστεί αυτή η γνώση σε μια νέα κλίμακα αισθητήρων και φαινομένων. Εκεί οι αλγόριθμοι πρέπει να διαμορφωθούν καταλλήλως, έτσι ώστε, να μπορούν να εκτελεστούν σε πιο ελαφρά περιβάλλοντα και κατά μη συγκεντρωμένο τρόπο. Περαιτέρω σημαντικό για την γεωπληροφορική είναι η ενοποίηση δεδομένων από τα διάφορα είδη συστημάτων συλλογής γεωδεδομένων τα οποία μπορούν να κυμαίνονται από μικροσκοπικούς γεωαισθητήρες μέχρι όργανα μετρήσεων τηλεπισκόπησης. Αυτό περιλαμβάνει και την ενοποίηση δεδομένων αισθητήρων διαφορετικής χρονικής και χωρικής κλίμακας, το προγραμματισμό συνεργατικών τρόπων συλλογής, ανάλυσης και απόδοσης δεδομένων από τις διάφορες πλατφόρμες (π.χ. ένα μικρής κλίμακας δίκτυο γεωαισθητήρων να ανιχνεύει το συμβάν λ.χ. δονήσεων ενός ηφαιστείου και να πυροδοτεί μία πλατφόρμα τηλεπισκόπησης ή/και αντιθέτως κτλ).

παρουσιαστούν αναλυτικότερα ακολούθως σε αυτήν την ενότητα καθώς και σε όλα τα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

- **Υπόδειγμα διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων:** Για την αποτελεσματική και αποδοτική επεξεργασία και διαχείριση των ρευμάτων δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο απαιτείται η υιοθέτηση της διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων.
- **Ιστός Αισθητήρων:** Η συνεχόμενη εξάπλωση συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων θα απαιτήσει την ενοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται από τα συστήματα αυτά και την εξώθηση τους στον Κυβερνοχώρο. Έτσι έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία η δημιουργία του «Ιστού Αισθητήρων» (Sensor Web). Ο Ιστός Αισθητήρων πρέπει να καθιστά δυνατό τον διαμοιρασμό δεδομένων από πολλαπλές πηγές συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων καθώς και τη διαθεσιμότητα αυτών σε πραγματικό χρόνο για αξιοποίηση από διάφορες εφαρμογές.

Τα στοιχεία αυτά ενδιαφέρουν αυτήν την εργασία για αυτό το λόγο παρουσιάζονται περισσότερο αναλυτικά.

2.4.3 APIs για συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων

Το έργο του προγραμματισμού συστημάτων δικτύων αισθητήρων είναι προς στιγμήν εν γένει περίπλοκο. Για να θέσει κανείς εργασίες σε συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων απαιτείται καλή γνώση λειτουργικών συστημάτων και προγραμματισμού. Γλώσσες και προγραμματιστικά περιβάλλοντα είναι διαθέσιμα (C, Java, nesC, TOSSIM, Contiki) [2]. Στα τελευταία δύο μάλιστα συνδυάζεται η ανάπτυξη κώδικα με δυνατότητα προσομοίωσης, ώστε να μπορεί να ελέγχεται ο συγγραφόμενος κώδικας. Παρόλα αυτά η συγγραφή κώδικα είναι ιδιαίτερα προκλητική, αφού στο πλαίσιο αυτό ο προγραμματιστής απαιτείται να γράψει εκ των πραγμάτων κώδικα για περιορισμένα συστήματα. Οι περιορισμοί αυτής αφορούν τον αποθηκευτικό χώρο, τη στοίβα επικοινωνιακών πρωτοκόλλων (όπου συνήθως απαιτείται οι διαδικασίες της δρομολόγησης των μηνυμάτων στο δίκτυο να συνδυάζονται με τη συλλογή δεδομένων), το λειτουργικό σύστημα που είναι απλό και ιδιαίτερα συμπυκνωμένο κ.α.. Λόγω του τελευταίου κατά την ανάπτυξη λογισμικού πρέπει να αντιμετωπίζονται θέματα που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας, την ευρωστία της τοπολογίας (αντιμετώπιση ζητημάτων που αφορούν απώλειες/αστοχίες κόμβων ή/και ζεύξεων) κ.α.. Όλα αυτά απαιτούν ιδιαίτερη προγραμματιστική εμπειρία και καθιστούν δύσκολη την ανάπτυξη λογισμικού [2].

Πέρα από αυτά τα διαθέσιμα εργαλεία, αυτό που επιθυμούν πραγματικά οι χρήστες των συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων είναι να μπορούν εύκολα να θέτουν εργασίες στα συστήματα αυτά. Αυτές μπορούν να αφορούν απλώς τη ρύθμιση της δειγματοληψίας, την διάταξη συλλογής (δηλ. ποιος θα συλλέξει τι και με τι ρυθμό) κ.α.. Οι εργασίες αυτές θα πρέπει να μπορούν να γίνονται με απλό τρόπο και από μη ειδικούς στον προγραμματισμό. Μία αξιοσημείωτη συνεισφορά που αφορά τη συλλογή των δεδομένων αποτελεί η προγραμματιστική διασύνδεση του συστήματος διαχείρισης βάσης δεδομένων δικτύου αισθητήρων TinyDB [24]. Εδώ η κοινότητα των βάσεων δεδομένων (database community) έχει υλοποιήσει και προτείνει μια διεπαφή χρήστη βασισμένη στην SQL. Μέσω της διεπαφής αυτής ο χρήστης μπορεί εύκολα να καθορίζει τα δεδομένα που επιθυμεί από το δίκτυο των αισθητήρων με τη μορφή ερωτημάτων. Η εκτέλεση και βελτιστοποίηση τους συντελείται αυτομάτως όπως ακριβώς στα παραδοσιακά συστήματα διαχείρισης βάσεων

δεδομένων. Ένα παράδειγμα χωροχρονικού ερωτήματος που μπορεί να διατυπωθεί είναι το ακόλουθο:

```
'SELECT δόνηση FROM sensors WHERE δόνηση > [κατώφλι], SAMPLING EPOCH 1h'
```

Έτσι ο επιστήμονας πεδίου χρησιμοποιώντας αυτήν την προγραμματιστική διεπαφή απαλλάσσεται από τη ανάπτυξη, δοκιμή και βελτιστοποίηση του κώδικα και απλά ορίζει τις αναγκαίες εργασίες με απλό τρόπο.

Ακολούθως γίνεται αναλυτικότερη παρουσίαση του περιβάλλοντος TinyDB.

2.4.3.1 TinyDB: Ένα σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων αποκεντρωμένης¹⁰ επεξεργασίας για συστήματα δικτύων αισθητήρων

Η TinyDB είναι το πρώτο ανοιχτού κώδικα σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων για αισθητήρες το οποίο είναι σήμερα διαθέσιμο [25]. Η TinyDB παρέχει ένα σύστημα επεξεργασίας ερωτημάτων για εξόρυξη πληροφορίας από ένα δίκτυο αισθητήρων που τρέχει στο λειτουργικό σύστημα TinyOS¹¹, χωρίς να απαιτείται η συγγραφή κώδικα C. Η TinyDB παρέχει μια απλή SQL-διεπαφή, όπου καθορίζει κανείς τα δεδομένα και διάφορες παραμέτρους όπως ο ρυθμός ανανέωσης δεδομένων κ.α.. Βάση ενός ερωτήματος που καθορίζει τα επιθυμητά δεδομένα, το σύστημα TinyDB ανακτά τα δεδομένα, τα φιλτράρει, τα συναθροίζει και τα δρομολογεί σε κάποιο προορισμό. Όλες αυτές οι εργασίες συντελούνται με εφαρμογή ενεργειακά φιλικών 'εντός δικτύου' επεξεργασιών δηλ. αποκεντρωμένων διεργασιών.

Για να χρησιμοποιήσει κανείς την TinyDB πρέπει να εγκαταστήσει τα TinyOS-συστατικά της σε κάθε κόμβο του δικτύου αισθητήρων. Η TinyDB παρέχει ένα απλό Java API μέσω του οποίου μπορεί κανείς να δομήσει εφαρμογές για την ανάκτηση δεδομένων από το δίκτυο και τη διατύπωση ερωτημάτων. Επίσης, υφίσταται και μια απλή γραφική διεπαφή για την ανάπτυξη ερωτημάτων και την απεικόνιση του αποτελέσματος.

Ο πρωταρχικός στόχος της TinyDB είναι να κάνει τη ζωή του προγραμματιστή εύκολη και να επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών καθοδηγούμενων από τις απαιτήσεις σε δεδομένα. Η TinyDB απαλλάσσει από την ανάγκη συγγραφής κώδικα χαμηλού επιπέδου. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά της TinyDB είναι τα εξής [26]:

Διαχείριση Μεταδεδομένων: Η TinyDB παρέχει έναν κατάλογο μεταδεδομένων όπου περιγράφονται οι ιδιότητες και οι εντολές που είναι διαθέσιμες για την διατύπωση ερωτημάτων και την υλοποίηση ρυθμίσεων στο δίκτυο αισθητήρων. Οι ιδιότητες μπορεί να αποτελούν ενδείξεις αισθητήρα ή εσωτερικές παραμέτρους λογισμικού και υλικού. Οι εντολές αφορούν την ρύθμιση των παραμέτρων και την ενεργοποίηση. Ιδιότητες και εντολές μπορούν να δημιουργηθούν και μέσω του συστατικού TinySchema στο TinysOS.

Υψηλού Επιπέδου Ερωτήματα: Η TinyDB χρησιμοποιεί μια δηλωτική γλώσσα ερωτημάτων που επιτρέπει να περιγράψει κανείς τα επιθυμητά δεδομένα, χωρίς να χρειάζεται να καθορίσει πώς θα τα αποκτήσει. Αυτό καθιστά εύκολη την ανάπτυξη εφαρμογών και εξασφαλίζει την αποτελεσματική εκτέλεση των εφαρμογών καθώς υπεισέρχονται αλλαγές στο δίκτυο αισθητήρων.

¹⁰ Η αποκεντρωμένη προσέγγιση στην επεξεργασία των πληροφοριών περιγράφεται αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα και στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας. Το σύστημα TinyDB εφαρμόζει μια τέτοια προσέγγιση για την επεξεργασία των πληροφοριών στο δίκτυο αισθητήρων που εφαρμόζεται.

¹¹ TinyOS: λειτουργικό σύστημα για ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Τοπολογία Δικτύου: Η TinyDB διαχειρίζεται το υποκείμενο δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας με την παρακολούθηση των γειτόνων, διατηρώντας πίνακες δρομολόγησης και εξασφαλίζοντας ότι κάθε κόμβος στο δίκτυο μπορεί αποτελεσματικά και σχεδόν αξιόπιστα να παραδώσει τα δεδομένα του προς τον χρήστη.

Πολλαπλά ερωτήματα: Η TinyDB επιτρέπει την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών ερωτημάτων στο ίδιο σύνολο κόμβων. Τα ερωτήματα αυτά μπορούν να καθορίζουν διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας και να απαιτούν πρόσβαση σε διάφορους τύπους αισθητήρων. Επιπλέον, η TinyDB εάν είναι δυνατόν αξιοποιεί αποτελεσματικά μεριζόμενες (κοινά απαιτούμενες) εργασίες που αφορούν πολλαπλά ερωτήματα. Αυτό σημαίνει στην ταυτόχρονη εκτέλεση κάτι που έχει τρέξει και είναι συνεπές και έγκυρο δεν ξανατρέχει.

Βαθμιαία ανάπτυξη μέσω μερισμού ερωτημάτων: Όταν απαιτείται επέκταση του υπάρχοντος συστήματος δικτύου αισθητήρων απλά εγκαθιστά κανείς τον κώδικα TinyDB σε νέους κόμβους. Η TinyDB κάνει τις υπόλοιπες αναγκαίες ρυθμίσεις. Οι κόμβοι μπορούν να μερίζονται πλέον τα ερωτήματα: όταν ένας κόμβος ακούσει ένα μήνυμα δικτύου για ένα ερώτημα που δεν έχει ακόμη εκτελεστεί, ζητά αυτόματα από τον αποστολέα του εν λόγω δεδομένου για ένα αντίγραφο του ερωτήματος και όταν το λάβει αρχίζει να το εκτελεί.

2.4.3.2 Η Γλώσσα Ερωτημάτων στην TinyDB: *TinySQL*

Η μορφή των ερωτημάτων στην TinySQL έχει ως εξής [26]:

```
SELECT <aggregates>, <attributes>
[FROM {sensors | <buffer>}]
[WHERE <predicates>]
[GROUP BY <exprs>]
[SAMPLE PERIOD <const> | ONCE]
[INTO <buffer>]
[TRIGGER ACTION <command>]
```

Παραδειγματικά ορισμένα ερωτήματα είναι τα εξής:

```
SELECT nodeid, nestNo, light
FROM sensors
WHERE light > 400
EPOCH DURATION 1s
```

Epoch	Nodeid	nestNo	Light
0	1	17	455
1	1	17	422
1	2	25	405

```
SELECT AVG(sound)
FROM sensors
EPOCH DURATION 10s
```

Epoch	region	CNT(...)	AVG(...)
0	North	3	360
0	South	3	520
1	North	3	370
1	South	3	520

```
SELECT region, CNT(occupied), AVG(sound)
FROM sensors
GROUP BY region
HAVING AVG(sound) > 200
EPOCH DURATION 10
```

και ορισμένα Event-based Queries

ON event SELECT ...

Run query only when interesting events happen

Event examples

Button pushed

Message arrival

Bird enters nest

Analogous to triggers but events are user-defined

2.4.3.3 Πιθανοκρατικά ερωτήματα

Ενδιαφέρον στο πλαίσιο των ΣΔΒΔ για συστήματα δικτύων αισθητήρων αποτελούν τα πιθανοκρατικά ερωτήματα, τα οποία συνδέονται άμεσα με την εγγενή αβεβαιότητα των παρατηρούμενων γεωγραφικών δεδομένων. Ένα ενδεικτικό πιθανοκρατικό ερώτημα είναι το εξής [25]:

```
select NodeID, Temp ± 0.1C
where NodeID in [1..9]
with conf(0.95)
```

2.4.3.4 Διαφορές ΣΔΒΔ-αισθητήρων και συνήθων ΣΔΒΔ

Ορισμένες διαφορές μεταξύ ΣΔΒΔ-αισθητήρων και συνήθων ΣΔΒΔ είναι οι ακόλουθες [25]:

- Η μνήμη που καταλαμβάνει το ΣΔΒΔ-αισθητήρων είναι ιδιαίτερα μικρή (μερικά Kbyte) εν συγκρίσει με τον κώδικα που καταλαμβάνει ένα σύνηθες ΣΔΒΔ.
- Σε ένα ΣΔΒΔ-αισθητήρων αποθηκεύονται ορισμένα μόνο από τα δεδομένα. Τα ερωτήματα που στο δίκτυο αισθητήρων απαιτούν συλλογή και ανάκτηση δεδομένων σε καθορισμένα από τον χρήστη διαστήματα (intervals). Στα συνήθη ΣΔΒΔ τα ερωτήματα γενικώς εφαρμόζονται σε μεγάλες ποσότητες αποθηκευμένων και ευρετηριακά δομημένων δεδομένων.
- Η εκτέλεση των ερωτημάτων συνδυάζεται με ερωτήματα δρομολόγησης (query routing) και την τοπολογία συλλογής δεδομένων με κατάλληλο τρόπο, ώστε να δημιουργούνται αυτόματα τα query plans.
- Η διαδικασία για να υπολογίζονται 'συναθροιστικές' συναρτήσεις (aggregate functions) όπως min, max, average και άλλες, συνδυάζεται και αυτή με την δρομολόγηση και τη συλλογή δεδομένων.

2.4.3.5 Ερευνητικά θέματα από την περιοχή των ΣΔΒΔ-δικτύων αισθητήρων

Ορισμένα ερευνητικά θέματα από την περιοχή των ΣΔΒΔ-δικτύων αισθητήρων αποτελούν τα εξής [25]:

- In-network aggregation
- Acquisitional Query Processing

- Heterogeneity
- Intermittent Connectivity
- In-network Storage
- Statistical modeling and summarization
- In-network Joins
- Adaptivity and Sensor Networks
- Multiple Queries

2.4.4 Αλγόριθμοι χωρικών υπολογισμών βάση αποκεντρωμένης προσέγγισης

«Η κατασκευή χάρτη είναι ένα σύνολο αποκεντρωμένων χωρικών υπολογισμών¹²»

Οι ερευνητικές προκλήσεις στα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων αφορούν ιδιαίτερα τα χωρικά δεδομένα και την γεωπληροφορική, αφού τα δίκτυα γεωαισθητήρων σαν συστήματα άμεσης σύζευξης με το γεωγραφικό χώρο, συλλέγουν χωρική πληροφορία η οποία απαιτεί εξειδικευμένες επεξεργασίες για χωρική ανάλυση, επεξεργασία χωρικών ερωτημάτων κ.ο.κ.. Η υφιστάμενη γνώση δεν επαρκεί διότι τα μοντέλα και οι λειτουργίες που έχουν αναπτυχθεί αφορούν τεχνολογίες αποτελεσματικές για την εφαρμογή τους σε ισχυρούς υπολογιστές βάση μιας «συγκεντρωμένης προσέγγισης» επεξεργασίας πληροφοριών (όλες οι πληροφορίες είναι συγκεντρωμένες σε έναν κεντρικό σταθμό επεξεργασίας) και δεν μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά όπως θα φανεί παρακάτω στα περιορισμένα συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων τουλάχιστον δίχως να τροποποιηθούν.

Στα δίκτυα γεωαισθητήρων για την επίλυση προβλημάτων απαιτείται να εφαρμόζεται η *αποκεντρωμένη προσέγγιση* στην επεξεργασία των πληροφοριών [20]. Στο πλαίσιο αυτό οι αλγοριθμικές διαδικασίες που αφορούν χωρικά δεδομένα αποτελούν διαδικασίες μιας 'αποκεντρωμένης προσέγγισης' χωρικών υπολογισμών ενόψει της συνήθους συγκεντρωμένης προσέγγισης χωρικής επεξεργασίας, όπως αυτή συντελείται στα παραδοσιακά ΣΓΠ. Όπως θα φανεί στα επόμενα κεφάλαια η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων.

Κατά την αποκεντρωμένη προσέγγιση τα δεδομένα που υφίστανται στους διάφορους κόμβους του δικτύου δεν εξωθούνται προς έναν απομακρυσμένο μεμονωμένο κεντρικό κόμβο για να υποστούν εκεί όλες τις απαραίτητες επεξεργασίες (συγκεντρωμένη προσέγγιση), αλλά επιδιώκονται τοπικές συνεργατικές επεξεργασίες εντός των κόμβων του δικτύου (in-network) και στην καλύτερη περίπτωση κατά το δυνατόν αυτόνομα από κάθε κόμβο, εάν και η πλήρης αυτονομία (στις απαιτούμενες επεξεργασίες των πληροφοριών) τις περισσότερες φορές πρακτικά δεν επιτυγχάνεται. Διότι δεν επαρκεί η πληροφορία αποκλειστικά ενός κόμβου για την επίλυση των προβλημάτων. Αυτό που πρακτικά συμβαίνει τις περισσότερες φορές είναι συνεργατική επεξεργασία μεταξύ των κόμβων.

Ουσιαστικά, κατά την αποκεντρωμένη προσέγγιση ένα σύνολο κόμβων (αντί αποκλειστικά ενός μεμονωμένου) μετέχει στο απαιτούμενο υπολογιστικό έργο. Πρακτικά, αυτό επιτυγχάνεται όπως θα φανεί στα επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας με την εφαρμογή

¹² Η γεωγραφική γεωμετρία αποτελεί ένα είδος μη γραμμικής γεωμετρίας που επιτάσσει κατά τη χαρτογράφηση να αντιμετωπίζετε τοπικά, πράγμα που οδηγεί κατά τη σύνθεση ενός χάρτη σε ένα σύνολο αποκεντρωμένων τοπικών υπολογισμών.

κατάλληλου πρωτοκόλλου στους κόμβους, μέσω του οποίου καθορίζονται καταλλήλως οι αλληλεπιδράσεις των κόμβων που οδηγούν στην επίτευξη του απαιτούμενου υπολογιστικού έργου. Εν τέλει αυτοί οι καθορισμοί αλληλεπιδράσεων σε ένα πρωτόκολλο αποδίδουν κατά τη αποκεντρωμένη προσέγγιση στο σύστημα συνολική συμπεριφορά «συναθροίζοντας» το υπολογιστικό έργο του συνόλου των κόμβων που μετέχουν κάθε φορά σε μια διαδικασία. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται ως γνωστών στο Διαδίκτυο για τις εργασίες όπως δρομολόγηση αιτημάτων και αποκρίσεων. Είναι κατ' εξοχήν η προσέγγιση που παρέχει αυτήν την ταχεία απόκριση στο Διαδίκτυο και είναι κατ' εξοχήν η προσέγγιση που αφορά την σύγχρονη έρευνα στα καταναμημένα συστήματα.

Η αντιμετώπιση μοιάζει με την κίνηση των αυτοκινήτων σε μια λεωφόρο. Ένα σύνολο οδηγών-οχημάτων εφαρμόζει κατάλληλους κανόνες αλληλεπίδρασης (φρενάριω, κοιτάω τον καθρέφτη, ανάβω τα φώτα κοκ) για το υπολογιστικό έργο της οδήγησης. Από το σύνολο των μεμονωμένων κόμβων εδώ που μετέχουν στην οδήγηση αναδύεται ένα συνολικό αποτέλεσμα αποκεντρωμένης συντελούμενης υπολογιστικής διαδικασίας: Η κίνηση των αυτοκινήτων στη λεωφόρο.

Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργούν οι υπολογιστικές διεργασίες που καθορίζονται γενικώς σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων και ειδικά δύναται να αφορούν επεξεργασίες χωρικής πληροφορίας που ενδιαφέρουν αυτήν την εργασία όπως χωρικές αναλύσεις, επεξεργασίες χωρικών ερωτημάτων κοκ.

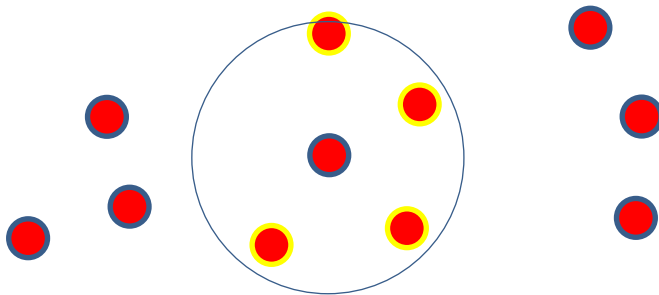
2.4.4.1 Η αποκεντρωμένη προσέγγιση στο πλαίσιο συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων

Στο πλαίσιο της αποκεντρωμένης προσέγγισης σε δίκτυα γεωαισθητήρων στην ανάπτυξη διαδικασιών επιβάλλεται ένας βασικός περιορισμός. Η δυνατότητα συνεργατικών επεξεργασιών περιορίζεται αποκλειστικά και μόνο μεταξύ χωρικά εγγύς εβρισκόμενων κόμβων [20]. Πιο συγκεκριμένα κάθε κόμβος δύναται να επικοινωνεί μόνο με κάθε άλλον εντός της εμβέλειας της ασύρματης μετάδοσής του (τυπικά με τη σύγχρονη τεχνολογία 10 μέχρι 100 μέτρα) (Σχήμα 2.7). Ο περιορισμός αυτός επιβάλλεται κατασκευαστικά διότι διαφορετικά, κόμβοι με απεριόριστη εμβέλεια ασύρματης μετάδοσης θα εξαντλούσαν γρήγορα το ενεργειακό τους απόθεμα σε μπαταρίες όπως παρέχεται από την σύγχρονη τεχνολογία τροφοδοσίας. Το συστατικό της ασύρματης επικοινωνίας¹³ είναι ιδιαίτερα «ενεργοβόρο». Κατά την αποστολή δεδομένων από έναν κόμβο καταναλώνεται 800 φορές περισσότερο ενέργεια από ότι σε τοπικό υπολογισμό στον ίδιο κόμβο για την ίδια ποσότητα δεδομένων [20]. Ο περιορισμός της συνεργατικής επεξεργασίας στην χωρικά «εγγύς» γειτονιά, είναι ένας άμεσος τρόπος για την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων.

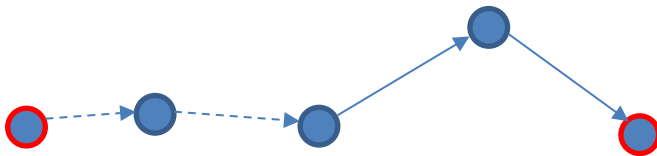
Επιπλέον για τον λόγο της περιορισμένης τροφοδοσίας κατά την ανάπτυξη αλγορίθμων σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων επιδιώκεται κατά το μέγιστο δυνατόν η ελαχιστοποίηση της επικοινωνιακής διαδικασίας, δηλ. η ελαχιστοποίηση του αριθμού και του όγκου των μηνυμάτων που αποστέλλονται μεταξύ των κόμβων. Η χρήση ενός δικτύου γεωαισθητήρων

¹³ Στην επικοινωνία επιβάλλονται περιορισμοί που έχουν σαφή χωρικά χαρακτηριστικά. Η ενέργεια των κυμάτων που χρησιμοποιούνται στην ασύρματη επικοινωνία (κύματα συχνότητας RF) όπως διατυπώνει η φυσική, διασκορπίζεται κατά την διάδοση της. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως απώλειες διάδοσης και σε εξιδανικευμένες συνθήκες η ενέργεια που χάνεται από ένα ασύρματο σήμα είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ του πομπού και δέκτη. Επιπλέον τα ασύρματα σήματα εξασθενούν κατά τη διάδοση τους και καθώς διέρχονται από τα διάφορα φυσικά μέσα, όπως ο αέρας, το νερό, η βλάστηση, και τα κτίρια. Ως αποτέλεσμα, στην πράξη, η ενέργεια που χάνεται από το ασύρματο σήμα είναι τυπικά της τάξης των d^4 , όπου d είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι απώλειες διάδοσης και η εξασθένηση του σήματος σε συνδυασμό με τους περιορισμένους πόρους σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων επιβάλλουν οι κόμβοι να μεταδίδουν μόνο σε σχετικά μικρές αποστάσεις (με τη σημερινή τεχνολογία, τυπικά της τάξης των δεκάδων μέτρων).

απλά ως συλλέκτη και διανομέα ανεπεξέργαστων δεδομένων (raw data) δεν είναι αποτελεσματική. Κατά αυτόν τον τρόπο θα εξαντλούνταν γρήγορα οι μπαταρίες των κόμβων, αφού μεγάλος αριθμός και όγκος δεδομένων θα έπρεπε να προωθηθεί από κόμβο σε κόμβο με διαδοχικά περάσματα (multi-hop fashion) [27] για την συγκέντρωση αυτών σε έναν καθορισμένο κόμβο βάσης όπου θα συντελούνταν η επεξεργασία (Σχήμα 2.8). Ο κάθε κόμβος στην περίπτωση αυτή κατά τη διαδοχική μετάδοση θα επισύναπτε τα δικά του 'ανεπεξέργαστα δεδομένα' και το ωφέλιμο φορτίο του μηνύματος θα αύξαινε σε κάθε πέρασμα καθώς εξελίσσονταν η προώθηση. Ως συνέπεια οι τελευταίοι κόμβοι στη διαδοχή (του μονοπατιού προώθησης) θα είχαν αυξημένο φορτίο μηνύματος προς λήψη ή/και αποστολή και τα ενεργειακά τους αποθέματα θα εξαντλούνταν ταχύτερα εν σχέση με τους αρχικούς κόμβους στο μονοπάτι προώθησης.



Σχήμα 2.7 Ο περιορισμός της συνεργατικής επεξεργασίας στην εγγύς γειτονιά που επιβάλλεται από την περιορισμένη εμβέλεια των κόμβων ενός δικτύου γεωαισθητήρων.



Σχήμα 2.8 Επικοινωνία με διαδοχικά περάσματα του μηνύματος από κόμβο σε κόμβο (multi hop way) μέχρι τον προορισμό. Η επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων χωρικά κόμβων συντελείται κατά αυτόν τον τρόπο (αναμετάδοση μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων).

Σε αυτά τα περιορισμένης εμβέλειας δικτυωμένα περιβάλλοντα τα πρωτόκολλα πέρα από την απαίτηση δρομολόγησης των μηνυμάτων από έναν κόμβο πηγή σε έναν κόμβο προορισμού με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας πρέπει να παρέχουν επιπλέον και ευρωστία στην τοπολογία, δηλ. όταν παρουσιάζεται κάποια αστοχία σε κάποια ζεύξη ή σε κόμβο να ρυθμίζεται αυτόματα εκ νέου η δρομολόγηση. Αυτό οδηγεί στην ενσωμάτωση της επεξεργασίας των δεδομένων πολλές φορές μαζί με την δρομολόγηση.

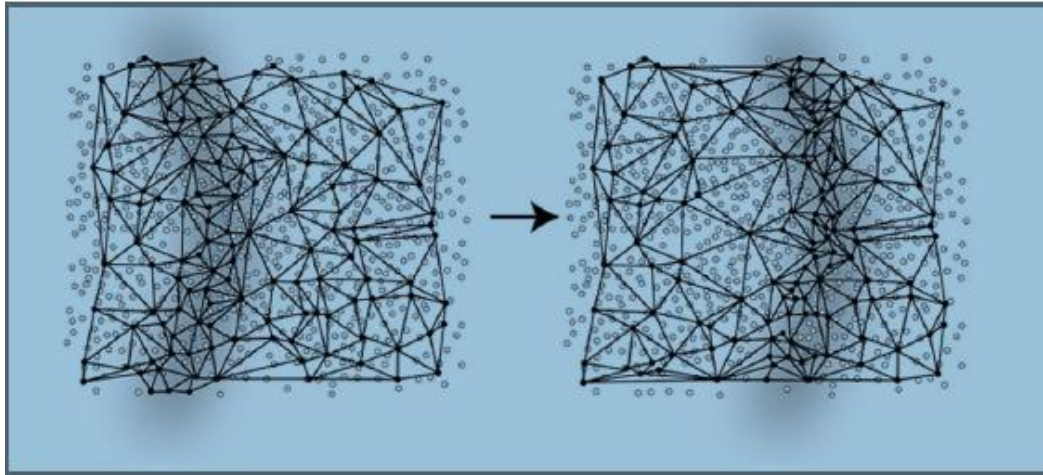
Όπως αναφέρθηκε οι υπολογισμοί πρέπει να συντελούνται όσο το δυνατόν επί των κόμβων του δικτύου (in-network) και να αποφεύγεται η προώθηση μεγάλων ποσοτήτων 'ακατέργαστων' δεδομένων σε απομακρυσμένους κόμβους. Πρακτικά η αποφυγή προώθησης μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων επιτυγχάνεται με κατάλληλη τοπική επεξεργασία των δεδομένων και προώθηση μόνο 'ουσιωδών' δεδομένων. Η υπολογιστική διαδικασία έπειτα μπορεί να διαβιβάζει περαιτέρω

πληροφορίες σε συγκεκριμένους κόμβους του δικτύου ανάλογα με το έργο της. Παραδείγματα τέτοιου είδους συνεργατικών επεξεργασιών αποτελούν η συνεργατική επεξεργασία δύο ή περισσότερων γειτονικών κόμβων για φιλτράρισμα των συλλεγόμενων δεδομένων, για ανίχνευση τοπικών συμβάντων π.χ. ανίχνευση και εντοπισμός ορίου περιοχής τοξικού νέφους κ.α.. Τέτοιου είδους επεξεργασίες είναι ιδανικές για συμβάντα που περιορίζονται τοπικά σε μία ή περισσότερες περιοχές π.χ. όπως η εκδήλωση μόλυνσης ή πυρκαγιάς. Σε αυτή την περίπτωση τα συμβάντα ανιχνεύονται και υπολογίζονται από κόμβους που βρίσκονται εντός των ορίων του συμβάντος, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι που βρίσκονται εκτός της περιοχής παραμένουν αδρανείς δηλ. δεν χρησιμοποιούνται.

2.4.4.2 Αλγόριθμοι χωρικού υπολογισμού σε δίκτυα γεωαισθητήρων

Από μια άλλη όψη υψηλότερου επιπέδου μπορεί να αντιμετωπίσει κανείς ένα δίκτυο γεωαισθητήρων ως μια υποδομή για την διατύπωση και επεξεργασία χωροχρονικών ερωτημάτων για τα δεδομένα που τον ενδιαφέρουν. Τα χωροχρονικά ερωτήματα που διατυπώνονται μπορούν να αφορούν φαινόμενα που εντάσσονται σε δύο κατηγορίες: α) ερωτήματα για συνεχή φαινόμενα β) ερωτήματα διακριτά φαινόμενα. Παραδείγματα συνεχών φαινομένων σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων μπορεί να αποτελούν το μικροκλίμα και διακριτών τα τοξικά νέφη και οι πυρκαγιές. Πολλά φαινόμενα, όπως το μικροκλίμα, η χωρική κατανομή ενός αερίου πρέπει να αντιμετωπίζονται ως συνεχή. Για τα συνεχή φαινόμενα ωστόσο ένα δίκτυο γεωαισθητήρων εκ των προτέρων παρέχει απλά μια ασυνεχή χωρική σημειακή δειγματοληψία δεδομένων που συνεπάγεται χωρική ανάλυση που εξαρτάται από την πυκνότητα του δικτύου. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται μια ακριβή και ορθή εκτίμηση ενός συνεχούς δυναμικού του χωρικού πεδίου βάση των διακριτών σημειακών δειγμάτων που συλλέγονται από τους αισθητήριους κόμβους. Εδώ μπορούν να εφαρμοστούν γνωστές τεχνικές ανάλυσης και εκτίμησης δεδομένων επανασχεδιασμένες όμως στο πλαίσιο μιας αποκεντρωμένης προσέγγισης - μιας αποδοτικής επεξεργασίας 'εντός δικτύου' με στόχο την ελαχιστοποίηση της επικοινωνιακής διαδικασίας [2].

Όσο αναφορά την ελαχιστοποίηση της επικοινωνιακής διαδικασίας σε πολλές περιπτώσεις ο υπολογισμός περιορίζεται σε ένα σύνολο κόμβων του δικτύου ενώ το υπόλοιπο σύνολο κόμβων του δικτύου δεν μετέχει ουσιαστικά στη διαδικασία υπολογισμού. Εδώ επιδιώκεται η εξόρυξη απλά και μόνο του ουσιαστικού στοιχείου της χωρικής πληροφορίας από ένα δίκτυο π.χ. στην ανίχνευση τοξικού νέφους ή πλημμύρας αρκεί απλά ο προσδιορισμός του ορίου του φαινομένου. Σ' ένα τοξικό νέφος ή πλημμύρα το όριο είναι αυτό που καθορίζει την επικίνδυνη περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση η επεξεργασία συντελείται απλά και μόνο στο όριο και ελαχιστοποιείται ή καταστέλλεται εντελώς σε κόμβους που δεν υφίσταται το φαινόμενο ή βρίσκονται μακριά από όριο του φαινομένου (Σχήμα 2.9). Έτσι εξοικονομείται σημαντική ενέργεια. Στο πλαίσιο αυτό έχει γίνει αρκετή δουλειά για την ανίχνευση και παρακολούθηση του ορίου μιας περιοχής με εφαρμογή αποκεντρωμένων διαδικασιών. Μέρος της δουλειάς αυτής εστιάζει απλά στην αναγνώριση-ταυτοποίηση από τους κόμβους των σημείων του ορίου (boundary points) [28]. Άλλο κομμάτι εστιάζει στον υπολογισμό της γεωμετρίας [29] και έναν τρίτο κομμάτι αφορά την ιχνηλασία του ορίου (συνεχή παρακολούθηση των αλλαγών του ορίου) [30,31,32]. Το τελευταίο αφορά δύο προσεγγίσεις: α) Ταυτοποίηση 'δυναμικής' τοπολογίας του ορίου αντικειμένου - ιχνηλασία τοπολογικών αλλαγών (π.χ. 'σπάζει το τοξικό νέφος, σε δύο κομμάτια ; ' , 'τα πύρινα μέτωπα συγχωνεύονται σε ένα ; ' και β) Ταυτοποίηση και ιχνηλασία 'δυναμικής' Γεωμετρίας του ορίου. Όλες αυτές οι εργασίες αφορούν υλοποιήσεις αλγορίθμων εντός δικτύου (in-network) δηλ. βάση της αποκεντρωμένης προσέγγισης.



Σχήμα 2.9 Ιχνηλασία (tracking) συνεχών φαινομένων [2]

Από τα προηγούμενα διαφαίνεται διαισθητικά κατά κάποιον τρόπο ότι η διαθεσιμότητα όλο και περισσότερων αλγορίθμων εντός δικτύου (in-network) χειρισμού χωρικών πληροφοριών σε δίκτυα γεωαισθητήρων θα οδηγήσει στην υλοποίηση και ενσωμάτωση αποκεντρωμένων συστημάτων Γεωγραφικών πληροφοριών σε δίκτυα γεωαισθητήρων. Σε αυτήν την περίπτωση το ΣΓΠ θα υλοποιείται εκ των πραγμάτων από το δίκτυο των γεωαισθητήρων [20].

2.4.4.3 Συντονισμός τοπικών ρολογιών σε δίκτυα γεωαισθητήρων

Τεχνικές προκλήσεις υφίστανται ιδιαίτερα και στο συντονισμό των ρολογιών βάση των οποίων γίνονται οι δειγματοληψίες και οι επεξεργασίες χωροχρονικής πληροφορίας σε δίκτυα γεωαισθητήρων [2]. Για παράδειγμα, συλλεγόμενα ρεύματα δεδομένων (π.χ. σε μια εφαρμογή παρακολούθησης ηφαιστειακής δραστηριότητας, όπου το δίκτυο συλλέγει ταχέως μια χρονοσειρά δεδομένων κατά τη διάρκεια της δόνησης) καθώς έχουν συλλεχτεί από έναν κόμβο αισθητήρα συμπεριλαμβάνουν θέση και χρονική σήμανση (time stamp). Δεδομένου ότι τα ρολόγια των κόμβων αποκλίνουν μεταξύ τους και είναι δύσκολο να συγχρονιστούν πρέπει κατά κάποιο τρόπο να εξασφαλίζεται συνέπεια στις διαδικασίες που επεξεργάζονται τέτοιου είδους δεδομένα είτε βάση της αποκεντρωμένης προσέγγισης είτε καθώς συγκεντρώνονται για επεξεργασία σε κάποιο κεντρικό σταθμό βάσης. Παράδειγμα όταν τα δεδομένα καταφθάσουν σε κεντρικό σταθμό βάσης απαιτείται η διάταξη αυτών με ενιαία χρονική αναφορά και να υπάρχει χρονική ακρίβεια για την υπολογιστική επεξεργασία.

2.4.4.4 Σύλληψη ουσιωδών συμβάντων

Μια άλλη πρόκληση έχει σχέση με το να συλλαμβάνονται τα 'σημαντικά' συμβάντα σε μια εφαρμογή όπου συντελείται πυροδότηση της έναρξης συλλογής δεδομένων και όχι να συλλαμβάνονται προαναγγελθέντα συμβάντα και να χάνεται το ουσιώδες συμβάν που μπορεί να ακολουθήσει να έπεται [2]. Στην περίπτωση αυτή η γνώση πεδίου είναι αυτή που θα επηρεάσει τον προγραμματισμό π.χ. σε εφαρμογές παρακολούθησης ηφαιστειακών δονήσεων, επιτάσσεται υβριδική γνώση που θα προέρθει με συγκεκριμένο του ειδικού

επιστήμονα του πεδίου που κατέχει τη γνώση της φυσικότητας των ηφαιστειακών δράσεων και του επιστήμονα των υπολογιστών και των συστημάτων.

2.4.4.5 Πλεονεκτήματα αποκεντρωμένης προσέγγισης

Το υπόδειγμα επίλυσης προβλημάτων βάση της αποκεντρωμένης προσέγγισης γενικότερα σε ένα δίκτυο υπολογιστών ή καταναμημένο σύστημα έχει πολλούς άλλους λόγους πλεονεκτικής εφαρμογής έναντι της εφαρμογής μιας συγκεντρωμένης προσέγγισης¹⁴ πέρα από τους λόγους των χωρικών περιορισμών που τίθενται στην μετακίνηση της πληροφορίας σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων. Μεταξύ αυτών είναι η αποτελεσματικότητα-αποδοτικότητα, η ευλυγισία και η ασφάλεια των πληροφοριών [20].

Αποτελεσματικότητα-Αποδοτικότητα: Η εφαρμογή μιας συγκεντρωμένης προσέγγισης σε ένα δίκτυο υπολογιστών δε θα συντελούσε σε βέλτιστη διαχείριση των πόρων¹⁵ του συνολικού συστήματος. Η συγκεντρωμένη προσέγγιση θα είχε ως συνέπεια τον κορεσμό ενός «κεντρικού» κόμβου από ανεπεξέργαστα δεδομένα που θα προέρχονται δυναμικά από μυριάδες άλλους κόμβους του δικτύου. Σε αυτό το σημείο μια αποκεντρωμένη προσέγγιση όπου φιλτράρονται και προωθούνται από κόμβο σε κάθε κόμβο μόνο ουσιώδη δεδομένα συμβάλλει ιδιαίτερα στην διαχείριση της πληροφορίας αποφεύγοντας έτσι τον κορεσμό. Στην αποκεντρωμένη προσέγγιση ο έλεγχος και η ευθύνη των υπολογισμών διαμοιράζεται σε ένα σύνολο κόμβων. Με άλλα λόγια κατά την υπολογιστική εργασία ανατίθεται το υπολογιστικό έργο σε διάφορους κόμβους, όχι απλά σε ένα μεμονωμένο κόμβο. Οι κόμβοι πρέπει να εργαστούν ή/και να συνεργαστούν καταλλήλως μεταξύ τους για να εκπληρώσουν το απαιτούμενο υπολογιστικό έργο. Παρά τον ιδιαίτερο ρόλο που μπορούν να έχουν ορισμένοι κόμβοι, το υπολογιστικό έργο στοχεύει να μοιράζεται κατά το δυνατόν ισόποσα στους κόμβους που σχετίζονται με τον υπολογισμό. Η αποκεντρωμένη προσέγγιση υπονοεί μια υψηλού βαθμού ανεξαρτησία¹⁶ στη λειτουργία και αυτονομία των κόμβων.

Περαιτέρω μη αποτελεσματική και μη αποδοτική γίνεται η συγκεντρωμένη προσέγγιση σε περιπτώσεις όπου απαιτείται όσο το δυνατόν λιγότερη καθυστέρηση στην απόκριση των συστημάτων. Ως γνωστόν ένα δίκτυο μπορεί να εισάγει μεγάλη καθυστέρηση (latency) από τη συλλογή μέχρι τη μετάδοση των πληροφοριών στους κόμβους που είναι ανεπιθύμητη. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο με μυριάδες κόμβους ο κεντρικός κόμβος πρέπει να κάνει χειραψία επικοινωνίας με όλους τους άλλους κόμβους για τη αίτηση και λήψη των πληροφοριών και η τελευταία επικοινωνία θα είναι αυτή που θα κλείσει το συνολικό χρονικό διάστημα μετάδοσης. Επιπλέον η ενσωμάτωση ταχτικής βάση συγκεντρωμένης προσέγγισης σε συστήματα με χρονικά κρίσιμες απαιτήσεις στην απόκριση των συστημάτων είναι απαγορευτική και θέλει ιδιαίτερη προσοχή καθ' όσον μπορεί να ενεργοποιούνται χρονικά κρίσιμες διαδικασίες (π.χ. σε συστήματα ενεργοποιητών).

Επιπλέον σε αυτή την περίπτωση η ενεργοποίηση με την ευθύνη ενός κεντρικού κόμβου μειώνει πέρα από την απόδοση και την ευρωστία και αξιοπιστία ενός συστήματος π.χ. σε περιπτώσεις αστοχίας μπορούν να υφίστανται πέρα από καταστάσεις εμπλοκής και άλλες απαγορευτικές ή ακόμα και επικίνδυνες καταστάσεις. Έτσι ως αναποτελεσματική η

¹⁴ Η συγκεντρωμένη προσέγγιση λόγω των συστημικών μειονεκτημάτων της ουσιαστικά δεν εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων σε ένα δίκτυο. Ο όρος καταναμημένο υπολογιστικό σύστημα στην σύγχρονη έρευνα της περιοχής έχει αποκλειστικά αυτήν ακριβώς την έννοια δηλ. της μη κεντροποιημένης προσέγγισης, παρόλο που πολλές φορές είναι τεχνικά δυνατή μια συγκεντρωμένη προσέγγιση.

¹⁵ Οι πόροι μπορεί να είναι ενεργειακοί, επικοινωνιακοί, υπολογιστικοί (μνήμη, ταχύτητα επεξεργαστή) και άλλοι όπως διατίθενται από τους μεμονωμένους κόμβους.

¹⁶ Καθοριστικό γνώρισμα της αποκεντρωμένης προσέγγισης είναι ότι δεν υπάρχει κανένα στοιχείο του δικτύου με καθολική γνώση δηλ. με γνώση της κατάστασης του συνολικού συστήματος.

συγκεντρωμένη προσέγγιση καθίσταται μη εφαρμόσιμη σε πολλές περιπτώσεις που απαιτείται ταχεία απόκριση στους κόμβους και εφαρμόζεται μια αποκεντρωμένη προσέγγιση στην επίλυση προβλημάτων.

Τέλος η αποκεντρωμένη προσέγγιση ως γνωστόν είναι αυτή που εφαρμόζεται και στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου όπου εκτελούνται κατ' αυτόν τον τρόπο αποτελεσματικά οι εργασίες της δρομολόγησης στο δίκτυο. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά και για κάθε άλλου τύπου υπολογιστικών εργασιών που συντελούνται πάνω σε ένα δίκτυο. Σε αυτήν την εργασία διερευνάται και εφαρμόζεται στο πλαίσιο επεξεργασιών χωρικών πληροφοριών για την επίλυση προβλημάτων σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων.

Ασφάλεια πληροφοριών: Το επόμενο μειονέκτημα μιας συγκεντρωμένης ταχτικής αφορά την προστασία της ασφάλειας των πληροφοριών. Αυτό που λέγεται ειρωνικά ότι η ασφάλεια δεδομένων σε ένα δίκτυο επιτυγχάνεται με την αποφυγή διάθεσης και αποστολής στο συγκεκριμένο δίκτυο αυτών των δεδομένων ισχύει κατά κάποιο τρόπο σε ένα συγκεντρωμένο σύστημα όπου όλες οι πληροφορίες συσσωρεύονται αποκλειστικά σε ένα μόνο κόμβο που καθίσταται τρωτός από επιθέσεις. Το αποκεντρωμένο σύστημα τουναντίον δύναται να διαμοιράζει σε αρκετούς κόμβους τις απόρρητες πληροφορίες και έτσι μπορεί να γίνετε λιγότερο τρωτό σε επιθέσεις. Το όραμα του Διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things) ως υπερέννολο του οράματος των γεωγραφικών πραγμάτων αναζητά νέους τρόπους ασφάλειας και ιδιωτικότητας αφού η υπάρχουσα διαδικτυακή υποδομή δεν ικανοποιεί το όραμα αυτό [7]. Ίσως η εφαρμογή μιας αποκεντρωμένης προσέγγισης στην ασφάλεια των πληροφοριών θα παρείχε ένα σύνολο αποτελεσματικότερων λύσεων¹⁷. Μια απομίμηση φυσικών διεργασιών αποκεντρωμένης αποθήκευσης πληροφοριών όπως χρησιμοποιεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος παρέχει μια διαίσθηση¹⁸ επί του θέματος. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος λειτουργεί βάση μιας αποκεντρωμένης προσέγγισης.

2.4.4.6 Χωρική διάσταση και δίκτυα γεωαισθητήρων

Η χωρική διάσταση παίζει έναν ιδιαίτερο ρόλο σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων. Οι υπολογισμοί είναι χωρικοί από τρεις όψεις [20]:

α) Η είσοδος και η έξοδος των διαδικασιών αφορά χωρική πληροφορία. Σε κάθε κόμβο ενός δίκτυο γεωαισθητήρων τα δεδομένα που συλλέγονται είναι εν γένη¹⁹ της μορφής:

(nodeID, X, Y, Z, t, Datum1, Datum2,...)

δηλαδή πρόκειται για σημειακά χωροχρονικά δεδομένα με ποικίλα περιγραφικά χαρακτηριστικά.

β) Η χωρική πληροφορία συλλέγεται από ένα δίκτυο αισθητηριακών κόμβων άρα εκ των πραγμάτων συλλέγεται από μια χωρικά εκτεινόμενη μορφή.

γ) Η χωρική πληροφορία (εισαγόμενοι χωρικοί περιορισμοί στην κίνηση της πληροφορίας μεταξύ των κόμβων) παίζει έναν σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη αποτελεσματικών διαδικασιών σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων. Δηλ. ουσιαστικά οι θέσεις των κόμβων παίζουν

¹⁷ Όπως και να 'χει η μαγική «απαλότητα» (Software), ίσως μπορεί να βοηθήσει.

¹⁸ Διατυπώνεται για λόγους διαίσθησης. Ο εκπονών αυτής της εργασίας δεν κατέχει ιδιαίτερες γνώσεις επί του θέματος.

¹⁹ Ωστόσο η θέση δεν είναι πάντα διαθέσιμη.

έναν κρίσιμο ρόλο στην εφαρμογή των υπολογισμών. Οι διαδικασίες δεν αντιμετωπίζουν κάθε κόμβο απλά ως μια ξεχωριστή διακριτή λογική μονάδα, αλλά σαν μια χωρική μονάδα με θέση στο χώρο και κατ' επέκταση το σύνολο των κόμβων ως μια τοπολογία με «βεβαρημένες» διασυνδέσεις κόμβων.

Αναλυτικότερα θέματα που αφορούν την ανάπτυξη αλγορίθμων «χωρικού υπολογισμού» βάση της αποκεντρωμένης προσέγγισης θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας.

2.4.5 Ρεύματα χωρικών δεδομένων από αισθητήρες

Η διαθεσιμότητα συστημάτων αισθητήρων οδηγεί προς τη διαθεσιμότητα σε πραγματικό χρόνο μεγάλου όγκου χωρικά αναφερόμενων αισθητηριακών ρευμάτων δεδομένων. Θεωρώντας την έξοδο ενός συστήματος δικτύου αισθητήρων ως ρεύμα δεδομένων υφίσταται η πρόκληση της ανάπτυξης κατάλληλων συστημάτων διαχείρισης αυτών των δεδομένων [3]. Η διαχείριση αφορά τα ερωτήματα, την επεξεργασία, την εξόρυξη και ανάλυση των ρευμάτων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για εντοπισμό τάσεων, ταυτοποίηση συμβάντων κ.α.. Στην έρευνα των βάσεων δεδομένων την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί τέτοιους είδους συστήματα διαχείρισης. Η βασική τεχνολογία της ταχείας επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων ρευμάτων δεδομένων μπορεί να εφαρμοστεί και για ρεύματα δεδομένων που προέρχονται από γεωαισθητήρες. Παρόλα αυτά οι συγκεκριμένες μηχανές ρευμάτων δεδομένων έχουν εστιάσει κατά κύριο λόγο σε επιχειρησιακές εφαρμογές όπως παρακολούθηση πιστωτικών καρτών ή συναλλαγών αγορών και αφορούν πλειάδες απλά δομημένων δεδομένων. Τα χωρικά αναφερόμενα ρεύματα δεδομένων δεν υποστηρίζονται αρκετά καλά. Έτσι απαιτούνται επεκτάσεις που αφορούν ειδικά τα χρονικά μοντέλα, τις γλώσσες ερωτημάτων και τους τελεστές ώστε να υλοποιηθούν γρήγοροι επεξεργαστές ρευμάτων δεδομένων από αισθητήρες.

2.4.6 Ιστός Αισθητήρων (Sensor Web)

Με δεδομένη την αυξανόμενη διαθεσιμότητα ρευμάτων δεδομένων από αισθητήρες σε άμεση σύνδεση μέσω του διαδικτύου υφίσταται περαιτέρω το ενδιαφέρον για μια πλατφόρμα που θα καθιστά δυνατό τον διαμοιρασμό και την εύρεση ρευμάτων δεδομένων από αισθητήρες και την εύκολη υλοποίηση εφαρμογών αξιοποιώντας τα δεδομένα αυτά [2]. Τα δεδομένα από συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων πρέπει να μπορούν να ενοποιούνται μεταξύ τους καθώς και με άλλα διαθέσιμα χωρικά δεδομένα. Αυτό επιπλέον θα συμβάλει στην υποστήριξη του κόστους εγκατάστασης των δικτύων γεωαισθητήρων.

Το ιδανικό είναι να δημιουργηθεί ένας ιστός δεδομένων πραγματικού χρόνου από αισθητήρες - 'Ιστός αισθητήρων' - όπου η πρόσβαση στα δεδομένα θα συντελείται με ενιαίο τρόπο όπως στα δεδομένα στον παγκόσμιο ιστό (WWW). Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαίο να οριστούν τυποποιημένες διασυνδέσεις σε υπηρεσίες από αισθητήρες. Το περιβάλλον του 'Ιστού Αισθητήρων' πρέπει να επιτρέπει στους χρήστες να επιλέγουν τα ρεύματα χωρικών δεδομένων αισθητήρων που τους ενδιαφέρουν με βάση διάφορα χαρακτηριστικά όπως η θέση, η χωρική ανάλυση, η αξιοπιστία, η ακρίβεια, ο τύπος αισθητήρα και άλλα και να μπορούν εύκολα αξιοποιώντας τα δεδομένα αυτά να αναπτύσσουν εφαρμογές όπως π.χ. εφαρμογές χαρτογραφίας, ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, εφαρμογές αρχειοθέτησης (archiving) κ.α.. Περαιτέρω παρομοίως όπως στο WWW, ο Ιστός αισθητήρων πρέπει να επιτρέπει στους χρήστες να μπορούν να καταχωρούν και να διαθέτουν τους δικούς τους αισθητήριους πόρους (sensor resources) αρχέτυπης ή έμμεσης

κτήσης εντός του μεριζόμενου περιβάλλοντος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα θέματα κλίμακας για τη διαχείριση και το μερισμό αυτών των μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντικά [2].

Ένα βήμα προς την κατεύθυνση αυτή αποτελεί το SenseWeb της Microsoft [33]. Το SenseWeb είναι ένα peer-based λογισμικό που επιτρέπει στο χρήστη να το εκτελεί τοπικά και από τη μια να διαθέτει δεδομένα αισθητήρων είτε δικά του (τοπικής κτήσης) είτε δεδομένα που είναι διαθέσιμα από άλλους αισθητήρες μέσω του SenseWeb (έμμεσης κτήσης). Το λογισμικό αυτό παρέχει μια χαρτογραφική διασύνδεση για οπτικοποίηση των δεδομένων και διάφορα διαδραστικά εργαλεία για να θέτει κανείς ερωτήματα. Ο χρήστης μπορεί να οπτικοποιεί συγκεκριμένες περιγραφικές ιδιότητες των ρευμάτων δεδομένων από αισθητήρες και να τις οργανώνει σε αντίστοιχα επίπεδα πληροφοριών ('layer'). Για παράδειγμα σε ένα επίπεδο μπορεί να απεικονίζεται η κατανομή μετρήσεων CO₂ (διοξειδίου του άνθρακα) που αφορά την περιοχή μιας πόλης και σε κάποιο άλλο η ποιότητα και η θερμοκρασία του νερού εγγύς στο ανάπτυγμα των ακτών της. Σε αυτό το πλαίσιο παρομοίως αξιοποιώντας αρχέτυπα σύνολα δεδομένων από αισθητήρες μπορεί να τα επεξεργάζεται φτιάχνοντας *χάρτες ισομεγεθών καμπυλών* (contour maps) προς οπτικοποίηση της χωρικής κατανομής και της μεταβλητότητας των δεδομένων. Στα επίπεδα πληροφοριών περαιτέρω μπορεί κανείς να εφαρμόσει επεξεργασίες οπτικής ανάλυσης δεδομένων (visual data analysis) όπως επικάλυψη (overlaid), τμήση (clipped), μεγέθυνση (zoomed). Η διασύνδεση του SenseWeb μοιάζει με το περιβάλλον ενός ΣΓΠ. Επιπλέον παρέχεται εμπιστευτική πρόσβαση στη διαχείριση των δεδομένων αισθητήρων (authentication-based access).

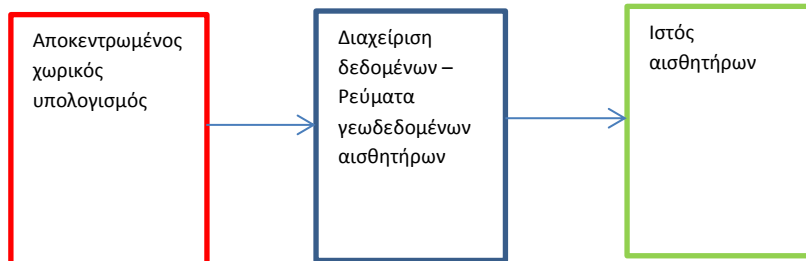
Η εφαρμογή SenseWeb αποδεικνύει περίτρανα ότι τα ρεύματα δεδομένων από αισθητήρες και η ενοποίηση αυτών είναι θέματα ζωτικής σημασίας για το μέλλον της ανάπτυξης και τη μείωση του κόστους εφαρμογής των συστημάτων δικτύων αισθητήρων, αφού πολλοί μετέχοντες αναμένεται να εκδηλώσουν ενδιαφέρον για τα δεδομένα αυτά.

Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι ιδιαίτερα για μεγάλης κλίμακας ενοποίηση δεδομένων από αισθητήρες π.χ. εθνικής ή διεθνούς εμβέλειας καθώς και για τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων πρέπει να αναπτυχθούν *ανοιχτά πρότυπα*. Τα ανοιχτά πρότυπα μπορεί να περιλαμβάνουν στην περίπτωση αυτή την τυποποίηση των διασυνδέσεων για σύνδεση και πρόσβαση σε συσκευές αισθητήρων, την τυποποίηση της αναπαράστασης δεδομένων από αισθητήρες π.χ. με εφαρμογή τεχνολογιών όπως η XML κ.α.. Οι τυποποιήσεις αυτές είναι αναγκαίες για την διαλειτουργικότητα των συστημάτων. Με την παροχή τέτοιου είδους τυποποιημένων διασυνδέσεων καθώς και ανοιχτού λογισμικού θα γίνει εφικτός ο διαμοιρασμός και η πρόσβαση σε δεδομένα αισθητήρων με ενιαίο τρόπο. Έτσι επιστήμονες και άλλοι ενδιαφερόμενοι θα μπορούν να διαμοιράζονται, να εντοπίζουν, να συνδυάζουν, και να θέτουν ερωτήματα σε πραγματικό χρόνο για γεωγραφικές περιοχές σε όλον τον πλανήτη. Η κοινοπραξία OpenGIS έχει καθοδηγήσει την τυποποίηση για αρκετά χρόνια διεπαφών συστημάτων αισθητήρων και αρκετές τυποποιήσεις είναι ήδη διαθέσιμες [35].

Η παραπάνω σειριακή παράταξη των θεμάτων –αποκεντρωμένος χωρικός υπολογισμός, ρεύματα δεδομένων από αισθητήρες και Ιστός αισθητήρων- διαμορφώνει μια λογική εξέλιξη που είναι σύμφωνη κατά κάποιο τρόπο με τις σειριακές λογικές απαιτήσεις της τεχνολογίας. Το εν λόγω μοντέλο, απαιτεί εξειδικευμένες αναλύσεις (αποκεντρωμένος χωρικός υπολογισμός κ.α.). Στη συνέχεια αφού τα συστήματα αρχίσουν να υλοποιούνται και να λειτουργούν το αυξανόμενο ιδιότροπα πλήθος των παραγόμενων δεδομένων από αισθητήρες απαιτεί τρόπους οργάνωσης και διαχείρισης (ρεύματα δεδομένων γεωαισθητήρων). Και όταν παγιωθούν αυτές οι δύο καταστάσεις επόμενο βήμα έχει η εξώθηση των πληροφοριοδομών στον «Ιστό». Στην προκειμένη περίπτωση ο Ιστός αισθητήρων θα αποτελεί μια κατανεμημένη πληροφοριακή βάση στο υπερόνολο του παγκόσμιου ιστού πληροφορίας όπου θα διατίθενται χωρικά δεδομένα από αισθητήρες τα οποία κανείς θα μπορεί να αντλεί αποτελεσματικά και στο χρόνο που παράγονται

(γεωδεδομένα πραγματικού χρόνου) από διάφορους ιστότοπους διάθεσης και να τα αξιοποιεί δομώντας εφαρμογές.

Αυτά όλα εικονίζονται παραστατικά στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2.8)



Σχήμα 2.8 Η πορεία τεχνολογικών απαιτήσεων σε συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μοντελοποίηση δικτύων γεωαισθητήρων

Για να την ανάπτυξη αλγορίθμων προς επίλυση προβλημάτων σε δίκτυα γεωαισθητήρων απαιτείται μοντελοποίηση του συστήματος. Το μοντέλο θα παρέχει την αναπαράσταση και τη συλλογιστική βάση που αφορά τα χαρακτηριστικά των δικτύων γεωαισθητήρων που είναι σημαντικά για την ανάπτυξη διαδικασιών.

Τα χαρακτηριστικά ενός δικτύου γεωαισθητήρων που είναι σημαντικά για την ανάπτυξη αλγορίθμων επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας είναι τα εξής [20]:

- Το σύνολο των κόμβων και η δομή του δικτύου επικοινωνίας που συνδέει τους κόμβους,
- οι γεωγραφικές θέσεις των κόμβων (είτε σχετικές, είτε απόλυτες),
- οι περιβαλλοντικές παράμετροι που ανιχνεύονται ή/και μετρώνται από τον εκάστοτε κόμβο,
- οι αλλαγές σε όλα τα παραπάνω δηλ. στο σύνολο των κόμβων, στο δίκτυο επικοινωνίας, στις θέσεις στο γεωγραφικό χώρο, και στις περιβαλλοντικές παραμέτρους.

Βάση αυτών των χαρακτηριστικών θα παρουσιαστεί στις επόμενες ενότητες η μοντελοποίηση του συστήματος δικτύου γεωαισθητήρων. Το μοντέλο δομείται σε τρία βασικά επίπεδα [20]. Δύο από αυτά κατασκευάζονται από δομές των αμέσως προηγούμενων επιπέδων. Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει τις θεμελιώδεις δομές για την ανίχνευση και τη μετάδοση της πληροφορίας (μοντέλο γειτονιάς). Το δεύτερο επίπεδο, αφορά την επέκταση του μοντέλου ώστε να περιλαμβάνεται η μοντελοποίηση της «θέσης» (εκτεταμένο χωρικό μοντέλο). Στο πρώτο και δεύτερο επίπεδο μοντελοποίησης θεωρείται ότι δεν συντελούνται αλλαγές που να αφορούν το περιβάλλον μήτε το σύστημα. Στο τρίτο επίπεδο εισάγεται η δυναμική στο μοντέλο, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα μοντελοποίησης των αλλαγών στο χρόνο (χωροχρονικό μοντέλο) [20].

3.1 Μοντέλο γειτονιάς (Neighborhood-Based Model)

Σε αυτό το πρώτο επίπεδο μοντελοποίησης αγνοούνται όπως αναφέρθηκε τα χρονικά χαρακτηριστικά των κόμβων του δικτύου και όλα τα χωρικά χαρακτηριστικά πέρα από την συνδεσιμότητα κάθε κόμβου. Στο μοντέλο γειτονιάς υφίστανται οι εξής δομές [20]:

1. Ένα γράφημα $G = (V, E)$, το οποίο μοντελοποιεί το δίκτυο με τη συνδεσιμότητας κάθε κόμβου, όπου V είναι το σύνολο των κορυφών, E είναι το σύνολο των ακμών – δηλ. κάθε ακμή αναπαριστά την ύπαρξη επικοινωνιακής δυνατότητας μεταξύ δύο κόμβων.

2. Μια συνάρτηση $s: V \rightarrow C$, που μοντελοποιεί την τιμή της ανίχνευσης/μέτρησης κάθε κόμβου (sensor function).
3. Μια συνάρτηση $id: V \rightarrow \mathbb{N}$, η οποία μοντελοποιεί τις ταυτότητες ή τα ονόματα για κάθε κόμβο στο δίκτυο (identity function).

Το σύνολο των κορυφών V του γραφήματος αναπαριστά τους κόμβους του δικτύου αισθητήρων. Το σύνολο των ακμών E αναπαριστά άμεσες δηλ. «ενός βήματος» επικοινωνιακές συνδέσεις ανάμεσα σε δύο κόμβους. Ένα μη κατευθυνόμενο γράφημα υφίσταται όταν όλες οι συνδέσεις είναι διπλής κατεύθυνσης. Ένα κατευθυνόμενο γράφημα αφορά περιπτώσεις όπου υφίστανται και επικοινωνιακές συνδέσεις μίας μόνο κατεύθυνσης (π.χ. όταν η άμεση σύνδεση από το u_1 στο u_2 δεν υπονοεί πάντοτε την άμεση δυνατότητα επικοινωνίας από το u_2 στο u_1). Παρακάτω τις περισσότερες φορές θα θεωρείται το γράφημα μη κατευθυνόμενο, παρόλο που στην πραγματικότητα η επικοινωνία που υφίσταται ανάμεσα σε δύο κόμβους δεν είναι πάντοτε αμφίδρομη δηλ. δυνατή και από τις δύο κατευθύνσεις.

Η μόνη χωρική πληροφορία που παρέχεται άμεσα από την μέχρι τώρα μοντελοποίηση είναι αυτή που απορρέει από το ίδιο το γράφημα και αφορά την γειτνίαση (άμεση συνδεσιμότητα) κάθε κόμβου. Η πληροφορία της γειτνίασης μπορεί να αναπαρασταθεί από τη συνάρτηση $nbr: V \rightarrow 2^V$, όπου $nbr(u) = \{u' \in V : (u, u') \in E\}$. Όπως είναι προφανές αυτή η πληροφορία (των γειτόνων κάθε κόμβου) είναι άμεσα διαθέσιμη από το γράφημα G , και η συνάρτηση $nbr(u)$ είναι απλά μια βολική σημειογραφία.

Η συνάρτηση s ονομάζεται *συνάρτηση αισθητήρα* (sensor function) και αναπαριστά τα δεδομένα που ανιχνεύονται από κάθε κόμβο στο δίκτυο αισθητήρων. Το πεδίο τιμών της C εξαρτάται από τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες. Σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται απλά το \mathbb{R} (σύνολο πραγματικών αριθμών) ή το \mathbb{R}^n εάν υπάρχουν n διαφορετικοί αισθητήρες σε κάθε κόμβο. Σε άλλες περιπτώσεις που αφορούν είτε πιο εξελιγμένους αισθητήρες είτε συστοιχίες αισθητήρων μπορεί να υφίστανται άλλου τύπου καθορισμοί συνάρτησης s π.χ. η σχετική υγρασία μετράται ως ποσοστό (0% ως 100%), η ένταση φωτός παρέχεται σε τιμές από 0 lux - πλήρες σκότος έως 100,000 lux - πιο λαμπρή ηλιοφάνεια. Όλες αυτές οι περιπτώσεις μπορούν να μοντελοποιούνται καταλλήλως, τροποποιώντας το πεδίο τιμών της συνάρτησης s . Ένα παράδειγμα πεδίου τιμών συνάρτησης s είναι το $\mathbb{R} \times 0,100 \times \mathbb{R}^+$ που για έναν συγκεκριμένο κόμβο $u \in V$ μπορεί να είναι $s(u) = (-7.8, 58, 600)$ και να σημαίνει θερμοκρασία -7.8°C (κρύο), σχετική υγρασία 58% και ένταση φωτισμού 600 (τυπική τιμή φωτισμού σε εσωτερικό χώρο).

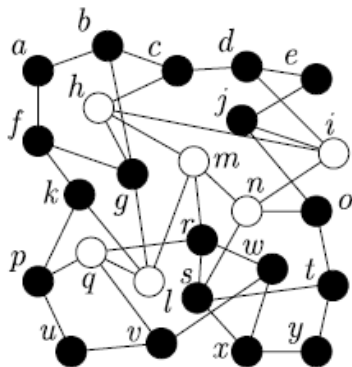
Τέλος, η συνάρτηση $id: V \rightarrow \mathbb{N}$, ονομάζεται η *συνάρτηση αναγνωριστικού* (identifier function) και αναπαριστά τις ταυτότητες ή τα ονόματα των κόμβων στο δίκτυο αισθητήρων. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, το σύνολο των ονομάτων ή των αναγνωριστικών μπορεί να αναπαρίσταται από το σύνολο των φυσικών αριθμών \mathbb{N} (δηλ. το $\{1, 2, 3, \dots\}$). Για παράδειγμα για κάποιον κόμβο $u \in V$, $id(u) = 5$ καθορίζει ότι η ταυτότητα του u είναι το 5. Σε αρκετές (αλλά όχι σε όλες) τις περιπτώσεις, είναι επιθυμητά μοναδικά αναγνωριστικά. Αυτός ο περιορισμός μοναδικότητας μπορεί να παρασταθεί με τον καθορισμό της συνάρτησης id ως 1-1, δηλ. ως μιας αμφιμονοσήμαντης αντιστοιχίας όπου κάθε στοιχείο του \mathbb{N} αντιστοιχεί το πολύ σε ένα στοιχείο $u \in V$.

Στο επόμενο πίνακα συνοψίζονται τα εργαλεία της μέχρι τώρα μοντελοποίησης (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1 Οι βασικές δομές μοντελοποίησης δικτύου γεωαισθητήρων

Τυπικός ορισμός	Περιγραφή
$G = (V, E)$	Γράφημα συνδεσιμότητας ή δικτύου αισθητήρων
V	Σύνολο κόμβων δικτύου αισθητήρων
E	Σύνολο επικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των κόμβων του δικτύου αισθητήρων
$nbr : V \rightarrow 2^V$	Συνάρτηση γειτονιάς: η $nbr(u)$ αναπαριστά το σύνολο των κόμβων που γειτονεύουν (συνδέονται άμεσα) με τον u
$s : V \rightarrow \mathbb{R}$	Συνάρτηση αισθητήρα: η $s(u) = 10.3$ αναπαριστά μια μέτρηση του αισθητήρα με τιμή 10.3
$id : V \rightarrow \mathbb{N}$	Συνάρτηση αναγνωριστικού κόμβου

Ένα παράδειγμα μοντελοποίησης μέσω των παραπάνω εργαλείων φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.1), όπου θεωρείται ότι κάθε κόμβος μπορεί να ανιχνεύει μία bool τιμή (0 - άσπρο, 1 - μαύρο). Η συνάρτηση αισθητήρα καθορίζεται ως $s : V \rightarrow \{ \text{άσπρο, μαύρο} \}$ και η συνάρτηση αναγνωριστικού ως $id(a)=1, id(b)=2, id(c)=3$ κοκ (κάθε γράμμα a, b, c, d, \dots αντιστοιχίζεται σε έναν μοναδικό φυσικό αριθμό).



Σχήμα 3.1 Μοντέλο γειτονιάς δικτύου γεωαισθητήρων [20].

Η μόνη χωρική πληροφορία που είναι άμεσα διαθέσιμη για το δίκτυο από το μοντέλο γειτονιάς (Σχήμα 3.1) είναι αυτή που αφορά τους γειτονικούς κόμβους, ως άμεση συνέπεια του καθορισμού του γραφήματος συνδεσιμότητας G . Για παράδειγμα $nbr(g) = \{ b, f, h, l \}$ και $nbr(o) = \{ j, n, t \}$.

3.2 Εκτεταμένο χωρικό μοντέλο

Η επέκταση του μοντέλου γειτονιάς – εκτεταμένο χωρικό μοντέλο - περιέχει πέρα από την χωρική πληροφορία της ‘γεινιάσης’, και την χωρική πληροφορία της θέσης των κόμβων. Η

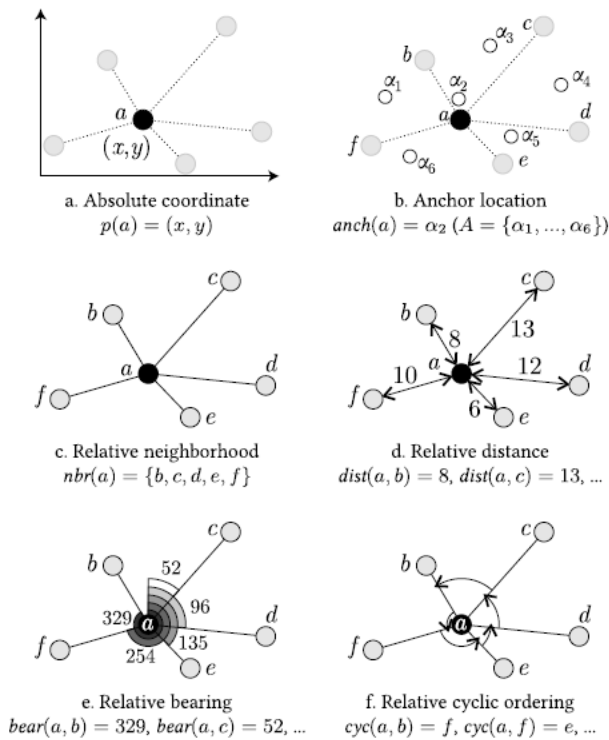
μοντελοποίηση σε αυτό το σημείο περιπλέκεται από το γεγονός ότι είναι διαθέσιμες πολλές διαφορετικού τύπου πληροφορίες θέσης οι οποίες δύναται να αφορούν έναν κόμβο δικτύου γεωαισθητήρων. Ο καθορισμός των θέσεων των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων καλείται εντοπισμός (localization) και δε σημαίνει κατ' ανάγκη γεωδαιτικός εντοπισμός δηλ. καθορισμός θέσεων σε επίπεδο γεωδαιτικών συντεταγμένων. Ο εντοπισμός μπορεί να αφορά λιγότερο ακριβείς καθορισμούς θέσεων, είτε ποσοτικούς όπως σχετικές αποστάσεις ή γωνιακές αποστάσεις, είτε αμιγώς ποιοτικούς όπως εγγύτητα ενός κόμβου προς άλλους κόμβους ή άλλες γνωστές τοποθεσίες. Ο εντοπισμός είναι μια εξαιρετικά ενεργή περιοχή έρευνας. Γενικά, οι τεχνικές εντοπισμού μπορούν να ταξινομηθούν σε παθητικές ή ενεργητικές τεχνικές [34]. Οι ενεργητικές τεχνικές βασίζονται σε ενεργό μετάδοση σημάτων (σήματα στην περιοχή των ραδιοσυχνότητων ή υπέρηχους). Οι παθητικές τεχνικές δεν απαιτούν την ενεργό μετάδοση σημάτων. Σε αυτήν την περίπτωση οι συσκευές απλά ανιχνεύουν με "φυσικό" τρόπο τα διάφορα σήματα. Παραδείγματα ενεργητικής τεχνικής εντοπισμού είναι το GPS, το Ραντάρ, το Σόναρ, ενώ παθητικής ο προσδιορισμός μιας απόστασης από την ανάλυση εικόνας. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στο [35].

Περαιτέρω μια θέση μπορεί να είναι απόλυτη ή σχετική ανάλογα με το εάν αναφέρεται σε ένα εξωτερικό σύστημα αναφοράς είτε σε μία θέση ενός άλλου κόμβου στο δίκτυο.

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3.2) όπως και στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 3.2) φαίνονται οι νέες δομές της μοντελοποίησης (επεκταμένο χωρικό μοντέλο) και αφορούν τους 5 πιο κοινούς τύπους πληροφορίας θέσης που μπορεί να υφίστανται για κόμβους αισθητήρων.

Πίνακας 3.2 Οι πιο κοινί τύποι καθορισμού πληροφοριών θέσης σε δίκτυα γεωαισθητήρων

Τύπος εντοπισμού	Πληροφορία θέσης	Ορισμός	Περιγραφή
Σχετικός εντοπισμός	Απόσταση	$\text{dist} : E \rightarrow \mathbb{R}$	Η $\text{dist}(u, u')$ δηλώνει την απόσταση ενός κόμβου u από τον u' , με $(u, u') \in E$.
	Γωνιακή απόσταση	$\text{bear} : E \rightarrow \mathbb{R}$	Η $\text{bear}(u, u')$ δηλώνει την γωνιακή απόσταση ενός κόμβου u από τον u' , με $(u, u') \in E$.
	Κυκλική διάταξη	$\text{cyc} : E \rightarrow V$	$\text{cyc}(u, u')$ αναφέρεται στην κυκλική διάταξη σε αντιωρολογιακή φορά ενός κόμβου u από τον u' , με $(u, u') \in E$.
Απόλυτος εντοπισμός	Συντεταγμένες	$p : V \rightarrow \mathbb{R}^n$	$p(u)$, δηλώνει την θέση σε συντεταγμένες.
	Σημεία Αγκίστρωσης	$\text{anch} : V \rightarrow A$	Η $\text{anch}(a)$ δηλώνει το εγγύτερο σημείο αγκίστρωσης του a .



Σχήμα 3.2 Διάφοροι τύποι καθορισμού πληροφοριών θέσης [20].

Όπως μπορεί να συνάγει κανείς παρατηρώντας τα σχήματα αυτά είναι δυνατόν κάποιος τύπος καθορισμού θέσης να οδηγή μέσω υπολογισμού σε κάποιου άλλου τύπου καθορισμού θέσης.

Παράδειγμα εκτεταμένου χωρικού μοντέλου

Ένα παράδειγμα εκτεταμένου χωρικού μοντέλου φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.3). Ο τρόπος απεικόνισης φανερώνει ότι οι κόμβοι είναι πλέον διατεταγμένοι και μάλιστα σε τετραγωνική διάταξη. Στο μοντέλο αυτό μπορεί κανείς να έχει πρόσβαση σε όλους τους τύπους καθορισμού πληροφοριών θέσης των κόμβων όπως περιγράφηκαν προηγουμένως (σχετικές και απόλυτες). Θεωρώντας για το παράδειγμα ότι κάθε ακμή έχει μήκος 1 μονάδα, εξάγονται τα εξής:

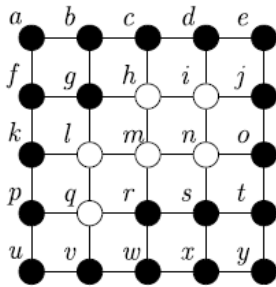
- η απόσταση $dist : E \rightarrow \mathbb{R}$ είναι $dist(u_1, u_2) = 1$,
- η γωνιακή απόσταση $bear : E \rightarrow \mathbb{R}$ είναι:

$$bear(u_1, u_2) = \begin{cases} 0 & \text{εάν } id(u_2) < id(u_1) - 1 \\ 90 & \text{εάν } id(u_2) = id(u_1) + 1 \\ 180 & \text{εάν } id(u_2) = id(u_1) - 1 \\ 270 & \text{εάν } id(u_2) > id(u_1) + 1 \end{cases}$$

- η κυκλική διάταξη είναι $\text{cyc} : E \rightarrow V$, $\text{cyc}(a,b)=f$, $\text{cyc}(a,f)=b$, $\text{cyc}(b, a) = g$, $\text{cyc}(b, g) = c$, $\text{cyc}(b, c) = a$ κοκ.

Εάν επιπλέον θεωρηθεί έναν επίπεδο σύστημα συντεταγμένων με αρχή τον κόμβο u , η θέση περαιτέρω κάθε κόμβου μπορεί να καθοριστεί ως εξής:

- μέσω μιας συνάρτησης $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$, ως $p(a) = (0, 5)$, $p(b) = (1, 5)$, $p(c) = (2, 5)$, \dots , $p(y) = (5, 0)$.



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα στο εκτεταμένο χωρικό μοντέλο [20]

Τέλος σημειώνεται ότι από την πληροφορία της συνάρτησης p μπορεί να υπολογίζονται όλοι οι άλλοι καθορισμοί πληροφοριών θέσης.

3.3 Χωροχρονικό μοντέλο

Στο πρώτο και δεύτερο επίπεδο μοντελοποίησης (μοντέλο γειτονιάς και επεκταμένο χωρικό μοντέλο) θεωρήθηκε ότι δεν συμβαίνουν αλλαγές μήτε στο περιβάλλον μήτε στο σύστημα.

Όμως τα δίκτυα αισθητήρων τις περισσότερες φορές εφαρμόζονται για περιπτώσεις που αφορούν ιδιαίτερα δυναμικές καταστάσεις είτε στο περιβάλλον είτε στο σύστημα. Τέτοιου είδους καταστάσεις αντιμετωπίζονται με κατάλληλη επέκταση στη μοντελοποίηση – Χωροχρονικό μοντέλο – όπου λαμβάνεται υπόψη η διάσταση του χρόνου με τις υποκείμενες αλλαγές που μπορεί να συμβαίνουν σε ένα σύστημα δικτύου γεωαισθητήρων.

Τρεις σημαντικοί τύποι χαρακτηριστικών αλλαγών για την ανάπτυξη υπολογιστικών διαδικασιών είναι οι εξής:

- **Περιβαλλοντική δυναμική:** Τα δίκτυα γεωαισθητήρων συνήθως είναι επιφορτισμένα με την ανίχνευση-μέτρηση μιας γεωγραφικής πραγματικότητας η οποία υπόκειται σε ταχτικές αλλαγές.
- **Κινητικότητα Κόμβων:** Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι κινητοί πράγμα που σημαίνει ότι η θέση τους μπορεί να αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Η κινητικότητα των κόμβων μπορεί να προκληθεί από κίνηση του ξενιστή τους (οντότητα από την οποία μεταφέρονται ή βρίσκονται ενσωματωμένοι). Ο ξενιστής μπορεί να είναι άνθρωπος, όχημα, ζώο, ρομπότ, άνεμος, κύματα κ.α..

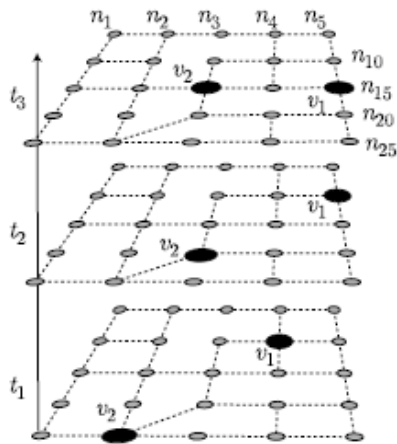
• **Πητικότητα Κόμβων:** Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι ευμετάβλητοι, με την έννοια ότι μπορούν να ενεργοποιούνται ή να απενεργοποιούνται με την πάροδο του χρόνου για διάφορους λόγους. Η ενεργοποίηση-απενεργοποίηση μπορεί να συντελείται σκόπιμα και να ελέγχεται από άλλους κόμβους του δικτύου ή να προκαλείται από αστοχίες υλικού ή/και λογισμικού, εξάντληση ενεργειακών πόρων, είσοδο νέων κόμβων στο δίκτυο κ.α.. Η κινητικότητα μπορεί να θεωρηθεί σαν μια ειδική περίπτωση πητικότητας, όπου κόμβοι απενεργοποιούνται και επανενεργοποιούνται σε νέες θέσεις.

Για την μοντελοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών απαιτείται η εισαγωγή στο μοντέλο της διάστασης του χρόνου, ώστε να ληφθούν επιπρόσθετα υπόψιν όλες οι παραπάνω αλλαγές που μπορούν να συμβαίνουν στο περιβάλλον είτε στο σύστημα ενός δικτύου γεωαισθητήρων. Στον επόμενο πίνακα φαίνεται οι απαιτούμενες επεκτάσεις (Πίνακας 3.3). Το μοντέλο είναι πλέον χωροχρονικό. Η μόνη δομή που δεν αλλάζει είναι η συνάρτηση αναγνωριστικού καθ' όσον οι ταυτότητες των κόμβων θεωρούνται σταθερές στο χρόνο.

Πίνακας 3.3 Δομές χωρικού και χωροχρονικού μοντέλου δικτύου γεωαισθητήρων

Χωρικό Μοντέλο	Χωροχρονικό Μοντέλο	Άτυπη περιγραφή
$s : V \rightarrow \mathbb{R}$	$s : V \times T \rightarrow \mathbb{R}$	$s(u,t)$ είναι η τιμή της ανιχνεύσιμης ιδιότητας από τον κόμβο u σε χρόνο t .
$p : V \rightarrow \mathbb{R}^3$	$p : V \times T \rightarrow \mathbb{R}^3$	$p(u,t)$ είναι οι συντεταγμένες του κόμβου u σε χρόνο t .
$anch : V \rightarrow V_{anch}$	$anch : V \times T \rightarrow V_{anch}$	$anch(u,t)$ είναι τα εγγύτερα σημεία αγκίστρωσης σε χρόνο t .
$nbr : V \rightarrow 2^V$	$nbr : V \times T \rightarrow 2^V$	$nbr(u,t)$ είναι το σύνολο των γειτόνων σε χρόνο t .
$dist : E \rightarrow \mathbb{R}$	$dist : E \times T \rightarrow \mathbb{R}$	$dist(u,u',t)$ είναι η απόσταση των κόμβων u και u' σε χρόνο t .
$bear : E \rightarrow \mathbb{R}$	$bear : E \times T \rightarrow \mathbb{R}$	$bear(u,u',t)$ είναι η γωνιακή απόσταση των κόμβων u και u' σε χρόνο t .
$cyc : E \rightarrow V$	$cyc : E \times T \rightarrow \mathbb{R}$	$cyc(u,u',t)$ είναι ο επόμενος κόμβος μετά των u' σε κυκλική διάταξη αντιωρολογιακής φοράς με κέντρο το u , σε χρόνο t .
$G = (V,E)$	$G(t) = (V,E(t))$	Γράφημα συνδεσιμότητας με χρονικά μεταβαλλόμενες συνδέσεις, $E(t)$ σημαίνει ότι σύνολο συνδέσεων αλλάζει με το χρόνο.
$G = (V,E)$	$G(t) = (V(t),E(t))$	Γράφημα συνδεσιμότητας με χρονικά μεταβαλλόμενες συνδέσεις και κόμβους, όπως το προηγούμενο επιπρόσθετα αλλάζει και το σύνολο κόμβων $V(t)$.

Ένα παράδειγμα χωροχρονικού μοντέλου δικτύου γεωαισθητήρων απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου κανείς διακρίνει την κινητικότητα των κόμβων (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Παράδειγμα χωροχρονικού μοντέλου δικτύου [20].

3.4 Μερική και αβέβαιη γνώση

Οι τυπικές δομές που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες παρέχουν ένα γενικό πλαίσιο για την μοντελοποίηση δικτύων γεωαισθητήρων. Ωστόσο παραλείπονται δύο σημαντικά σημεία [20]:

1. Μερική γνώση: Σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων κάθε κόμβος κατέχει αρχικώς μόνο μερική γνώση, δηλαδή δεν γνωρίζει τη συνολική κατάσταση του συστήματος. Κάθε πληροφορία που δεν είναι διαθέσιμη σε έναν κόμβο εάν υφίσταται ανάγκη απόκτησής της, πρέπει να μεταδοθεί (κοινοποιηθεί) από άλλους κόμβους που την κατέχουν στο δίκτυο. Το σημείο αυτό πρέπει να μοντελοποιηθεί.
2. Αβέβαιη γνώση: Ένα εγγενές χαρακτηριστικό ενός συστήματος συλλογής χωρικών δεδομένων είναι η ύπαρξη της αβεβαιότητας στις μετρήσεις. Και το στοιχείο αυτό δεν πρέπει να λείπει από την μοντελοποίηση.

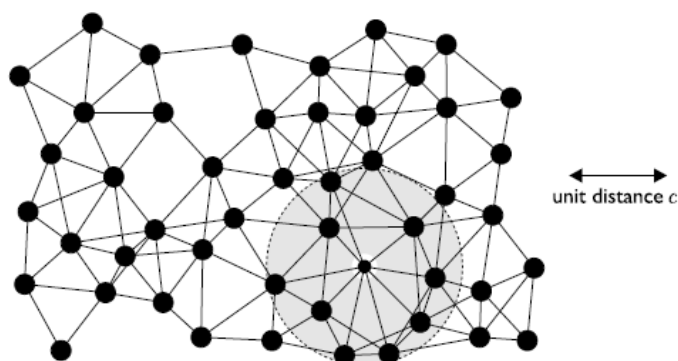
Το ζήτημα της μερικής γνώσης εισάγεται στο μοντέλο ορίζοντας για κάθε καθολική συνάρτηση f αντίστοιχα την \hat{f} που σημαίνει την τοπική f για κάποιο κόμβο $\circ \in V$. Έτσι αναφέρεται κανείς στην τοπική γνώση του κόμβου π.χ. $\hat{s} = 10$ στο καθορισμό ενός αλγορίθμου σημαίνει το τοπικό s . Το ζήτημα της αβέβαιης γνώσης δε θα αντιμετωπιστεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

3.5 Καθορισμός περιορισμών στην κίνηση της πληροφορίας σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων

Περιορισμοί στην κίνηση της πληροφορίας από έναν κόμβο σε κάποιον άλλο μπορούν να καθοριστούν μέσω του γραφήματος συνδεσιμότητας. Διαφορετικοί περιορισμοί στην κίνηση της πληροφορίας μπορούν να καθοριστούν με τους ακόλουθους τρόπους [20]:

3.5.1 Γράφημα μονάδας κύκλου (Unit Disk graph – UDG)

Η δομή αυτή καθορίζει περιορισμούς κίνησης, θεωρώντας ότι κάθε κόμβος μπορεί να μεταδίδει στην ίδια εμβέλεια έστω c ('μοναδιαία απόσταση'). Αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο πρακτικό βάση των φυσικών περιορισμών που επιβάλλονται από την ισχύ επικοινωνίας στη ραδιοσυχνότητα. Μέσω της c δύναται να καθοριστούν οι ακμές συνδεσιμότητας από ένα αρχικό σύνολο κόμβων με δεδομένες τις θέσεις τους στο χώρο. Κάθε κόμβος συνδέεται μόνο με τους κόμβους που βρίσκονται εντός κύκλου ακτίνας c και κέντρο τον κόμβο. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται ένας τέτοιος προσδιορισμός (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Γράφημα μονάδας κύκλου (Unit Disk graph) [20].

Γενικώς, για ένα δεδομένο σύνολο κόμβων, με θέσεις $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$ και απόσταση c , το γράφημα UDG τυπικά ορίζεται ως εξής:

$$UDG = (V, \{ (u, v) \mid (u, v) \in V \text{ και } 0 < \delta(p(u), p(v)) \leq c \})$$

όπου $\delta(a, b)$ η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των σημείων a και b .

Είναι σημαντικό να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι το UDG αποτελεί ένα γράφημα συνδεσιμότητας που προκύπτει από τους φυσικούς περιορισμούς της ισχύος επικοινωνίας. Γι' αυτό το λόγο το UDG θεωρείται συχνά η προεπιλεγμένη δομή συνδεσιμότητας για ένα δίκτυο ακόμη και εάν δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί η θέση των κόμβων (δηλ. η συνάρτηση καθορισμού θέσης $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$ είναι άγνωστη, δεν υφίσταται η δυνατότητα εντοπισμού των κόμβων με οποιονδήποτε τρόπο). Με άλλα λόγια, το γράφημα UDG θεωρείται ότι προκύπτει από τις πραγματικές θέσεις των κόμβων στο γεωγραφικό χώρο, παρότι οι θέσεις αυτές μπορεί να είναι άγνωστες.

Στον παραπάνω ορισμό του γραφήματος UDG λήφθηκαν σιωπηρά δύο παραδοχές οι οποίες είναι οι εξής:

- δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων
- ενιαία εμβέλεια λήψης και εκπομπής για κάθε κόμβο του δικτύου

Στην πράξη ωστόσο οι παραδοχές αυτές δύναται να μην ισχύουν. Περιβαλλοντικές συνθήκες όπως τοπογραφία της περιοχής εφαρμογής, φυσικοί περιορισμοί όπως ενεργειακοί πόροι κόμβων μπορεί να επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην επικοινωνιακή δυνατότητα των κόμβων, ώστε να μην είναι όμοια. Το γράφημα UDG ωστόσο θέτει μία οριογραμμή στην επικοινωνιακή δυνατότητα των κόμβων ενός δικτύου γεωαισθητήρων, διότι όλοι οι άλλοι έγκυροι καθορισμοί περιορισμών κίνησης είναι επικαλυπτικά υπογραφήματα²⁰ (spanning subgraphs) με το γράφημα UDG. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική διότι ένα γράφημα συνδεσιμότητας που δεν είναι επικαλυπτικό υπογράφημα του UDG περιέχει κατ' ανάγκη 1 ή περισσότερες ακμές που δεν ανήκουν στο UDG. Έτσι δεν υπάρχει δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας μεταξύ όλων των κόμβων που στο προκείμενο γράφημα απεικονίζονται συνδεδεμένοι.

Μεταβάλλοντας την ακτίνα c μπορεί κανείς να καθορίσει τη συνδεσιμότητα σε ένα σύνολο κόμβων ενός γραφήματος (δηλ. την τοπολογία χωρικών σχέσεων γειννίας και συνδεσιμότητας). Στο ένα άκρο όταν η c είναι πολύ μεγάλη, το γράφημα είναι πλήρες συνδεδεμένο δηλ. δεν υφίστανται χωρικοί περιορισμοί στην κίνηση της πληροφορίας, αφού όλες οι κορυφές συνδέονται μεταξύ τους. Στο άλλο άκρο υφίσταται ένα ελάχιστο c για το οποίο το γράφημα παραμένει *συνεκτικό* (υφίσταται ένα μονοπάτι από κάθε κόμβο σε κάποιον άλλο). Σε αυτή την περίπτωση η c ονομάζεται *κρίσιμο διάστημα μετάδοσης* (CRT – critical transmission range) και το UDG γράφημα που αντιστοιχεί σε αυτήν την c ονομάζεται *ελάχιστο γράφημα συνδεσιμότητας* (MRG - minimum radius graph). Περαιτέρω μείωση της c οδηγεί σε μη συνεκτικό γράφημα. Όπως γίνεται φανερό το MRG παρέχει έναν καθορισμό γραφήματος για τον οποίο υφίσταται η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας για ασύρματη επικοινωνία εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι δηλ. μπορούν να επικοινωνούν είτε άμεσα είτε έμμεσα. Στην πράξη βέβαια τα ασύρματα συστήματα λειτουργούν πλεονασματικά σε υψηλότερη c από το CRT για λόγους ευστάθειας του συστήματος επικοινωνίας.

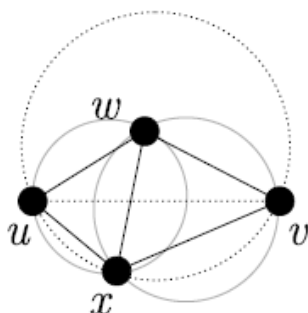
3.5.2 Επίπεδα γραφήματα

Στα δίκτυα γεωαισθητήρων σημαντικό για τους αλγορίθμους είναι το γράφημα συνδεσιμότητας να είναι επίπεδο [20]. *Επίπεδο* είναι ένα γράφημα όταν μπορεί να αναπτυχθεί στο επίπεδο δίχως να υφίστανται διασταυρούμενες ακμές πέρα από τις διασταυρώσεις στους κόμβους. Παρακάτω περιγράφονται διάφορα είδη επίπεδων γραφημάτων που είναι επικαλυπτικά υπογραφήματα του γραφήματος UDG και χρησιμοποιούνται στους αλγορίθμους δικτύων γεωαισθητήρων.

²⁰ Ένα επικαλυπτικό υπογράφημα είναι ένα γράφημα που περιλαμβάνει όλους του αρχικούς κόμβους αλλά μόνο ένα υποσύνολο των ακμών του αρχικού γραφήματος. Τυπικά, για ένα γράφημα $G=(V,E)$, επικαλυπτικό υπογράφημα είναι το $G'=(V,E')$ εάν $E' \subseteq E$.

3.5.2.1 Τριγωνισμός Delaunay

Ένας τριγωνισμός²¹ είναι ένα μέγιστο επίπεδο γράφημα. Αυτό σημαίνει ότι η επιπλέον προσθήκη μιας τυχαίας ακμής θα μετατρέψει το γράφημα σε 'μη επίπεδο'. Για ένα δεδομένο σύνολο κορυφών υπάρχουν πολλά δυνατά μέγιστα επίπεδα γραφήματα. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέγιστο επίπεδο γράφημα, είναι ο τριγωνισμός Delaunay. Ο τριγωνισμός Delaunay έχει την καθοριστική ιδιότητα ότι σε κάθε περιγράψιμο κύκλο σε τρίγωνο κορυφών δεν περιέχονται άλλες κορυφές εντός του κύκλου. Η ιδιότητα αυτή εξασφαλίζει ότι το γράφημα αυτό έχει τα μεγαλύτερα τρίγωνα από κάθε άλλο τριγωνισμό. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Ο τριγωνισμός Delaunay είναι μια σημαντική δομή στην επιστήμη της Γεωπληροφορικής με πάρα πολλές εφαρμογές και άρθρα στην βιβλιογραφία [20].

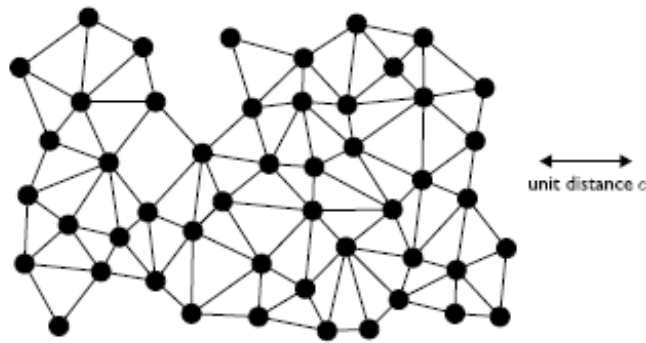


Σχήμα 3.6 Τριγωνισμός Delaunay [20].

Δυστυχώς, ο τριγωνισμός Delaunay όπως και οποιαδήποτε μέγιστο επίπεδο υπογράφημα δεν είναι εγγυημένα υπογραφήματα του UDG. Ένα μέγιστο επίπεδο γράφημα μπορεί να έχει αυθαίρετα μεγάλες ακμές, π.χ. ένα σύνολο κορυφών σε σχήμα μισοφέγγαρου. Κάθε δυνατός τριγωνισμός σε αυτά τα σημεία θα περιλαμβάνει υποχρεωτικά μια ακμή μεταξύ των δύο ακρών της ημισελήνου. Στα δίκτυα αισθητήρων αυθαίρετα μεγάλες ακμές μεταφράζονται σε μεγάλες ποσότητες απαιτούμενης ενέργειας για την άμεση σύνδεση μεταξύ αυτών των δύο κόμβων κάτι ουσιαστικά απαγορευτικό [20].

Για ένα δεδομένο σύνολο κορυφών, ο μοναδιαίος τριγωνισμός Delaunay (UDT) είναι η τομή του UDG και του τριγωνισμού Delaunay, δηλαδή, το γράφημα που σχηματίζεται από τις ακμές που περιέχονται στο UDG και στο τριγωνισμό Delaunay. Στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται ο UDT που έχει παραχθεί από το γράφημα UDG του σχήματος 3.5. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στο γράφημα UDT του σχήματος μπορεί κανείς να προσθέσει αρκετές ακμές χωρίς να καταλήξει σε μη επίπεδο γράφημα. Αυτό σημαίνει ότι το UDT κατ' ουσίαν δεν είναι τριγωνισμός.

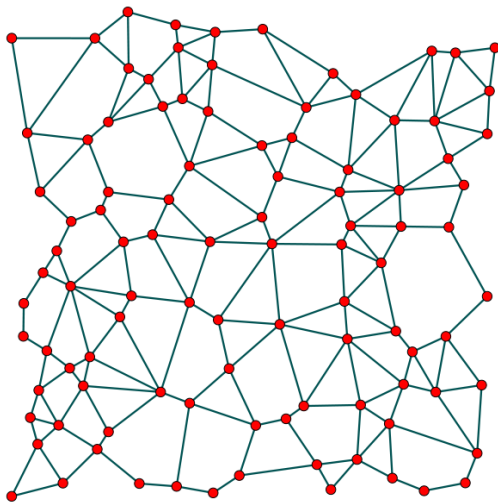
²¹ Τριγωνισμός- τριγωνοποίηση: καθορισμός τριγώνων από ένα σύνολο κορυφών δηλ. προσθέτοντας ακμές.



Σχήμα 3.7 Παράδειγμα μοναδιαίου τριγωνισμού Delaunay (UDT) [20].

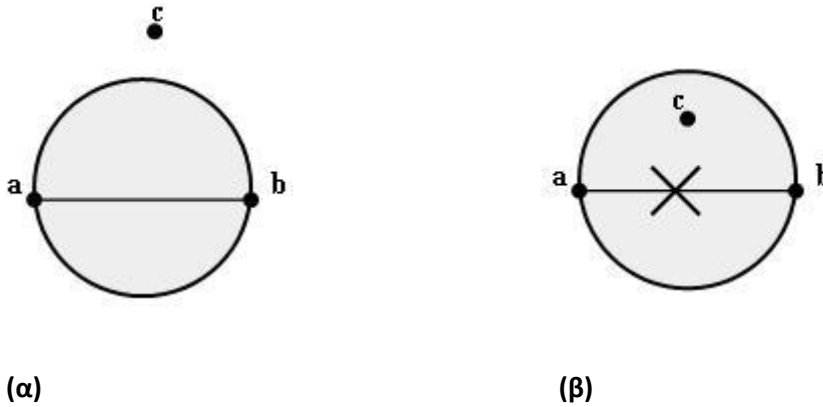
3.5.2.2 Γράφημα του Γαβριήλ (Gabriel Graph – GG)

Το γράφημα του Γαβριήλ ενός συνόλου σημείων S στο Ευκλείδειο επίπεδο εκφράζει κατά μία έννοια σχέσεις ουσιαστικής προσέγγισης ή εγγύτητας (proximity or nearness) μεταξύ των εν λόγω σημείων. Διαισθητικά δύο σημεία συνδέονται μεταξύ τους εάν δεν υπάρχουν άλλα σημεία που θα επέφεραν περισσότερο «εγγύτερες σχέσεις» στο σύνολο, δηλ. τα εν λόγω σημεία να βρίσκονται εγγύτερα μεταξύ τους από οποιοσδήποτε άλλες δυνατές σχέσεις σύνδεσης των δύο σημείων με άλλα σημεία του συνόλου. Ένα γράφημα Γαβριήλ φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8 Ένα γράφημα Γαβριήλ

Τυπικά ορίζεται ως το γράφημα με ένα σύνολο κορυφών S όπου κάθε δύο κορυφές a, b με $a \neq b$ (διακριτές) στο S συνδέονται εάν και μόνο κείνται στα άκρα διαμέτρου κύκλου εντός του οποίου δεν βρίσκεται ουδεμία κορυφή που ανήκει στο σύνολο S (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 (α) Τα σημεία a και b συνδέονται στο γράφημα του Γαβριήλ εφόσον το σημείο c βρίσκεται έξω από το κύκλο με άκρα διαμέτρου τα σημεία.
 (β) Τα σημεία a και b δεν συνδέονται στο γράφημα του Γαβριήλ γιατί εντός του εν λόγω κύκλου βρίσκεται σημείο c.

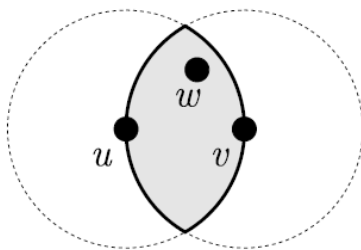
Το γράφημα του Γαβριήλ (GG) έχει την ιδιότητα ότι υπάρχει μια ακμή μεταξύ δύο κόμβων $u, v \in V$ μόνο αν δεν υπάρχει κόμβος $w \in V$, έτσι ώστε η γωνία που σχηματίζεται UWV να είναι μεγαλύτερη από 90° . Αυτή η κατάσταση μπορεί να οριστεί κομψά χρησιμοποιώντας το πυθαγόρειο θεώρημα (όπου E_{UDG} είναι το σύνολο των ακμών στο UDG για μια δεδομένη απόσταση απόσταση). Έτσι,

$$GG = (V, \{(u, v) \in E_{UDG} \mid \text{για κάθε } w \in V, \delta(p(u), p(w))^2 + \delta(p(w), p(v))^2 \geq \delta(p(u), p(v))^2\})$$

Γενίκευση των γραφημάτων Γαβριήλ σε μεγαλύτερες διαστάσεις επιτυγχάνεται με την αναγωγή των «κενών» κύκλων π.χ. σε «κενές» σφαίρες κοκ.. Περαιτέρω το γράφημα του Γαβριήλ είναι ένα υπογράφημα του τριγωνισμού Delaunay και μπορεί να βρεθεί σε γραμμικό χρόνο αν ο τριγωνισμός Delaunay είναι δεδομένος. Τα γραφήματα αυτά ονομάστηκαν έτσι προς τιμή του K.R. Gabriel, ο οποίος τα παρουσίασε σε μια δημοσίευση μαζί με τον R. Sokal το 1969 [37].

3.5.2.3 Σχετικό γράφημα γειτονιάς (Relative neighborhood graph)

Το σχετικό γράφημα γειτονιάς (RNG) έχει την ιδιότητα δύο κόμβοι $u, v \in V$ να μην συνδέονται εάν υπάρχει ένας άλλος κόμβος $w \in V$ που είναι εγγύτερα στον u και στον v από ότι οι κόμβοι u και v μεταξύ τους (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 Ασύνδετοι κόμβοι σε ένα γράφημα RNG u, v λόγω ύπαρξης εγγύτερου κόμβου w [20]

Τυπικά,

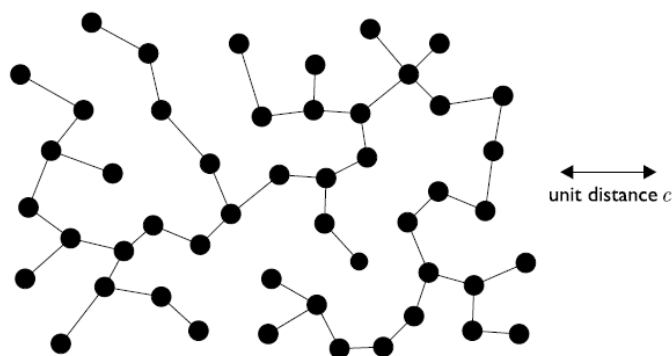
$$\text{RNG} = (V, \{(u, v) \in E_{\text{UDG}} \mid \text{για κάθε } w \in V, \delta(p(u), p(w)) \geq \delta(p(u), p(v)) \text{ ή } \delta(p(w), p(u)) \geq \delta(p(u), p(v))\}).$$

Το γράφημα του Gabriel (GG) όπως και το σχετικό γράφημα γειτονιάς (RNG) είναι επικαλυπτικά υπογραφήματα του UDG. Περαιτέρω το RNG είναι και επικαλυπτικό υπογράφημα του GG. Δηλ. για κάθε σύνολο κόμβων ισχύει η σχέση υπαγωγής:

$$\text{RNG} \subseteq \text{GG} \subseteq \text{UDG}.$$

3.5.2.4 Δένδρα

Ένα δένδρο είναι ένα γράφημα, όπου κάθε ζεύγος κορυφών συνδέεται ακριβώς με ένα μοναδικό μονοπάτι (αλληλουχία γειτονικών κόμβων). Δηλαδή δεν υπάρχουν κύκλοι σε ένα δέντρο. Ένα δέντρο φαίνεται στο σχήμα 3.11. Για ένα δεδομένο γράφημα υπάρχουν πολλά επικαλυπτικά δένδρα. Ο ακριβής αριθμός μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας ένα αποτέλεσμα από τη θεωρία γραφημάτων που ονομάζεται *matrix tree theorem*. Ένα ειδικό επικαλυπτικό δένδρο είναι το ελάχιστο επικαλυπτικό δένδρο το οποίο ορίζεται μονοσήμαντα. Το ελάχιστο επικαλυπτικό δένδρο είναι ένα επικαλυπτικό δένδρο που έχει το μικρότερο δυνατό συνολικό μήκος ακμών.



Σχήμα 3.11 Ένα δένδρο, που είναι και ελάχιστο επικαλυπτικό δένδρο του γραφήματος του Σχήματος 3.5 [20]

Τα δέντρα χρησιμοποιούνται συνήθως επειδή παρέχουν μια βολική δομή γειτονιάς για τις υπολογιστικές διαδικασίες στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ένα δέντρο με καθορισμένο κόμβο ως ρίζα, οι ακμές του έχουν ένα φυσικό προσανατολισμό προς ή πέρα από τη ρίζα. Όπως θα φανεί στα επόμενα αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να είναι χρήσιμο στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων διαδικασιών, δεδομένου ότι παρέχει μια φυσική δομή για τη συνάθροιση (aggregating) και συγκέντρωση (centralizing) των δεδομένων.

Τέλος αξίζει να επισημανθεί ότι υπάρχουν αρκετά χαρακτηριστικά που απουσιάζουν από την προηγούμενη παρουσίαση μοντελοποίησης όπως:

- Ετερογένεια Κόμβων, όπου οι θεωρούμενοι κόμβοι έχουν διαφορετικές χωρικές και περιβαλλοντικές ικανότητες ανίχνευσης και συνδυάζονται στο ίδιο δίκτυο.

- Η τρίτη διάσταση (z) απουσιάζει στα προηγούμενα μοντέλα. Η επέκταση των αλγορίθμων για εποπτεία περιβάλλοντος τριών διαστάσεων για παράδειγμα παρακολούθηση αλλαγών στη θερμοκρασία της θάλασσας ή της αλατότητας σε έναν κοραλλιογενή ύφαλο αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για μελλοντική εργασία.
- Ασύγχρονα δίκτυα: Για αντιμετώπιση της ασυγχρονικότητας όπου οι διαφορετικοί αισθητήρες δεν μπορούν να παρέχουν δειγματοληψία στην ίδια στιγμή ή στην ίδια συχνότητα απαιτούνται επιπλέον επεκτάσεις στα μοντέλα των δικτύων αισθητήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Υπολογιστικό μοντέλο για την ανάπτυξη αλγορίθμων για συστήματα δικτύων γεωαισθητήρων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί κανείς για τον καθορισμό αλγορίθμων που αφορούν ένα δίκτυο γεωαισθητήρων. Στα επόμενα κεφάλαια οι αλγόριθμοι “αποκεντρωμένου χωρικού υπολογισμού” θα καθορίζονται βάση αυτού του μοντέλου.

Η εφαρμογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου στους κόμβους ενός δικτύου γεωαισθητήρων βάση του οποίου θα καθορίζονται οι αλληλεπιδράσεις των κόμβων που θα οδηγούν στην επίτευξη του απαιτούμενου υπολογιστικού έργου για την επίλυση ενός προβλήματος απαιτεί την ανάπτυξη αλγορίθμων: σαφώς καθορισμένων διαδικασιών για την επίλυση ενός προβλήματος. Για τη συγκεκριμένη εργασία ενδιαφέρουν προβλήματα σχετικά με το πώς το σύστημα συλλέγει, μετασχηματίζει και επεξεργάζεται την χωρική πληροφορία βάση μιας αποκεντρωμένης προσέγγισης. Ακολούθως παρουσιάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο παρέχει τα τυπικά εργαλεία για τον καθορισμό των διαδικασιών.

4.1 Υπολογιστικό μοντέλο

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας επιλέχτηκε η καθιερωμένη τεχνική για τον καθορισμό αλγορίθμων σε κατανεμημένα συστήματα που επινοήθηκε από τον Nicola Santoro [20]. Η τεχνική αυτή παρέχει ένα απλά κατανοητό υπολογιστικό μοντέλο όπου μπορεί κανείς με εύκολο τρόπο να καθορίσει αλγόριθμους που αφορούν ένα δίκτυο.

Σε έναν αλγόριθμο βάση αυτού του υπολογιστικού μοντέλου καθορίζονται τα εξής 4 στοιχεία [20]:

- *Περιορισμοί (restrictions)*, που αφορούν το περιβάλλον στο οποίο εφαρμόζεται ο αλγόριθμος.
- *Συμβάντα (events)*, που επέρχονται στους κόμβους π.χ. όπως η λήψη ενός μηνύματος από έναν κόμβο γείτονα κ.α..
- *Δράσεις (actions)*, που εκτελούνται σε απόκριση, για χειρισμό των οριζόμενων συμβάντων.
- *Καταστάσεις (states)*, κωδικοποιήσεις ώστε οι κόμβοι να διατηρούν γνώση από προηγούμενες αλληλεπιδράσεις.

Περιορισμοί (restrictions)

Οι περιορισμοί αφορούν παραδοχές που γίνονται σχετικά με το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να εκτελεστεί ο αλγόριθμος. Αυτοί σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του μοντέλου του δικτύου γεωαισθητήρων που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και μπορεί να είναι οι εξής [20]:

- *Μη χωρικοί περιορισμοί*: αφορούν τα δεδομένα που ανιχνεύονται από τους κόμβους, δηλ. τι δεδομένα ανιχνεύονται.
- *Χωρικοί περιορισμοί*: αφορούν τον τύπο της πληροφορίας «θέσης» που είναι διαθέσιμη στους κόμβους. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης η θέση μπορεί να είναι: απόλυτη, σχετική, να εκφράζεται σε όρους γειτονιάς, απόστασης, γωνιακής απόστασης, κυκλικής διάταξης κοκ..
- *Χρονικοί περιορισμοί*: αφορούν σχετικά με το εάν συμβαίνουν αλλαγές στο περιβάλλον που εφαρμόζεται ο αλγόριθμος δηλ. εάν οι κόμβοι είναι στατικοί, ευμετάβλητοι, κινητοί, εάν επέρχονται αλλαγές στο περιβάλλον των ανιχνεύσεων –μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου κοκ..
- *Περιορισμοί αβεβαιότητας*: περιορισμοί που σχετίζονται με την αξιοπιστία της επικοινωνίας, των παρατηρήσεων, του εντοπισμού καθώς και του υπολογισμού.
- *Περιορισμοί δικτύου επικοινωνίας*: αφορούν την συνδεσιμότητα ενός γραφήματος που μοντελοποιεί το δίκτυο και αναπαριστά τις δυνατότητες επικοινωνίας των κόμβων. Το γράφημα συνδεσιμότητας μπορεί να είναι επίπεδο ή μη επίπεδο, UDG, RNG, GG ή DT καθώς και άλλου είδους.

Η χρήση λιγότερων περιορισμών είναι επιθυμητή κατά την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου. Λιγότερες υποθέσεις σχετικά με το περιβάλλον που πρόκειται να λειτουργήσει ο αλγόριθμος σημαίνουν περισσότερη ευελιξία δηλ. ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί σε ευρύτερα περιβάλλοντα. Ωστόσο η χρήση περισσότερων περιορισμών είναι επιθυμητή από την όψη του σχεδιασμού του αλγορίθμου, γιατί τείνει να οδηγεί σε απλούστερους αλγορίθμους. Ένας καλοσχεδιασμένος αλγόριθμος είναι αυτός στον οποίο έχει επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ απλότητας και περιορισμών.

Συμβάντα (events)

Ο καθορισμός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων σε πρώτο επίπεδο συντελείται με τον καθορισμό *συμβάντων*. Οι κόμβοι κατά την εμφάνιση αυτών των συμβάντων δύναται να αντιδρούν καταλλήλως. Στο παρόν υπολογιστικό μοντέλο θεωρείται η δυνατότητα καθορισμού τριών διαφορετικών τύπων συμβάντων²²:

1. Συμβάν λήψης μηνύματος από κόμβο γείτονα (receipt).
2. Πυροδοτούμενο συμβάν (triggered), που μπορεί να επέρχεται από μία προγραμματισμένη αφύπνιση (alarm) είτε από μια περιοδικώς εξαναγκασμένη ανάγνωση αισθητήρα.
3. Αυτόκλητο συμβάν (spontaneous impulse), που εκτελείται ηθελημένα χωρίς να έχει ζητηθεί, από εξωτερικές διαδικασίες.

²² Χρησιμοποιώντας αυτούς τους τρεις τύπους συμβάντων μπορεί να κατασκευάσει κανείς μια μεγάλη ποικιλία αλγορίθμων.

Δράσεις (actions)

Δράσεις είναι οι διαδικασίες που καθορίζουν τον τρόπο που ένας κόμβος θα αποκριθεί σε επερχόμενο συμβάν, δηλαδή που καθορίζουν τον χειρισμό σε επερχόμενα συμβάντα. Οι δράσεις στο προκείμενο υπολογιστικό μοντέλο θεωρούνται "ατομικά μπλοκ" διαδικασιών. Ένα 'ατομικό μπλοκ' θεωρείται ότι τερματίζει σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα (δηλ. αποκλείονται δράσεις με ατέρμονους βρόχους), καθώς και ότι εκτελείται χωρίς διακοπή (δηλ. αποκλείονται από το μοντέλο καταστάσεις αναμονής, είτε παράλληλος χειρισμός άλλων επερχόμενων συμβάντων). Η θεώρηση για 'ατομικές' δράσεις στο υπολογιστικό μοντέλο απλοποιεί σημαντικά τη συγγραφή αλγορίθμων.

Καταστάσεις (states)

Αξιοποιώντας μια κατάλληλη κωδικοποίηση από καταστάσεις μπορεί κανείς να εκφράζει περισσότερο κομψά και οικονομικά τον υπολογισμό. Ο υπολογισμός έτσι καθορίζεται από μια ακολουθία καταστάσεων όπου η κάθε κατάσταση περιλαμβάνει τον ορισμό συμβάντων και αντίστοιχων χειρισμών δράσεων. Στις δράσεις περιλαμβάνονται και οι καθορισμοί μετάβασης σε άλλες καταστάσεις. Όμοια συμβάντα μπορεί να υφίστανται διαφορετικούς χειρισμούς σε διαφορετικές καταστάσεις. Σε έναν αλγόριθμο στο προκείμενο υπολογιστικό μοντέλο σχετικά με τις καταστάσεις καθορίζονται τα εξής:

- η κωδικοποίηση πεπερασμένου αριθμού καταστάσεων,
- οι αρχικές καταστάσεις των κόμβων,
- οι μεταβάσεις των καταστάσεων.

Συμπερασματικά, βάση των παραπάνω για κάθε κατάσταση και συμβάν ακολούθως καθορίζονται οι απαιτούμενες δράσεις. Έτσι προσδιορίζεται τι κάνει ένας κόμβος όταν βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση και επέρχεται ένα συγκεκριμένο συμβάν. Εάν δεν είναι ανάγκη να συντελεστεί κάποια δράση καθορίζεται απλά το συμβάν ως κενό δράσεων.

Όλοι αυτοί οι καθορισμοί φαίνονται στην ακόλουθη δομή κώδικα η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή για την περιγραφή των αλγορίθμων και πρωτοκόλλων²³ (Σχήμα 4.1).

Στην παρακάτω δομή κώδικα πρωτοκόλλου (Σχήμα 4.1) αρχικά καθορίζονται οι περιορισμοί, το σύστημα πεπερασμένων καταστάσεων και οι αρχικές καταστάσεις των κόμβων. Το σύνολο αυτών των στοιχείων αποτελούν την *κεφαλίδα του πρωτοκόλλου*. Έπειτα ακολουθεί το *κύριο σώμα κώδικα* διαδοχικά όπου καθορίζεται διαδοχικά ένα σύνολο από καταστάσεις SONE, STWO, STHR, συμβάντων (*Spontaneously, Receiving, When*) και δράσεων (*become,...*). Κατά αυτόν τον τρόπο καθορίζεται πλήρως η συμπεριφορά των κόμβων όπου πρόκειται να εκτελεστεί το πρωτόκολλο.

²³ Ο όρος 'πρωτόκολλο' χρησιμοποιείται έναντι του όρου 'αλγόριθμος' όταν θέλει κανείς να αποδώσει περισσότερο έμφαση στους κανόνες που διέπουν την αλληλεπίδραση επικοινωνούντων κόμβων, παρά να καθορίσει ένα σύστημα σε καθολικό επίπεδο (δηλ. τη συμπεριφορά του συνόλου των κόμβων). Σε αυτήν την εργασία και οι δύο όροι χρησιμοποιείται εναλλακτικά για την αναφορά σε υπολογιστικές διαδικασίες που συμβαίνουν σε ένα δίκτυο δηλ. θεωρούνται ταυτόσημοι.

Περιορισμοί: Συνεκτικό γράφημα $G = (V, E)$; συνάρτηση αισθητήρα $s : V \rightarrow \mathbb{R}$
Σύστ. πεπ. καταστ.: $(\{ \text{SONE}, \text{STWO}, \text{STHR} \}, \{ (\text{SONE}, \text{STWO}), (\text{STWO}, \text{STHR}), (\text{STHR}, \text{SONE}) \})$
Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι SONE

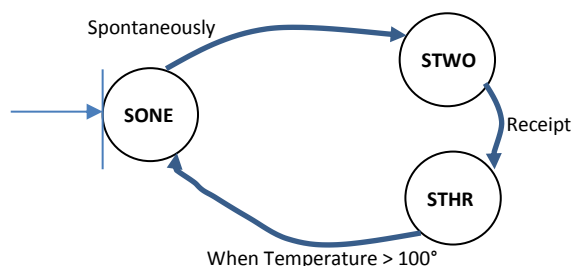
SONE
Spontaneously
send (msge)
 ...
become STWO

STWO
Receiving (msge)
 ...
become STHR

STHR
When $\xi > 100$
 ...
become SONE

Σχήμα 4.1 Παράδειγμα σύνταξης πρωτοκόλλου [20].

Αυτή η δομή μπορεί να παρασταθεί περισσότερο αφαιρετικά με αυτό που καλείται **διάγραμμα πεπερασμένων καταστάσεων** (Σχήμα 4.2). Τα διαγράμματα πεπερασμένων καταστάσεων χρησιμοποιούνται ταχτικά κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων.



Σχήμα 4.2 Ένα διάγραμμα πεπερασμένων καταστάσεων

Για τον καθορισμό ενός συμβάντος στο υπολογιστικό μοντέλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις λέξεις κλειδιά:

- *Receiving*, για τον καθορισμό ενός συμβάντος λήψης μηνύματος.
- *Spontaneously*, για τον καθορισμό ενός αυτόκλητου συμβάντος (ένα συμβάν που συντελείται χωρίς να έχει κληθεί από κάποια εσωτερική στον κώδικα διαδικασία, αλλά

πιθανώς από κάποια εξωτερική διέγερση π.χ. ένα Query (όπως και να 'χει ουσιαστικά σηματοδοτεί την έναρξη του υπολογισμού στο εκάστοτε πρωτόκολλο).

- *When*, για το καθορισμό ενός πυροδοτούμενου ή προγραμματισμένου συμβάντος.

Στον καθορισμό μιας δράσης μπορούν να περιλαμβάνονται οι ακόλουθες λειτουργίες:

- Επεξεργασίες τοπικών πληροφοριών: Μπορούν να αφορούν τη θέση, τα ανιχνευμένα δεδομένα, τους γείτονες του κόμβου. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να αφορούν άλλους κόμβους στο δίκτυο οι οποίες έχουν κοινοποιηθεί, υποστεί ίσως κάποια επεξεργασία και αποθηκευτεί τοπικά από προηγούμενες δράσεις.
- Αλλαγή κατάστασης κόμβου, χρησιμοποιώντας τη λέξη-κλειδί **become**.
- Αποστολή μηνυμάτων προς όλους χρησιμοποιώντας τη λέξη-κλειδί **broadcast** ή επιλεκτική αποστολή προς ένα καθορισμένο υποσύνολο γειτονικών κόμβων χρησιμοποιώντας τη λέξη-κλειδί **unicast**.
- Λειτουργίες λογικών πράξεων και ελέγχου ροής προγράμματος π.χ. όπως προτάσεις "if-then-else" κοκ.
- Λειτουργίες τυχαίας επιλογής στοιχείου από λίστα (λέξη-κλειδί **one-of**)
- Λειτουργίες ανάθεσης και ενημέρωσης τιμών μεταβλητών (λέξη-κλειδί **set** για μεταβλητές καθολικής εμβέλειας στον κώδικα που ορίζονται στην κεφαλίδα, λέξη-κλειδί **let** για δημιουργία, ανάθεση και ενημέρωση μεταβλητών που δεν έχουν οριστεί στην κεφαλίδα και υφίσταται εμβέλεια εντός ορισμών μιας δράσης).

Σε κάθε δράση μπορούν να ορίζονται περισσότερες από τις παραπάνω λειτουργίες αρκεί η δράση να καθορίζεται ως ατομική (να μην υφίστανται ατέρμονοι βρόχοι και να μην διακόπτεται από άλλα επερχόμενα συμβάντα) και οι καθορισμοί να αφορούν τοπικά διαθέσιμες πληροφορίες. Το τελευταίο σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα εν γένει έχουν a priori πρόσβαση σε μερική γνώση, δηλ. γνώση του συστήματος την οποία κατέχουν στην εκάστοτε στιγμή. Δεν θα πρέπει να μπερδεύει ο καθορισμός στους περιορισμούς του πρωτοκόλλου της «καθολικής συνάρτησης» $s : V \rightarrow \mathbb{R}$. Δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι η πληροφορία αυτή ($s : V \rightarrow \mathbb{R}$) είναι τοπικά διαθέσιμη. Κάθε κόμβος κατέχει a priori μόνο μερική γνώση, δηλ. κατέχει a priori μόνο την τοπική εκδοχή της συνάρτησης που συμβολίζεται με \hat{s} .

Τέλος στην παραπάνω σύνταξη πρωτοκόλλου (Σχήμα 4.1) διακρίνει κανείς και τη χρήση διάφορων λεκτημάτων (String literals) π.χ. *msgc* για ορισμούς ονομάτων μηνυμάτων.

4.2 Ένας απλός αλγόριθμος καταμέτρησης

Ένας απλός αλγόριθμος που παρέχει λειτουργικότητα καταμέτρησης των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι αυτός που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Ο αλγόριθμος εάν και έχει διάφορα προβλήματα όπως δύναται να μην τερματίζει και κάθε κόμβος να στέλνει άπειρο αριθμό μηνυμάτων αποτελεί ένα ενδεικτικό παράδειγμα αποκεντρωμένης διαδικασίας όπου συντελείται συνεργία κόμβων για την επίτευξη ενός αποτελέσματος. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν η καταμέτρηση ξεπεράσει την τιμή 150. Εάν εφαρμοστεί σε ένα επίπεδο γράφημα με 150 κόμβους η επικοινωνιακή του πολυπλοκότητα είναι $O(n^2)$, βάση ενός αποτελέσματος της θεωρίας των γραφημάτων [20] που στηρίζεται στην τυχαία διάσχιση ενός επίπεδου γραφήματος.

Περιορισμοί: Συνεκτικό γράφημα συνδεσιμότητας $G = (V, E)$, $nbr : V \rightarrow 2^V$,
Σύστ. πεπ. καταστ.: ({INIT, IDLE, INFO, DONE}, { (INIT, DONE), (IDLE, INFO), (IDLE, DONE) })
Αρχικοποίηση: Ένας κόμβος INIT, οι υπόλοιποι IDLE

INIT

Spontaneously

send (msg, 1) to one-of nbr ; η αρχική τιμή του μετρητή είναι 1
become DONE

IDLE

Receiving (msg, n)

if $n \geq 150$

become INFO ; τελειώνει ο αλγόριθμος

send (msg, n + 1) to one-of nbr

become DONE

DONE

Receiving (msg, n)

send (msg, n) to one-of nbr ; όπως το λαμβάνει έτσι το στέλνει γιατί έχει
καταμετρήσει τον εαυτό του

INFO

4.3 Ανάλυση Αλγορίθμων

Εν όψει ενός αλγορίθμου αυτό που μπορεί να επιχειρήσει κανείς πριν τον εκτελέσει είναι να διερευνήσει βαθύτερα τη συμπεριφορά του. Για αυτό το λόγο επιχειρεί τις εξής ακόλουθες αναλύσεις [20].

4.3.1 Ανάλυση αντιπάλου (adversarial analysis)

Ο σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να ανακαλύψει προβλήματα και περιορισμούς εφαρμογής του αλγορίθμου. Αυτό το επιτυγχάνει με κριτική εξέταση, εφαρμογή της χειρότερης περίπτωσης, επινόηση σεναρίων αστοχίας κ.α.. Στο πλαίσιο των διαδικασιών «αποκεντρωμένου χωρικού υπολογισμού» που πραγματεύεται αυτή η εργασία η αποτυχία ενός αλγορίθμου μπορεί να επέρθει συνήθως από τα εξής:

- εφαρμογή σε ακατάλληλη τοπολογία δικτύου
- εφαρμογή σε ακατάλληλη χωρική κατανομή κόμβων δικτύου
- εφαρμογή σε ακατάλληλη σειρά συμβάντων ή αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κόμβων
- ακατάλληλες χρονικές και χωροχρονικές διεγέρσεις από το γεωγραφικό περιβάλλον όπου εφαρμόζεται το δίκτυο γεωαισθητήρων

- αβεβαιότητες στα δεδομένα όπως θέσης, αισθητήρα (υφίσταται εγγενής αβεβαιότητα στη συλλογή χωρικής πληροφορίας)
- αναξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων: απώλεια μηνυμάτων κ.α.
- μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα

Ένας αλγόριθμος για τους παραπάνω λόγους μπορεί να αποτυγχάνει δηλ. να λειτουργεί εσφαλμένα, να φτάνει σε αδιέξοδο, να μην τερματίζει ή να αργεί πολύ να τερματίσει.

4.3.2 Ανάλυση υπολογιστικής πολυπλοκότητας

Εδώ υπολογίζεται η αποδοτικότητα του αλγόριθμου σε όρους χρόνου, μνήμης, επικοινωνιακών και άλλων υπολογιστικών πόρων βάση ενός μεγέθους εισόδου. Για τους αλγορίθμους γεωαισθητήρων η πιο σημαντική είσοδος είναι το μέγεθος του δικτύου, δηλαδή ο αριθμός των κόμβων. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα ως γνωστόν υπολογίζεται με αφαιρετικό τρόπο ως συνάρτηση της εισόδου. Η συνάρτηση πολυπλοκότητας μπορεί να είναι σταθερή, λογαριθμική, γραμμική, ημιλογαριθμική, πολυωνυμική, εκθετική κ.α.. Ωστόσο αυτό που ενδιαφέρει είναι η ασυμπτωτική συμπεριφορά της συνάρτησης η οποία εκφράζεται με τη χρήση του συμβολισμού $O(f(n))$. Η σημειογραφία $O(f(n))$ παριστάνει το σύνολο των συναρτήσεων που φράσσονται ασυμπτωτικά από την $f(n)$. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι μια συνάρτηση $g(n) \in O(f(n))$ αν και μόνο αν: $g(n) \leq c \cdot f(n) + d$ για κάθε $n \geq n_0$ όπου c, d σταθερές. Η σταθερά c αφορά χαρακτηριστικά του επεξεργαστή-συστήματος που μεταβάλλονται από μηχανή σε μηχανή και με την εξέλιξη της τεχνολογίας π.χ. για την χρονική πολυπλοκότητα το c μπορεί να είναι η ταχύτητα και το d μια σταθερά που εξαρτάται από τον μεταγλωττιστή. Μπορεί εύκολα να καταλάβει κανείς αυτό που ενδιαφέρει την ανάλυση πολυπλοκότητας είναι ο ρυθμός αύξησης μιας συνάρτησης πολυπλοκότητας και όχι μια συγκεκριμένη αύξηση. Ο ρυθμός αύξησης παρέχει την ένδειξη για το πόσο τα βήματα υπολογισμού (ή άλλοι υπολογιστικοί πόροι) αυξάνονται κατά τη εκτέλεση του αλγορίθμου. Έτσι εύκολα μπορεί να συγκρίνει κανείς δύο αλγορίθμους ως προς την αποδοτικότητα με διαφορετικό ρυθμό αύξησης. Για αυτά τα θέματα μπορεί κανείς να ανατρέξει σε βιβλία ανάλυσης αλγορίθμων.

Επικοινωνιακή πολυπλοκότητα

Ουσιαστικό ρόλο στην ανάλυση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας πέρα από την χρονική και χωρική πολυπλοκότητα συστήματα γεωαισθητήρων παίζει η *επικοινωνιακή πολυπλοκότητα*. Η επικοινωνιακή πολυπλοκότητα αφορά την πολυπλοκότητα των διεργασιών επικοινωνίας που συντελείται από τον αλγόριθμο. Όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενες ενότητες σ' ένα δίκτυο γεωαισθητήρων η ενέργεια είναι ένας σπάνιος πόρος που είναι κρίσιμη για την ορθή λειτουργία ενός δικτύου αισθητήρων και η καταβόθρα της ενέργειας είναι το συστατικό της επικοινωνίας. Εφόσον η επικοινωνία σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων είναι μια απαραίτητη λειτουργία αυτή θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί κατά το μέγιστο δυνατόν κατά την επίλυση ενός προβλήματος.

Βασικά μέτρα της επικοινωνιακής πολυπλοκότητας είναι ο αριθμός και το μέγεθος των μηνυμάτων που αποστέλλονται ή λαμβάνονται και η καθυστέρηση στην διάδοση. Οι αριθμοί των μηνυμάτων που αποστέλλονται και λαμβάνονται εν γένει δεν είναι ίσοι. Αυτό μπορεί να το καταλάβει κανείς εάν αναλογιστεί την ενδεχόμενη επιβαλλόμενη ανομοιογένεια που πηγάζει από τον ίδιο τον αλγόριθμο π.χ. ο αλγόριθμος μπορεί να είναι ανάγκη να στέλνει δύο και να λαμβάνει ένα, την δυνατότητα αποστολής broadcast όπου ένας κόμβος τελεί ευρεία εκπομπή δηλ. αποστέλλοντας ένα μήνυμα το οποίο λαμβάνεται

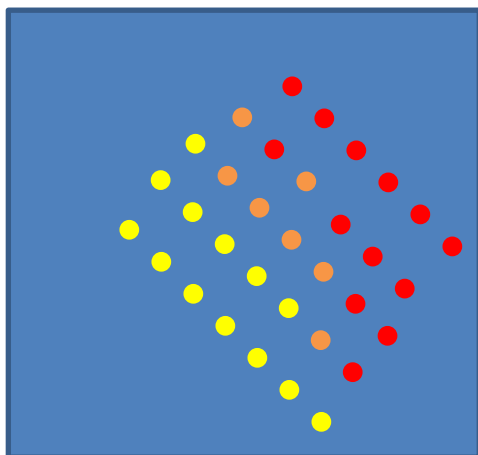
από όλους τους γείτονες καθώς και από φυσικούς περιορισμούς π.χ. πολλαπλά αποσταλμένα μηνύματα μπορεί να χάνονται στον «αιθέρα» δίχως να τα λαμβάνει κανείς κ.α..

Οι ειδικές λεπτομέρειες για το πόση ενέργεια απαιτείται για τη μετάδοση ή τη λήψη ορισμένων bit μηνύματος ποικίλλουν σημαντικά, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Σε ορισμένα συστήματα η αποστολή και η λήψη της ίδιας ποσότητας μηνύματος είναι σχεδόν ομότιμη σε κόστος. Σε άλλα η λήψη μηνύματος μπορεί να συνδέεται με χαμηλότερη ενέργεια σε σχέση με τη μετάδοση. Αποφεύγοντας αυτές τις ειδικές λεπτομέρειες η ανάλυση επικοινωνιακής πολυπλοκότητας στοχεύει να συλλάβει τους «υποκείμενους» επικοινωνιακούς πόρους όπως π.χ. τον αριθμό των μηνυμάτων που στέλνονται ή λαμβάνονται σε έναν αλγόριθμο. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση αλγορίθμων ακόμη και καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονται. Επίσης μπορούν ακόμη και να καθορίσουν την καταλληλότητα ορισμένων τεχνολογιών.

Έτσι σε αυτό το σημείο η ανάλυση επικοινωνιακής πολυπλοκότητας μοιάζει με την ανάλυση χρονικής και χωρικής πολυπλοκότητας. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς της επικοινωνιακής πολυπλοκότητας γίνεται κατάχρηση της ασυμπτωτικής σημειογραφίας ορίζοντας περιγραφές του τύπου $O(2n)$ και $O(4n)$. Πράγματι είναι δικαιολογημένη η χρήση της σταθεράς αφού ο διπλασιασμός των μηνυμάτων είναι δυσανάλογος με την καινοτομία στις μπαταρίες. Τέλος και πιο σημαντικό η επικοινωνιακή πολυπλοκότητα συνήθως αποτιμάται ως συνάρτηση του μεγέθους του δικτύου (δηλ. του αριθμού των κόμβων).

Εξισορρόπηση φόρτου (Load Balance)

Οι αναλύσεις πολυπλοκότητας των αλγορίθμων (χρονική, χωρική και επικοινωνιακή) αφορούν στο πώς η πολυπλοκότητα κλιμακώνεται για όλο το δίκτυο. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός αλγορίθμου αποτελεί η ατομική χρήση πόρων από κάθε κόμβο και όχι η συνολική χρήση όπως προσδιορίζεται από την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στο πλαίσιο αυτό ενδιαφέρει περαιτέρω πώς κατανέμεται η χρήση πόρων σε κάθε κόμβο στο δίκτυο. Η πληροφορία αυτή καλείται *κατανομή ή εξισορρόπηση φόρτου στο δίκτυο*, δηλαδή η κατανομή των εργασιών στους κόμβους ενός δικτύου. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται με κόκκινο οι κόμβοι που μετέχουν συνεχώς σε μια διαδικασία, με πορτοκαλί οι κόμβοι που μετέχουν περιστασιακά και οι κόμβοι που παραμένουν πάντα αδρανείς (Σχήμα 4.3α). Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με την εξισορρόπηση φόρτου στο πλεούμενο της διπλανής εικόνας στο ίδιο σχήμα (Σχήμα 4.3β).

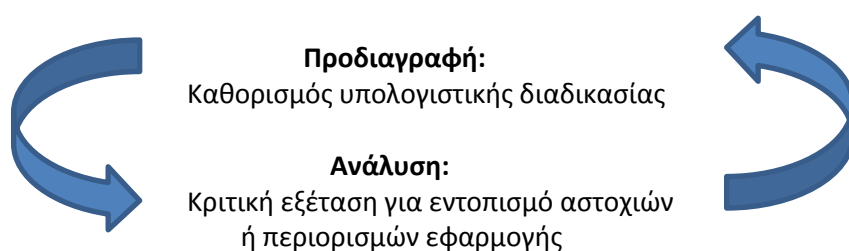


Σχήμα 4.3 (α) Εξισορρόπηση φόρτου σε ένα δίκτυο, και αντιστοίχως (β) Εξισορρόπηση φόρτου σε ένα «Φέρρυ μπωτ»

Μια γενικώς επιθυμητή κατάσταση είναι να υφίσταται μια σχετική εξισορρόπηση και ομοιογένεια κατανομής του φορτίου των εργασιών σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων πράγμα που θα οδηγεί αντιστοίχως σε ομοιόμορφη κατανάλωση των μπαταριών. Βέβαια δεν αποκλείεται να είναι επιθυμητές και άλλες πιο εξελιγμένες στρατηγικές όπως μια καταλλήλως επινοημένη στρατηγική που θα επέφερε σταδιακή υποβάθμιση της χωροχρονικής ανάλυσης του δικτύου γεωαισθητήρων, αναθέτοντας καταλλήλως τις διάφορες εργασίες, καθώς το δίκτυο θα νεκρώνεται από μπαταρίες.

4.4 Η επαναληπτική διαδικασία της ανάπτυξης

Ο καθορισμός του πως οι κόμβοι αλληλεπιδρούν γίνεται για κάθε κόμβο μέσω ενός συνόλου καταστάσεων, μεταβάσεων, συμβάντων και δράσεων. Τα στοιχεία αυτά συνθέτουν το εκάστοτε πρωτόκολλο που καθορίζει πλήρως τη συμπεριφορά των κόμβων του συστήματος. Μέσω αυτών των καθορισμών προκύπτει περαιτέρω η συμπεριφορά του συνολικού συστήματος. Εάν αυτοί οι καθορισμοί περιέχουν λάθη, προβλήματα, παρουσιάζουν αστοχίες ή περιορισμούς εφαρμογής και δεν ικανοποιούν εν γένει διάφορες προδιαγραφές της σχεδίασης, επιχειρεί κανείς κριτική εξέταση για τελειοποίηση ή αναθεώρηση των διαδικασιών [20]. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία ανάπτυξης εικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Η επαναληπτική διαδικασία της ανάπτυξης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αλγόριθμοι εν γνώσει γειτονιάς

«Μυσταγωγία χωρικής πληροφορίας σε ένα δίκτυο».
«Πώς μπορεί να διαχέεται ή να δρομολογείται πληροφορία σε ένα δίκτυο;»
«Η γνώση της γειτονιάς αρκεί: πλημμύρα, κουτσομπολιό, εξάπλωση φήμης, παρόμοιες αποκεντρωμένες διαδικασίες με αυτές του σύμπαντος και των ανθρώπων»

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν θεμελιώδεις αλγόριθμοι για την ανάπτυξη διαδικασιών σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων. Σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων δεν υπάρχει *a priori*, υπολογιστικό σημείο με καθολική γνώση του συστήματος μήτε είναι αποτελεσματικό να δημιουργηθεί. Έτσι και για επεξεργασίες χωρικής πληροφορίας εφαρμόζονται αποκεντρωμένοι υπολογισμοί προς επίτευξη ενός συνολικού υπολογιστικού έργου ή μιας συνολικής συμπεριφοράς συστήματος.

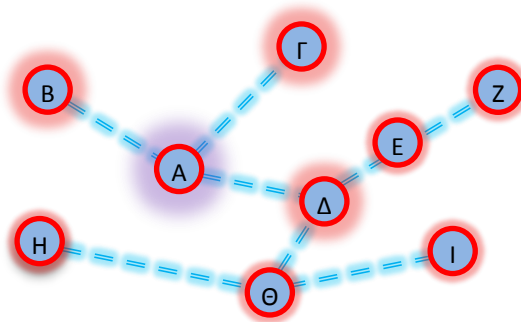
Συγκεκριμένα στους αλγόριθμους «γειτονιάς» που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο θεωρείται ότι είναι διαθέσιμη μόνο η πληροφορία της γειτονιάς σε κάθε κόμβο – πράγμα εύκολο να επιτευχθεί σε ένα ασύρματο δίκτυο με μια απλή κοινοποίηση παρουσίας ταυτότητας (*id*) και ταυτόχρονης ακρόασης από κάθε κόμβο – δηλ. κάθε κόμβος γνωρίζει ανά πάσα στιγμή ποιοι είναι οι γείτονες του.

Η πληροφορία της γειτονιάς – λόγω ότι σε καθολικό επίπεδο συνθέτει την τοπολογία των κόμβων της χωρικής μορφής του δικτύου – είναι προφανές ότι επαρκεί για την ανάπτυξη βασικών διεργασιών όπως διάχυση, και δρομολόγηση πληροφορίας στο δίκτυο, κατασκευή *a posteriori* τοπολογιών συνδεσιμότητας, εκλογή κόμβων ηγετών και ποιοτικές επεξεργασίες χωρικής ανάλυσης.

5.1 Η γειτονιά ενός κόμβου σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων

Ως «γειτονιά» ενός κόμβου σ' ένα δίκτυο γεωαισθητήρων ορίζεται το σύνολο των κόμβων για τους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί άμεση επικοινωνία (1-βήματος επικοινωνία) π.χ. στο δίκτυο του σχήματος όπου οι συνάψεις στους κόμβους συμβολίζουν τις συνδεσιμότητες των κόμβων η γειτονιά του κόμβου A είναι το σύνολο των κόμβων { B, Γ, Δ } (Σχήμα 5.1).

Στους αλγόριθμους γειτονιάς δεν χρησιμοποιείται άλλη «χωρική πληροφορία» στο μοντέλο του δικτύου πέρα από την γνώση της γειτονιάς. Έτσι οι αλγόριθμοι γειτονιάς κάθε στιγμή δύναται να αξιοποιούν πληροφορίες κατάστασης που αφορούν τον ίδιο τον κόμβο ή έχουν κοινοποιηθεί από τους άμεσους του γείτονες.



Σχήμα 5.1. «Γειτονιά κόμβου A»: Ο κόμβος A συνδέεται με τους κόμβους B, Γ, Δ.

Αυτά όλο γίνονται περισσότερο κατανοητά από τους περιορισμούς που εισάγονται στην κεφαλίδα των αλγορίθμων «γειτονιάς». Οι περιορισμοί που εισάγονται τυπικά είναι και οι ελάχιστοι δυνατοί για ένα μοντέλο δικτύου γεωαισθητήρων και συγκεκριμένα είναι οι εξής:

- Συνεκτικό γράφημα συνδεσιμότητας.
- Συνάρτηση γειτονιάς nbr .
- Αξιόπιστη επικοινωνία.
- Συνάρτηση αισθητήρα (s).
- Συνάρτηση αναγνωριστικού (id).

Οι τρεις πρώτοι περιορισμοί (συνεκτικό γράφημα συνδεσιμότητας, συνάρτηση γειτονιάς, αξιόπιστη επικοινωνία) θα συμβολίζονται συνοπτικά στον κώδικα ως \mathcal{NB} .

Σημειώνεται ότι κάθε κόμβος κατέχει αρχικώς μόνο την τοπική εκδοχή της αντίστοιχης καθολικής συνάρτησης δηλ. για την s κατέχει την \hat{s} . Κάθε άλλη πληροφορία περαιτέρω πρέπει να κοινοποιηθεί. Επιπλέον για λόγους απλοποίησης των παρακάτω διαδικασιών θεωρείται ότι από το μοντέλο δικτύου απουσιάζει κάθε έννοια δυναμικής που μπορεί να αφορά είτε το σύστημα είτε το περιβάλλον ανίχνευσης.

5.2 Διάχυση και δρομολόγηση πληροφοριών σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων

Η διάχυση και η δρομολόγηση πληροφοριών σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων είναι σημαντική για να συντελούνται χωρικοί υπολογισμοί και να απαντώνται χωρικά ερωτήματα.

Η εκκίνηση της διάχυσης μπορεί να προκαλείται:

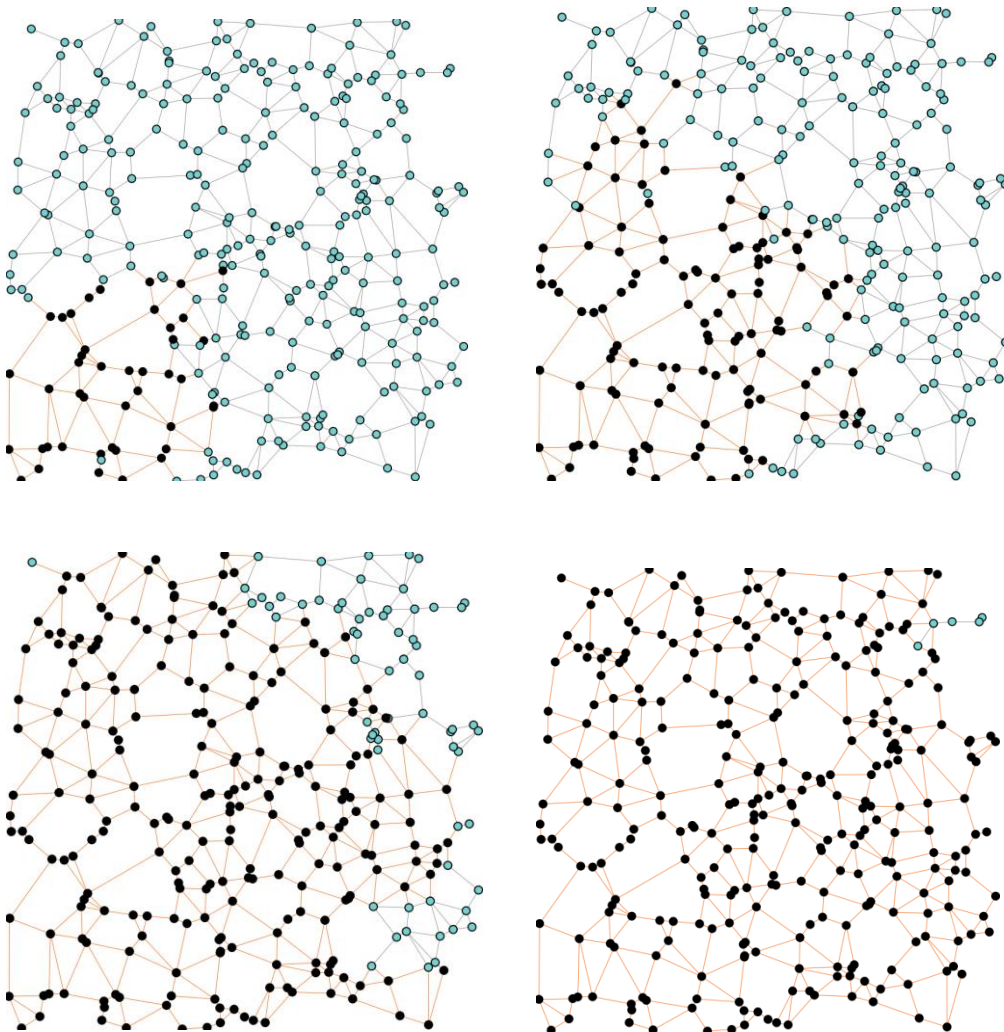
- είτε πυροδοτούμενα από έναν ή περισσότερους κόμβους π.χ. όταν υφίστανται ενδιαφέροντα συμβάντα που πρέπει να κοινοποιηθούν στους άλλους κόμβους όπως η εμφάνιση ενός θερμού σημείου ('hot spot').

- είτε από ένα Query²⁴.

Η απόκριση μπορεί να αφορά σε ποιους κόμβους πρέπει να φτάσει το μήνυμα. Όπως και να 'χει κατά την εκκίνηση διαδικασιών διάχυσης ή δρομολόγησης σε ένα δίκτυο αναγκάζονται να ταξιδεύουν μηνύματα από κόμβους πηγές σε κόμβους προορισμούς.

5.2.1 Αλγόριθμος πλημμύρας (Flooding)

Ο αλγόριθμος πλημμύρας (flooding) είναι μια διαδικασία που επιδιώκει τη διάδοση μιας πληροφορίας σε όλο το δίκτυο, δηλ. από έναν κόμβο όπου ξεκινά η διαδικασία σε κάθε άλλο κόμβο [20]. Στην απλούστερη μορφή της πλημμύρας, κάθε κόμβος προωθεί το μήνυμα στους κόμβους γείτονες. Έτσι το μήνυμα διαδίδεται σε όλο το δίκτυο εφόσον πρόκειται για συνεκτικό γράφημα συνδεσιμότητας (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Διάχυση πληροφοριών σε ένα δίκτυο: με πορτοκαλί ακμές και μαύρους κόμβους απεικονίζεται η εξέλιξη μιας διαδικασίας διάχυσης πληροφοριών σε ένα δίκτυο βάση αλγορίθμου πλημμύρας.

²⁴ Εεε, ναι, γιατί έναν υπολογιστή πέρα από να τον προγραμματίσει κανείς πρέπει και να μπορεί να τον προκαλέσει !

Η διάχυση πληροφορίας σε όλο το δίκτυο μπορεί να είναι χρήσιμη και για κλήση λειτουργιών που σχετίζονται με συλλογή, επεξεργασία της χωρικής πληροφορίας στο δίκτυο, για επανεκκίνηση, για εκκίνηση ενός ερωτήματος κ.α.. Το πρωτόκολλο έχει ως εξής:

Πρωτόκολλο 5.1 Αλγόριθμος Πλημμύρας, διάχυση πληροφορίας σε ένα δίκτυο [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} (αξιόπιστη επικοινωνία, συνεκτ. γράφημα συνδεσιμότητας, $\text{nbr} : V \rightarrow 2^V$)

Συστ. Πεπ. Κατ.: { (INIT, DONE), (IDLE, DONE) }

Αρχικοποίηση: Ένας κόμβος: INIT, οι υπόλοιποι: IDLE

INIT

Spontaneously

broadcast (msge) ; ευρεία εκπομπή μηνύματος προς τους γείτονες
become DONE

IDLE

Receiving(msge)

broadcast (msge) ; αναμετάδοση με ευρεία εκπομπή προς τους γείτονες
become DONE

DONE

; κενή κατάσταση: δεν συντελούνται χειρισμοί συμβάντων

Το παραπάνω πρωτόκολλο επιτυγχάνει τη διάδοση του μηνύματος *msge* σε όλο το δίκτυο (δηλ. σε κάθε κόμβο του δικτύου). Κάθε κόμβος διαδίδει με ευρεία εκπομπή (αποστολή ενός μηνύματος) το μήνυμα στους γείτονες του και τίθεται σε κατάσταση DONE. Η κατάσταση DONE τίθεται κενή, έτσι κάθε είδους συμβάν αγνοείται από κάθε κόμβο που βρίσκεται σε αυτήν την κατάσταση.

Η επικοινωνιακή πολυπλοκότητα του παραπάνω αλγορίθμου έχει ως εξής:

- Αποστολή μηνυμάτων: κάθε κόμβος στέλνει ακριβώς 1 μήνυμα. Αυτό συνεπάγεται εξισορρόπηση φορτίου (αποστολής) $\Theta(1)$ και κατά συνέπεια συνολική επικοινωνιακή πολυπλοκότητα αποστολής $\Theta(|V|)$. Η εξισορρόπηση φορτίου είναι βέλτιστη όσο αναφορά την αποστολή μηνυμάτων (κάθε κόμβος στέλνει ακριβώς 1 μήνυμα).
- Λήψη μηνυμάτων: εάν ληφθεί υπόψη και η λήψη μηνυμάτων τα πράγματα είναι διαφορετικά. Ένα μήνυμα λαμβάνεται πολλαπλώς από διάφορους κόμβους γείτονες. Σε αυτήν την περίπτωση η συνολική επικοινωνιακή πολυπλοκότητα είναι $O(|E|)$. Στην χειρότερη περίπτωση (πλήρως συνδεδεμένο γράφημα) το $|E|$ είναι ανάλογο του $|V|^2$. Τα δίκτυα γεωαισθητήρων αποτελούν ωστόσο αραιά γραφήματα, όπου η απόσταση επικοινωνίας είναι σημαντικά μικρότερη από την έκταση του δικτύου και συνεπώς το $|E|$ είναι γραμμικώς ανάλογο προς το $|V|$. Όσο αναφορά την εξισορρόπηση φορτίου σε αυτήν την περίπτωση για κάθε κόμβο u είναι $O(\text{deg}(u))$, όπου deg ο βαθμός του κόμβου (ο αριθμός των ακμών που συνδέονται στον κόμβο).

Ο παραπάνω αλγόριθμος πλημμύρας είναι αποτελεσματικός σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η διάχυση ενός μηνύματος από έναν κόμβο σε όλο το δίκτυο. Αλλά είναι ενδεχομένως λιγότερο αποδοτικός σε περιπτώσεις που απαιτείται η κοινοποίηση του μηνύματος σε ένα συγκεκριμένο υποσύνολο κόμβων. Επιπλέον δεν επιτρέπει την διάχυση πολλαπλών μηνυμάτων. Μια εναλλακτική προσέγγιση που επιτρέπει την διαχείριση πολλαπλών μηνυμάτων είναι η ακόλουθη (Πρωτόκολλο 5.2)

Πρωτόκολλο 5.2 Διάχυση πολλαπλών μηνυμάτων σε ένα δίκτυο [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , $s : V \rightarrow \mathbb{R}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{ \text{IDLE} \}, \emptyset)$ (το κενό σύνολο σημαίνει ανυπαρξία μετάβασης)

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

IDLE

When $\mathring{s} > 100$

broadcast (msge, 0)

Receiving(msge, h)

if $h < 10$

broadcast (msge, h+1)

Εδώ πολλαπλά γεννηθέντα μηνύματα (όταν $\mathring{s} > 100$ σε κάποιον κόμβο) διαδίδονται μαζί με έναν μετρητή (hop-count) ο οποίος αυξάνεται κατά 1 σε κάθε αναμετάδοση. Η αναμετάδοση κάθε μηνύματος παύει όταν ο συνοδευόν το μήνυμα μετρητής ξεπεράσει την τιμή 10 ή κάποια άλλη μέγιστη τιμή.

Στα παραπάνω πρωτόκολλα όπως και σε άλλα εν γένει πρωτόκολλα πλημμύρας υπάρχει το πρόβλημα αυξημένων πλεονασματικών λήψεων και αναμεταδόσεων. Συγκεκριμένα για το πρωτόκολλο 5.2 μπορεί να ευνοηθεί το πρόβλημα ως εξής: η λειτουργία του πρωτοκόλλου σε ένα περιβάλλον υπέρβασης ($\mathring{s} > 100$), π.χ. υψηλών θερμοκρασιών σε συνδυασμό με ένα ιδιαίτερα υψηλό h θα παρήγαγε από κάθε κόμβο την αποστολή μηνυμάτων.

Επιπλέον δεν εξασφαλίζεται η κοινοποίηση ενός συμβάντος από την περιφέρεια ενός δικτύου διαμέτρου $h_{\max} + 1$.

Μια αντιμετώπιση του προβλήματος πλεονασματικών λήψεων και αναμεταδόσεων είναι να αναμεταδίδει κάθε κόμβος μόνο κάτι που δεν έχει προηγουμένως μεταδώσει. Σε αυτήν την περίπτωση οι κόμβοι πρέπει να «θυμούνται» τα μηνύματα που έχουν στείλει και έτσι να προωθούν μόνο νέα μηνύματα «έκπληξη» [Surprise Flooding, Πρωτόκολλο 5.3].

Στο παρακάτω πρωτόκολλο υπάρχει ωστόσο ένα πρόβλημα «μνήμης». Στην περίπτωση που υπάρχει μεγάλος αριθμός περιβαλλοντικών συμβάντων η μνήμη για την αποθήκευση του συνόλου S εξαντλείται. Μια αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η διαχείριση της αποθήκευσης βάση κυκλικής λίστας FIFO, όπου το παλιότερο στοιχείο αντικαθίστανται από το νεότερο όταν η μνήμη εξαντλείται. Ωστόσο και αυτή η αντιμετώπιση μπορεί να παρουσιάσει πρόβλημα. Μια καθυστερημένη έλευση ενός ήδη κεκτημένου μηνύματος που έχει αφαιρεθεί από τη λίστα, θα προκαλέσει εκ νέου εισαγωγή και αναμετάδοση.

Πρωτόκολλο 5.3 Surprise Flooding [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , $s : V \rightarrow \mathbb{R}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{ \text{IDLE} \}, \emptyset)$ (το κενό σύνολο σημαίνει ανυπαρξία μετάβασης)

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

Τοπικά δεδομένα: Σύνολο $S \subset \mathbb{R} \times \mathbb{N}$ ωφέλιμο φορτίο λήψης, αρχικώς $S := \emptyset$.

IDLE

When $\dot{s} > 100$; συμβάν υπέρβασης

broadcast (msge, \dot{s} , id)

Receiving(msge, s, i)

if (s, i) $\notin S$ **then** ; έλεγχος για έκπληξη

set $S := S \cup \{ (s, i) \}$

broadcast (msge, s, i)

5.2.2 Αλγόριθμος Δρομολόγηση φήμης (Rumor Routing)

Ένας περισσότερο 'μη τετριμμένος' αλγόριθμος για την διάχυση πληροφοριών σε ένα δίκτυο είναι ο καλούμενος *δρομολόγηση φήμης*. Ο αντικειμενικός στόχος του αλγορίθμου *δρομολόγηση φήμης* είναι να δρομολογούνται πληροφορίες από ορισμένους «κόμβους πηγής» σε ορισμένους άλλους «κόμβους προορισμούς» (είτε κατ' απαίτηση από τους κόμβους προορισμούς είτε όχι) [20].

Η διάχυση πληροφοριών αφορά δύο τύπους μηνυμάτων:

1. Αιτήματα (queries).
2. Μηνύματα απόκρισης.

Σε αυτόν τον αλγόριθμο ενσωματώνονται ταυτοχρόνως τρεις ταχτικές διάδοσης πληροφορίας οι οποίες είναι οι εξής:

- ταχτική πλημμύρας: όπως έγινε προφανές από τα προηγούμενα κατά την ταχτική της πλημμύρας (flooding) επιχειρείται η διάδοση της πληροφορίας από έναν κόμβο σε όλο το δίκτυο με το να προωθεί κάθε κόμβος το μήνυμα σε όλους τους κόμβους γείτονες. Εφόσον πρόκειται για συνεκτικό γράφημα συνδεσιμότητας, εκκινώντας τη διαδικασία από κάποιον κόμβο το μήνυμα διαχέεται σε όλο το δίκτυο,
- ταχτική κουτσομπολιού (gossiping): το κουτσομπολιό είναι μια ταχτική όπου επιπλέον καθορίζεται πιθανοκρατικά από κάθε κόμβο, εάν το λαμβανόμενο μήνυμα πρόκειται 'καν να προωθηθεί. Η προώθηση είναι ενδεχόμενη βάση κάποιας πιθανότητας g.

- ταχτική τυχαίου περιπάτου (random walk): το λαμβανόμενο μήνυμα προωθείται αποκλειστικά σε ένα και μόνο γείτονα ο οποίος επιλέγεται τυχαία.

Ο αντικειμενικός στόχος του αλγορίθμου είναι η διάχυση μηνυμάτων σημαντικών περιβαλλοντικών συμβάντων (π.χ. hot spot) από κόμβους πηγές (sources) στο δίκτυο και η δρομολόγηση τους σε ενδεχόμενους κόμβους προορισμούς (sinks) (π.χ. που έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον βάση ενός αιτήματος Query). Τα μηνύματα κατ' αυτή τη διαδικασία διασχίζουν τυχαία το δίκτυο. Στον τυχαίο τους περίπατο αφήνουν ένα ίχνος από "ψίχουλα", όπου κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα μήνυμα πόρου ή αιτήματος αποθηκεύει την ταυτότητα του προκατόχου του δηλ. του κόμβου από τον οποίο το έλαβε. Όταν ένα μήνυμα αιτήματος συναντηθεί με ένα μήνυμα πόρου σε κάποιον κόμβο στο δίκτυο, ο κόμβος αυτός στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες ίχνους δρομολογεί άμεσα το αίτημα προς τον κόμβο πηγή του πόρου. Η διαδικασία παύει όταν το αίτημα τελικά φτάσει στον κόμβο πηγή. Στο σημείο αυτό το δίκτυο περιέχει πλέον όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται για περαιτέρω δρομολόγηση μηνυμάτων άμεσα από την πηγή προς τον προορισμό. Στην προκείμενη διαδικασία ταυτόχρονα συμβαίνει και βελτιστοποίηση των μονοπατιών διάδοσης. Το συναρμολογούμενο πρωτόκολλο βάση των τριών ταχτικών είναι το ακόλουθο:

Πρωτόκολλο 5.4 Δρομολόγηση φήμης (Rumor routing) [20]

Περιορισμοί: \mathcal{N}/\mathcal{B} , $s : V \rightarrow \mathbb{R}$, $id : V \rightarrow \mathbb{N}$, πιθανότητα g

Συστ. Πεπ. Κατ.: { (IDLE, RSRC), (RSRC, DONE) }

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

Τοπικά δεδομένα: Προκάτοχος πόρου (id) $i_s := 0$, Προκάτοχος αιτήματος (id) $i_q := 0$,
μετρητής βημάτων πόρου $h_s := 0$

IDLE

When $s > 100$; συμβάν υπέρβασης
if ($n = 1$), where n is randomly selected with probability $P(n = 1) = g$ **then**
 send (rsrc, 1, id) to **one-of** nbr ; μονοεκπομπή (unicast) με πιθαν. g
 ; σε ένα τυχαίο γείτονα
become RSRC

When External request for environmental event initiated ; αίτηση Query
 send (rqst, id) to **one-of** nbr ; unicast σε ένα τυχαίο γείτονα

Receiving (rsrc, h, i) ; λήψη μηνύματος πόρου
 set $h_s := h$ and $i_s := i$; αποθήκευση βημάτων προς τον πόρο και id προκατόχου
 send (rsrc, h + 1, id) to **one-of** nbr
become RSRC

Receiving (rqst, i)
 set $i_q := i$; αποθήκευση id προκατόχου αιτήματος
 send (rqst, id) to **one-of** nbr

RSRC

When External request for environmental event initiated ; αίτηση Query

```

if ( $h_s = 0$ ) then           ; τότε είναι κάτοχος του πόρου
  become DONE
else
  send ( $rqst, id$ ) to node  $u \in nbr$  with  $id = i_s$ 

```

```

Receiving ( $rsrc, h, i$ )
  if ( $h < h_s$ ) then         ; βελτιστοποίηση μονοπατιού διάδοσης
    set  $h_s := h$  and  $i_s := i$  ; αποθήκευση βημάτων προς τον πόρο και id προκατόχου
  send ( $rsrc, h_s + 1, id$ ) to one-of  $nbr$ 

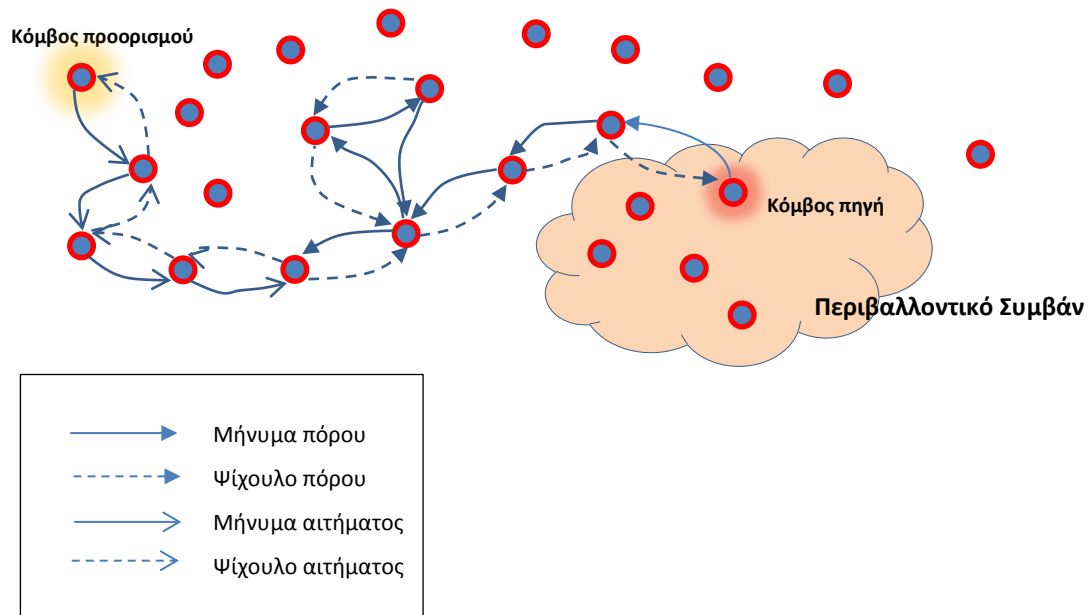
```

```

Receiving ( $rqst, i$ )
  if ( $h_s = 0$ ) then
    become DONE
  else
    set  $i_q := i$            ; αποθήκευση id προκατόχου αιτήματος
    send ( $rqst, id$ ) to node  $u \in nbr$  with  $id = i_s$ 

```

Η εξέλιξη μιας διαδικασίας δρομολόγησης φήμης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3 Η εξέλιξη μιας διαδικασίας δρομολόγησης φήμης.

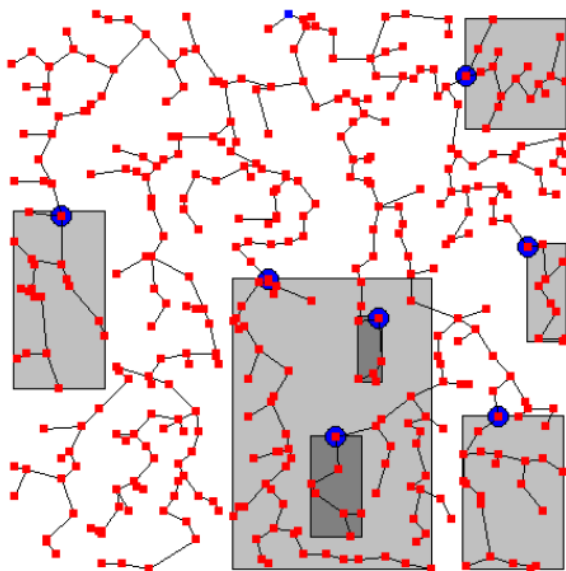
5.2 Κατασκευή a posteriori τοπολογιών συνδεσιμότητας δικτύου γεωαισθητήρων

Η κατασκευή a posteriori τοπολογιών συνδεσιμότητας (δεδομένης της συνδεσιμότητας «γειτονιάς» UDG που παρέχεται a priori από την φυσική συνδεσιμότητα του δικτύου όπως αναφέρθηκε στο 4^ο κεφάλαιο) απαιτείται πολλές φορές για την ανάπτυξη αποτελεσματικών διαδικασιών επεξεργασίας πληροφοριών σε δίκτυα γεωαισθητήρων.

Ο περιορισμός της συνδεσιμότητας των κόμβων βάση των νέων παραγόμενων τοπολογιών οδηγεί σε περιορισμό πληροφοριακών ροών στις διαδικασίες με αποτέλεσμα αποδοτικότερης προσπέλασης των κόμβων και μείωση της επικοινωνιακής πολυπλοκότητας. Οι παραγόμενες δομές συνδεσιμότητας παρέχουν εν κατακλείδι λογικά δίκτυα κάλυψης (overlay network) που η αξιοποίηση τους οδηγεί σε αποτελεσματικές και αποδοτικές διαδικασίες.

5.2.1 Δένδρα

Τα δένδρα αποτελούν σημαντικά λογικά δίκτυα κάλυψης για επεξεργασίες χωρικής πληροφορίας σε δίκτυα γεωαισθητήρων. Παραδείγματα αποτελούν η αξιοποίηση τους σε διαδικασίες ευρετηρίασης χωρικής πληροφορίας [36] και για υλοποίηση συναθροιστικών συναρτήσεων. Το SPIX index είναι μια δομή κατανεμημένου ευρετηρίου που εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε δίκτυα αισθητήρων. Μια παράσταση του φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.4), όπου φαίνεται η αξιοποίηση δεντρικών δομών κάλυψης, για δρομολόγηση του query και τα minimum bounding rectangles (MBR) και δυναμική διαχείριση των πληροφοριών του ευρετηρίου.



Σχήμα 5.4 Δένδρο Spix

5.2.3 Δημιουργία ενός δένδρου με γνωστή ρίζα

Με δεδομένη τη ρίζα είναι εύκολη η κατασκευή ενός δένδρου κάλυψης δικτύου (tree overlay network). Ο κόμβος ρίζα απλά μεταδίδει ένα μήνυμα 'tree' μαζί με το

αναγνωριστικό του σε όλους τους γείτονες. Όταν κάποιος γείτονας το λαμβάνει για πρώτη φορά αποθηκεύει το αναγνωριστικό ως «δείκτη» πατέρα. Ακολούθως ο γείτονας στέλνει το μήνυμα 'tree' με το δικό του αναγνωριστικό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από τον επόμενο κόμβο που λαμβάνει το μήνυμα. Εφόσον κάθε κόμβος καθορίζει μία φορά τον «δείκτη» προς τον πατέρα του (id) και βάση του ότι τα ανά δύο διαδοχικά επίπεδα γειτονιάς που μεταδίδονται τα μηνύματα αποκλείονται να επικοινωνούν μεταξύ τους στο τέλος της διαδικασίας κάθε κόμβος έχει έναν μοναδικό δείκτη πατέρα και τελικά στο λογικό δίκτυο κάλυψης δεν υφίστανται κύκλοι.

Η διαδικασία αυτή ορίζεται τυπικά από το ακόλουθο πρωτόκολλο [Πρωτόκολλο 5.5]

Πρωτόκολλο 5.5 Δημιουργία δένδρου με γνωστή ρίζα [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} ; identifier function $id : V \rightarrow \mathbb{N}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{(ROOT, IDLE, DONE), \{(ROOT, DONE), (IDLE, DONE)\}\}$

Αρχικοποίηση: Ένας κόμβος ROOT, οι υπόλοιποι IDLE

Τοπικά δεδομένα: $parent : V \rightarrow \mathbb{N} \cup \{-1\}$, $parent := -1$

ROOT

Spontaneously

broadcast (tree, id)

; Broadcast root identifier

become DONE

IDLE

Receiving (tree, i)

set $parent := i$

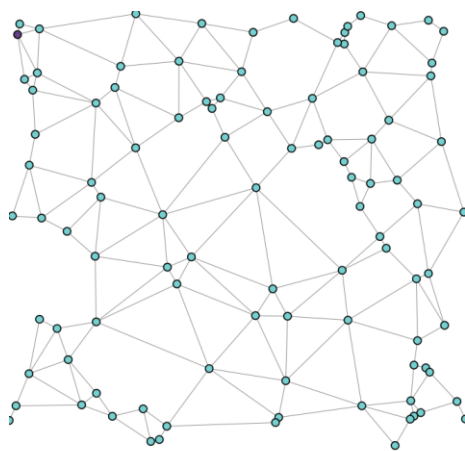
; Store parent id

broadcast (tree, id)

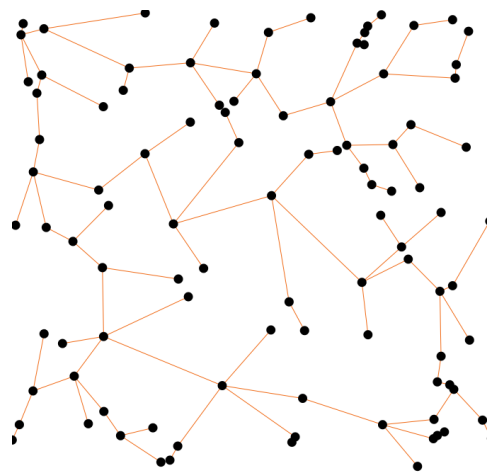
; Broadcast node id

become DONE

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας σε ένα επίπεδο γράφημα φαίνεται στο σχήμα (Σχήμα 5.5).



(α)



(β)

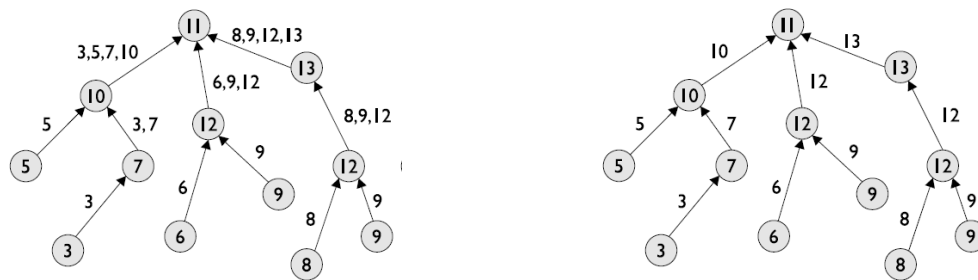
Σχήμα 5.5 Δημιουργία ενός δένδρου με γνωστή ρίζα (α) αρχικό γράφημα, (β) δένδρο

Το παραπάνω πρωτόκολλο δεν εξασφαλίζει τίποτα άλλο για την δομή του παραγόμενου γραφήματος πέρα από το ότι πρόκειται για ένα δένδρο. Πολλές όμως από τις ιδιότητες του παραγόμενου δένδρου όπως το μήκος των μονοπατιών του μπορεί να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στους αλγορίθμους. Μια χρήσιμη αναμόρφωση του πρωτοκόλλου θα ήταν η κατασκευή ενός δένδρου με τα συντομότερα μονοπάτια.

5.2.4 Εφαρμογή συναθροιστικών συναρτήσεων

Οι λειτουργίες συνάθροισης δεδομένων όπως count, min, max, average σε ένα «συγκεντρωμένο» σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών αποτελούν χρήσιμες λειτουργίες. Ανάλογα χρήσιμες μπορεί να είναι και σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων, όπως για παράδειγμα η ανάγκη υπολογισμού της μέσης τιμής των δεδομένων που συλλέγονται από τους κόμβους του δικτύου π.χ. η μέση τιμή της θερμοκρασίας σε ένα περιβάλλον ηφαιστειακής δραστηριότητας κ.α..

Στο ακόλουθο σχήμα ξεκινώντας κανείς από τους κόμβους φύλλα μπορεί να κατανοήσει την εξέλιξη μιας υπολογιστικής διαδικασίας συνάθροισης Max, όπως θα συντελούνταν (α) βάση συγκεντρωμένης προσέγγισης και (β) βάση αποκεντρωμένης προσέγγισης σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων.



(α) συγκεντρωμένη προσέγγιση

(β) αποκεντρωμένη προσέγγιση

Σχήμα 5.6 Εφαρμογή συναθροιστικής συνάρτησης Max σε δίκτυο γεωαισθητήρων

Από το σχήμα γίνεται αντιληπτό ότι μια τέτοια διαδικασία απαιτεί μια δενδρική δομή κάλυψης όπου σε κάθε κόμβο είναι γνωστά πέρα από τον πατέρα όπως καθορίστηκε στο προηγούμενο πρωτόκολλο και τα παιδιά του κάθε κόμβου. Το πρωτόκολλο που ακολουθεί αποτελεί επέκταση του προηγούμενου όπου σε κάθε κόμβο επιπλέον του πατέρα γίνεται διαθέσιμη κατά την εκτέλεση και η πληροφορία των παιδιών [Πρωτόκολλο 5.6]. Το πρωτόκολλο βασίζεται στην ιδέα διάδοσης του μηνύματος 'tree' επιπλέον της πληροφορίας του προσωπικό id και του id του κόμβου πατέρα. Κάθε κόμβος που έχει μεταδώσει αυτήν την πληροφορία μεταβαίνει στην κατάσταση DONE και κατά τη λήψη των επόμενων μηνυμάτων επικαιροποιεί μια λίστα παιδιών.

Πρωτόκολλο 5.6 Κατασκευή δένδρου με πληροφορίες πατέρα και παιδιών [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} ; $id : V \rightarrow \mathbb{N}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{ROOT, IDLE, DONE\}, \{(ROOT, DONE), (IDLE, DONE)\})$

Αρχικοποίηση: Ένας κόμβος ROOT, οι υπόλοιποι IDLE

Τοπικά δεδομένα: $children : V \rightarrow 2^N$, $children := \emptyset$, $parent : V \rightarrow \mathbb{N} \cup \{-1\}$, $parent := -1$

ROOT

Spontaneously

broadcast (tree, id, -1) ; *Ευρεία εκπομπή id*
become DONE

IDLE

Receiving (tree, i, j)

set parent := i ; *Αποθήκευση id πατέρα*
broadcast (tree, id, i) ; *Ευρεία εκπομπή id*
become DONE

DONE

Receiving (tree, i, j)

if j = id **then** ; *Internal node overhears a child*
set children := children \cup {i} ; *Αποθήκευση id παιδιού*

Ακολούθως φαίνεται η αξιοποίηση δενδρικής κάλυψης δικτύου σε έναν αλγόριθμο συνάθροισης [πρωτόκολλο 5.6]. Ο αλγόριθμος αυτός καλείται TAG (Tiny Aggregation) λόγω του λειτουργικού συστήματος TinyOS για το οποίο αρχικώς και υλοποιήθηκε [20]. Στον αλγόριθμο TAG θεωρείται ότι κάθε κόμβος σε ένα δίκτυο αισθητήρων διαθέτει μια τιμή π.χ. ανιχνευόμενη θερμοκρασία (Σχήμα 5.6). Εν αντιθέσει όπως θα συνέβαινε σε μια συγκεντρωμένη προσέγγιση υπολογισμών (Σχήμα 5.6α) όπου απλά όλα τα δεδομένα θα προωθούνταν προς τον κόμβο ρίζα του δένδρου, ο αλγόριθμος TAG επεξεργάζεται σταδιακά το αποτέλεσμα με τοπικές επεξεργασίες σε κάθε κόμβο. Συγκεκριμένα ξεκινώντας από τους κόμβους φύλλα, κάθε κόμβος μεταδίδει την τιμή του στον αντίστοιχο πατέρα. Ο πατέρας στη συνέχεια υπολογίζει την μέγιστη τιμή των κόμβων παιδιών του και την προωθεί προς τον δικό του πατέρα στο επόμενο επίπεδο του δένδρου κ.ο.κ.. Η διαδικασία τελικώς σταματάει στη ρίζα, όπου γίνεται διαθέσιμη η τιμή της συνάθροισης (Σχήμα 5.6β). Το πρωτόκολλο ορίζεται τυπικά ως ακολούθως [Πρωτόκολλο 5.7].

Ο TAG σχετίζεται με μία ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων που είναι γνωστή ως αποτίμηση κατανεμημένης συνάρτησης (distributed function evaluation): υπολογισμός μιας συνάρτησης ειδικών χαρακτηριστικών σε ένα κατανεμημένο σύστημα. Τα "ειδικά χαρακτηριστικά" σε αυτήν την περίπτωση αφορούν συναρτήσεις που ορίζουν προσεταιριστικές και αντιμεταθετικές διμελείς πράξεις (αντιμεταθετικές ημιομάδες - commutative semigroups). Για παράδειγμα, η συνάρτηση $\max : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι αντιμεταθετική ημιομάδα, αφού είναι αντιμεταθετική, $\max(n_1, n_2) = \max(n_2, n_1)$ και προσεταιριστική $\max(\max(n_1, n_2), n_3) = \max(n_1, \max(n_2, n_3))$. Και πολλές άλλες συνήθεις διμελείς πράξεις, όπως το \min (ελάχιστο), το άθροισμα (sum) αποτελούν αντιμεταθετικές ημιομάδες.

Πρωτόκολλο 5.7 Υπολογισμός συναθροιστικής συνάρτησης μέγιστης τιμής
(αλγόριθμος TAG) [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , $s : V \rightarrow \mathbb{R}$, $children : V \rightarrow 2^N$, $parent : V \rightarrow \mathbb{N} \cup \{-1\}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{\{IDLE, LSTN\}, \{\{IDLE, LSTN\}\}\}$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

Τοπικά δεδομένα: Μέγιστη τιμή m , μετρητής ληφθέντων μηνυμάτων r , $r := 0$

IDLE

Spontaneously

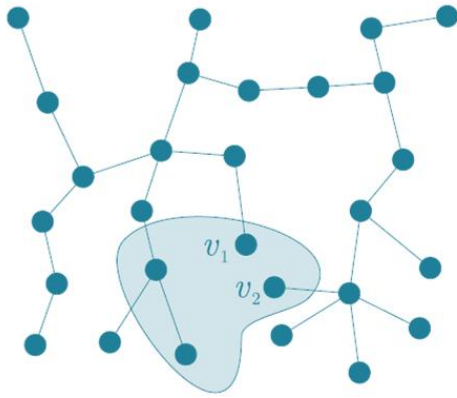
```
set  $m := \hat{s}$  ; αρχικοποίηση  $m$ 
if  $children = \emptyset$  then ; έλεγχος για κόμβο φύλλου
  send (tagx, m) to parent ; αποστολή στον πατέρα ανιχν. τιμής
become LSTN
```

LSTN

Receiving (tagx, d)

```
set  $r := r + 1$  ; μετρητής λαμβανόμενων μηνυμάτων
set  $m := \max(d, m)$  ; αποθηκ. μεγαλύτερου γνωστού data point
if  $|children| = r$  then ; έλεγχος εάν όλα τα παιδιά προώθησαν
  if parent = -1 then ; έλεγχος για κόμβο ρίζας
    Maximum value in network is m ; Εντοπισμός μέγιστης τιμής
  else
    send (tagx, m) to parent ; αποστολή στον πατέρα ανιχν. τιμής
```

Οι περισσότερες χωρικές συναρτήσεις δεν μπορούν να υπολογιστούν βάση της παραπάνω στρατηγικής (TAG) διότι δεν αποτελούν αντιμεταθετικές ημιομάδες. Ακόμα και στην περίπτωση της αποτίμησης μιας συναθροιστικής συνάρτησης (αντιμεταθετικής ημιομάδας) για ένα χωρικό χαρακτηριστικό (π.χ. η ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας σε μια περιοχή) η χρήση της απλής δομής δενδρικής κάλυψης ενδέχεται να μην παρέχει αποτελεσματικές λύσεις. Αυτό συμβαίνει διότι δύναται να υφίστανται «δυσανάλογες» χωρικές σχέσεις μεταξύ της τοπολογίας συνδεσιμότητας των κόμβων και μεταξύ των χωρικών χαρακτηριστικών στην πραγματικότητα π.χ. δύο κόμβοι που είναι γείτονες στο αρχέτυπο γράφημα συνδεσιμότητας UDP είναι ουσιαστικά και χωρικά εγγύς (λόγω της χωρικά περιορισμένης συνδεσιμότητας-εμβέλεις των κόμβων), ενώ δύο κόμβοι που είναι χωρικά εγγύς δεν είναι κατ' ανάγκη και τοπολογικά εγγύς (εφόσον τοποθετούνται αυθαίρετα στο δένδρο -μη λαμβάνοντας υπόψη την σχέση της τοπολογικής και της πραγματικής τους απόστασης). Ένα παράδειγμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.7). Οι χωρικά εγγύς κόμβοι u_1 και u_2 είναι τοπολογικά μάλλον απομακρυσμένοι στο δένδρο αφού συνδέονται με ένα μονοπάτι 9 ενδιάμεσων κόμβων, ενώ στην πραγματικότητα είναι χωρικά εγγύς. Έτσι εάν εφαρμοστεί ένα αλγόριθμος σε αυτή τη δομή στη συγκεκριμένη περίπτωση που βασίζεται σε συνεργεία χωρικά κοντινών κόμβων (εδώ u_1 και u_2) είναι πιθανό να υπάρξουν προβλήματα αποδοτικότητας των διαδικασιών εν συγκρίσει με την αξιοποίηση άλλων δομών γειτονιάς από τις διαδικασίες.



Σχήμα 5.7 Χωρικά εγγύς κόμβοι και τοπολογικά απομακρυσμένοι σε δενδρική κάλυψη: v_1 και v_2 [20].

5.3 Εκλογή κόμβου ηγέτη σε δίκτυο γεωαισθητήρων

Στις προηγούμενες ενότητες περιγράφηκαν διαδικασίες κατασκευής δενδρικών δομών δεδομένου του κόμβου εκκίνησης των αλγορίθμων. Όμως σε πολλές περιπτώσεις ο κόμβος εκκίνησης δεν είναι δεδομένος και πρέπει με κάποιον τρόπο να προσδιοριστεί. Αυτό μπορεί να συμβαίνει διότι για κάποιον υπολογισμό μπορεί να μην είναι ουσιαστικά προφανής κάποιος συγκεκριμένος κόμβος ή να μην έχει καθοριστεί εκ των προτέρων. Ο καθορισμός ενός κόμβου εκκίνησης των αλγορίθμων συνδέεται στενά με μια σημαντική κατηγορία προβλημάτων σε κατανεμημένα συστήματα που ονομάζονται προβλήματα *εκλογής ηγέτη (leader election)*. Η εκλογή ηγέτη αφορά μηχανισμούς σε ένα κατανεμημένο σύστημα για τον καθορισμό ενός κόμβου εκκίνησης ή κόμβου συντονιστή εργασίας. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλοί προχωρημένοι αλγόριθμοι για την εκλογή ενός κόμβου ηγέτη και για διαφορετικούς τύπους δικτύων [20]. Η ανάγκη εκλογής ενός κόμβου ηγέτη είναι χρήσιμη και σε πολλά προβλήματα που σχετίζονται με επεξεργασίες χωρικών πληροφοριών σε δίκτυα γεωαισθητήρων. Ωστόσο το θέμα δεν θα αναπτυχθεί περαιτέρω και ο ενδιαφερόμενος προτρέπεται στη βιβλιογραφία [20].

5.4 Ποιοτικές επεξεργασίες χωρικής ανάλυσης σε δίκτυο γεωαισθητήρων

Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες είναι γενικά χρήσιμοι για την υλοποίηση διαδικασιών σε δίκτυα γεωαισθητήρων. Ωστόσο δεν αφορούν άμεσα χωρικές πράξεις ή χωρικές λειτουργίες. Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται δύο αλγόριθμοι βάση γειτονιάς που αφορούν χωρικές πράξεις/λειτουργίες. Ο πρώτος αλγόριθμος αφορά την κατασκευή ορίου μιας περιοχής και ο δεύτερος αφορά τον καθορισμό των τοπολογικών σχέσεων μεταξύ δύο περιοχών, θεμελιώδεις λειτουργίες της χωρικής ανάλυσης²⁵ [20].

²⁵ Η χωρική ανάλυση αφορά κάθε εφαρμοσμένη τεχνική για τη μελέτη των οντοτήτων βάση των τοπολογικών, γεωμετρικών και γεωγραφικών τους χαρακτηριστικών.
[πηγή: http://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_analysis]

5.4.1 Όρια περιοχών (Region Boundaries)

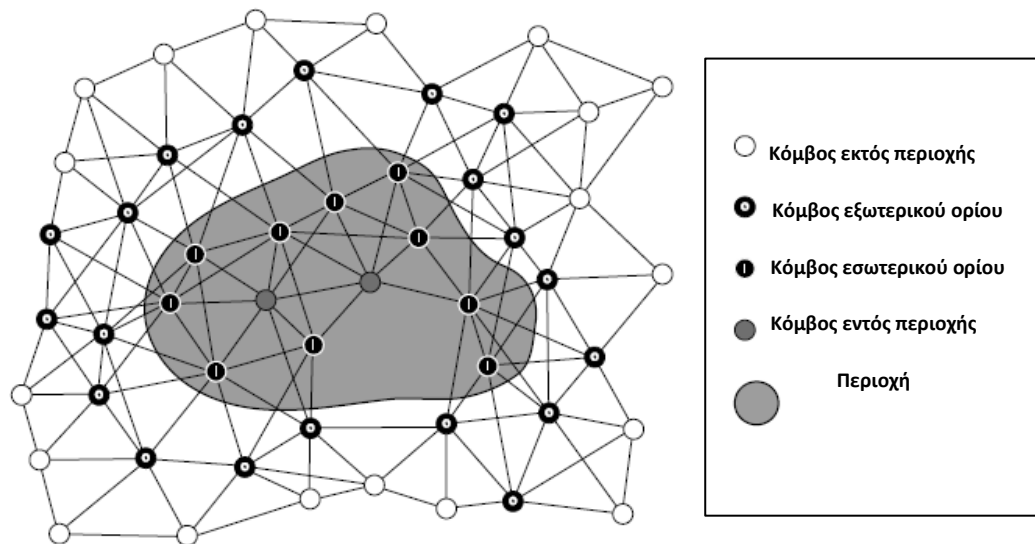
Μια από τις θεμελιώδεις αφαιρετικές χωρικές οντότητες που εμπλέκονται στη χωρική σκέψη αποτελεί η *περιοχή*. Ως περιοχή συνήθως θεωρείται ένα περιορισμένο και συνεκτικό κομμάτι του χώρου, ένα ισχυρά συνεκτικό κομμάτι ίσως επίπεδου χώρου, τοπολογικά ισοδύναμο με έναν συμπαγή δίσκο. Υφίσταται και η θεώρηση *σύνθετων περιοχών* που μπορεί να δομούνται από μη συνεκτικά κομμάτια χώρου, να περιέχουν τρύπες κ.α..

Η περιοχή και το όριο της είναι αλληλένδετες έννοιες. Ένα όριο ορίζεται βάση της περιοχής που περιέχει (ή περιορίζει). Και μια περιοχή δίχως το όριο απλά δεν υφίσταται.

Περιοχές δύναται να καθορίζονται σε πεδία (fields) βάση τυπικών περιορισμών π.χ. περιοχή θερμοκρασιακού πεδίου τιμής μεγαλύτερης του 1°C. Εναλλακτικά περιοχές δύναται να καθορίζονται βάση φυσικών περιορισμών π.χ. περιοχή πετρελαιοκηλίδας. είναι η θαλάσσια επιφανειακή ζώνη όπου υπάρχει πετρέλαιο. Η τυπική αναπαράσταση μιας περιοχής σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων μπορεί να γίνει από μια συνάρτηση αισθητήρα με τιμές στο σύνολο bool δηλ. $s: V \rightarrow \{0, 1\}$, όπου για κάποιο κόμβο $u \in V$, $s(u) = 0$ σημαίνει ότι κόμβος βρίσκεται εκτός της περιοχής και $s(u) = 1$ σημαίνει ότι ο κόμβος βρίσκεται εντός της περιοχής.

Σε αυτό το σημείο τίθεται το εξής πρόβλημα: Δεδομένων αυτών των πληροφοριών δηλαδή της συνάρτησης $s: V \rightarrow \{0, 1\}$ σε ένα μοντέλο γειτονιάς ενός δικτύου γεωαισθητήρων να προσδιοριστεί το όριο της περιοχής.

Στα πλαίσια της απλής δομής γειτονιάς το πρόβλημα ανάγεται στον καθορισμό κάθε κόμβου είτε ως κόμβου ορίου είτε ως κόμβου μη ορίου. Εδώ υπάρχουν δύο περιπτώσεις: ο καθορισμός κόμβων του *εσωτερικού ορίου* (*inner boundary*) και ο καθορισμός κόμβων του *εξωτερικού ορίου* (*outer boundary*). Ένας κόμβος ανήκει στο εσωτερικό όριο μιας περιοχής όταν ανήκει στην περιοχή δηλ. $\hat{s}=1$ και γειτονεύει άμεσα (συνδέεται τοπολογικά με ακμή 1-βήματος) με κάποιον κόμβο που βρίσκεται εκτός της περιοχής ($\hat{s}=0$). Αντίστοιχα, ένας κόμβος ανήκει στο εξωτερικό όριο μιας περιοχής όταν δεν ανήκει στην περιοχή ($\hat{s}=0$) και γειτονεύει άμεσα με έναν κόμβο εντός της περιοχής ($\hat{s}=1$) [βλ. Σχήμα 5.8].



Σχήμα 5.8 Κόμβοι εσωτερικού και εξωτερικού ορίου [20].

Στο σχήμα φαίνεται ένα δίκτυο εντός μιας περιοχής (π.χ. μιας περιοχής υψηλών θερμοκρασιών). Οι κόμβοι που βρίσκονται εκτός της περιοχής και συνδέονται με κόμβους

εντός της περιοχής επιγράφονται με '0' και αποτελούν κόμβους του εξωτερικού ορίου. Αντίστοιχα, οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της περιοχής και συνδέονται με κόμβους εκτός της περιοχής επιγράφονται με '1' και αποτελούν κόμβους του εσωτερικού ορίου. Κόμβοι που δεν ανήκουν στα όρια απεικονίζονται ως λευκοί (εάν βρίσκονται εκτός της περιοχής) και γκριζοί όταν βρίσκονται εντός της περιοχής.

Βάση των παραπάνω καθορισμών έχει αναπτυχθεί το ακόλουθο πρωτόκολλο καθορισμού του εσωτερικού ορίου μιας περιοχής [Πρωτόκολλο 5.8].

Πρωτόκολλο 5.8 Καθορισμός εσωτερικού ορίου μιας περιοχής [20].

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , συνάρτηση αισθητήρα $s : V \rightarrow \{0, 1\}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{(INIT, IDLE, BNDY), \{(INIT, IDLE), (IDLE, BNDY)\}\}$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι INIT

INIT

Spontaneously

broadcast (ping, \hat{s}) ; *Broadcast sensed value*

become IDLE

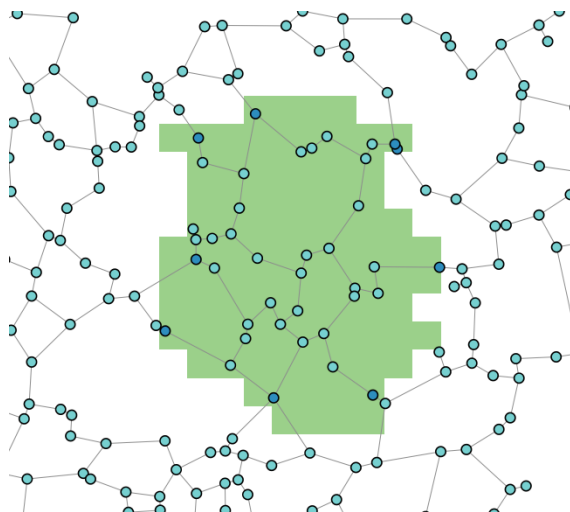
IDLE

Receiving (ping, s')

if $s' \neq \hat{s}$ and $\hat{s} = 1$ **then** ; *Check if node is in the region, but adjacent to node outside*

become BNDY

Στο παραπάνω πρωτόκολλο αρχικά κάθε κόμβος κοινοποιεί στους γείτονες του την τιμή αισθητήρα του \hat{s} και τίθεται σε κατάσταση IDLE. Οι κόμβοι που ανήκουν στην περιοχή και βρίσκονται σε κατάσταση IDLE όταν λάβουν ένα μήνυμα ενός κόμβου γείτονα που βρίσκεται εκτός της περιοχής, τίθενται σε κατάσταση BNDY, δηλ. ανήκουν στο εσωτερικό όριο. Μια εκτέλεση του αλγορίθμου φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου οι προσδιορισθέντες κόμβοι του ορίου φαίνονται με πιο σκούρο χρώμα (Σχήμα 5.9).



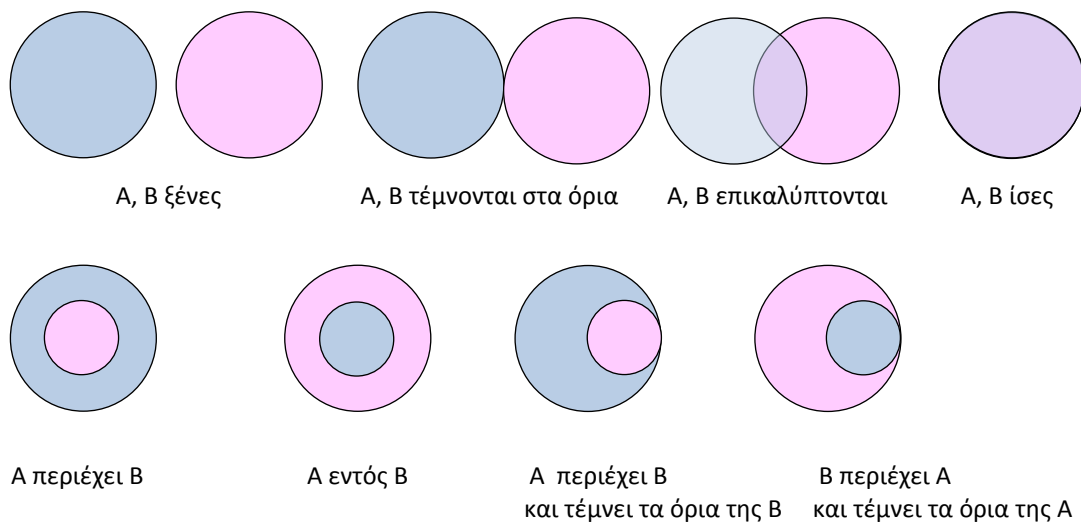
Σχήμα 5.9 Υπολογισμός εσωτερικού ορίου περιοχής

Όσον αφορά την αποδοτικότητα το πρωτόκολλο 5.8 απαιτεί από κάθε κόμβο την αποστολή ακριβώς ενός μηνύματος, που συνεπάγεται εξισορρόπηση φορτίου $\Theta(1)$ και συνολική επικοινωνιακή πολυπλοκότητα $\Theta(|V|)$. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι ορισμένοι κόμβοι δεν καθορίζονται «εσφαλμένα» ως κόμβοι ορίου εξαιτίας της εξάρτησης του αλγορίθμου από την «τοπική» συνδεσιμότητα κάθε κόμβου. Τέτοιοι κόμβοι διακρίνονται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 5.9). Για τον ίδιο λόγο ορισμένοι κόμβοι οι οποίοι είναι σχετικά απομακρυσμένοι από το όριο της περιοχής καθορίζονται ως κόμβοι ορίου.

Επιπλέον έστω και εάν οι κόμβοι καθορίζονται ως σημεία επί ενός ορίου, δεν υπάρχει προφανής μηχανισμός για συσχετισμό τους έτσι ώστε οι κόμβοι να σχηματίζουν ένα «συνεχές σύνορο» π.χ. στη μορφή ενός κύκλου κόμβων επί του γραφήματος συνδεσιμότητας. Κάποιος μπορεί ορθώς να ισχυριστεί ότι οι κόμβοι που καθορίζονται ως κόμβοι ορίου βάση του παραπάνω πρωτοκόλλου ουσιαστικά δεν αντιστοιχούν σε μία μόνο περιοχή αλλά οριοθετούν πολλαπλές μη συνεκτικές περιοχές. Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστούν περισσότεροι εξελιγμένοι αλγόριθμοι για την ανίχνευση των ορίων που αντιμετωπίζουν ορισμένα από αυτά τα σημαντικά θέματα.

5.4.2 Αλγόριθμος καθορισμού τοπολογικών σχέσεων δύο περιοχών

Οι τοπολογικές σχέσεις ανάμεσα σε δύο περιοχές μπορούν να καθοριστούν συστηματικά βάση του γνωστού χωρικού μοντέλου των 4-τομών (4-intersection model) [38]. Στο μοντέλο 4-τομών καθορίζονται τυπικά 8 διακριτές τοπολογικές σχέσεις που μπορεί να υφίστανται μεταξύ δύο περιοχών (Σχήμα 5.10). Οι σχέσεις αυτές είναι αλληλοαποκλειόμενες για δύο περιοχές, δηλ. ακριβώς μία και μόνο σχέση υφίσταται για δύο αυθαίρετες περιοχές [20].



Σχήμα 5.10 8 πιθανές τοπολογικές σχέσεις ανάμεσα σε 2 περιοχές σύμφωνα με το μοντέλο των 4-τομών.

Μια κωδικοποίηση των παραπάνω σχέσεων μπορεί να προκύψει βάση της παρατήρησης ότι η κάθε μία από αυτές τις σχέσεις καθορίζεται από το αποτέλεσμα των εξής τεσσάρων τομών [20]:

- $\partial A \cap \partial B$, όπου ∂A και ∂B δηλώνουν αντίστοιχα τα όρια των περιοχών A και B .

- $A^\circ \cap \partial B$, όπου A° δηλώνει τον εσωτερικό χώρο της περιοχής A (δηλαδή τον υπόλοιπο χώρο της περιοχής πέρα από το όριο).
- $\partial A \cap B^\circ$ όπου B δηλώνει τον εσωτερικό χώρο της περιοχής B.
- $A^\circ \cap B^\circ$

Ο Πίνακας 5.1 απεικονίζει την ικανοποιησιμότητα των οκτώ τοπολογικών σχέσεων δύο περιοχών A και B βάση των προαναφερθέντων 4 τομών. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τον πίνακα η καθεμιά από τις 8 σχέσεις ("ξένες", "τέμνονται στα όρια", "επικαλύπτονται" κλπ.) λαμβάνει εκ των αποτελεσμάτων των τεσσάρων τομών έναν μοναδικό προσδιοριστή (δυαδικό αριθμό ταυτότητας) με την αντιστοίχιση του κάθε αποτελέσματος: (0) για κενό σύνολο και (1) για μη κενό σύνολο. Επιπλέον μπορεί να αποδειχθεί ότι οι άλλοι 8 πιθανοί προσδιοριστές δεν είναι δυνατοί για δύο περιοχές που ανήκουν στο επίπεδο²⁶ π.χ. δεν έχει νόημα ο προσδιοριστής 0111 για δύο περιοχές στο επίπεδο, αφού δεν υπάρχουν 2 περιοχές στο επίπεδο που οι εσωτερικοί τους χώροι τέμνονται, το όριο της κάθε περιοχής τέμνει τον εσωτερικό χώρο του άλλου και τα δύο όρια δεν τέμνονται.

Πίνακας 5.1 Ικανοποιησιμότητα τοπολογικών σχέσεων στο μοντέλο 4-τομών

Τοπολογική σχέση	$\partial A \cap \partial B$	$A^\circ \cap \partial B$	$\partial A \cap B^\circ$	$A^\circ \cap B^\circ$
A, B ξένες	0	0	0	0
A, B τέμνονται στα όρια	1	0	0	0
A, B ίσες	1	0	0	1
A εντός B	0	0	1	1
A περιέχει B	0	1	0	1
B περιέχει A και τέμνει τα όρια της A	1	0	1	1
A περιέχει B και τέμνει τα όρια της B	1	1	0	1
A, B επικαλύπτονται	1	1	1	1

Το μοντέλο των 4-τομών χρησιμοποιείται ευρέως σε «συγκεντρωμένα» συστήματα επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών π.χ. στα περισσότερα συστήματα διαχείρισης χωρικών βάσεων δεδομένων όπως Oracle Spatial υλοποιούνται τελεστές για ερωτήματα που αφορούν αυτές τις οκτώ σχέσεις.

Ένα πρωτόκολλο καθορισμού τοπολογικών σχέσεων μεταξύ δύο περιοχών (για την υποστήριξη ερωτημάτων) σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα είναι το Πρωτόκολλο 5.9. Στον αλγόριθμο συνδυάζονται οι τεχνικές της κατασκευής δενδρικής δομής κάλυψης και του καθορισμού του ορίου μιας περιοχής οι οποίες περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Η κατασκευή δενδρικής δομής κάλυψης χρησιμοποιείται για την ιεραρχική σύνοψη των πληροφοριών που προκύπτουν από τις επεξεργασίες του πρωτοκόλλου. Δηλ. ώστε να προωθούνται και να συνοψίζονται τα αποτελέσματα των επεξεργασιών από τους κόμβους ιεραρχικά προς έναν κόμβο ρίζα.

²⁶ Μπορεί ωστόσο να είναι δυνατοί για άλλα σχήματα και χώρους διαφορετικών διαστάσεων.

Πρωτόκολλο 5.9 Προσδιορισμός τοπολογικής σχέσης δύο περιοχών [20].

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , $s : V \rightarrow 2^{\{A, B\}}$, $id : V \rightarrow \mathbb{N}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{\text{INIT}, \text{SINK}, \text{IDLE}, \text{DONE}\}, \{(\text{INIT}, \text{SINK}), (\text{IDLE}, \text{DONE})\})$

Αρχικοποίηση: Ένας κόμβος INIT, οι υπόλοιποι IDLE

Τοπικά δεδομένα: $bin : V \rightarrow \mathbb{B}^4$, $\dot{bin} := 0000$, $parent : V \rightarrow V \cup \{\emptyset\}$, $\dot{parent} := \emptyset$, $visited$
 neighbors N , $N := \emptyset$

INIT

Spontaneously

broadcast (tree, \dot{s} , \dot{id}) ; ο κόμβος προορισμού της απόκρισης του Query
become SINK ; εκκινεί τον αλγόριθμο στέλνοντας μήνυμα
 ; tree για τη δημιουργία του δένδρου

IDLE

Receiving (tree, x , i) from u

$N := N \cup \{u\}$; Επικαιροποίηση λίστας κόμβων γειτονιάς
if $\dot{parent} = \emptyset$ **then** ; Καθορισμός πατέρα κόμβου
 set $\dot{parent} := u$; Αποθήκευση πατέρα
 broadcast (tree, \dot{s} , \dot{id}) ; Συνέχιση κατασκευής δένδρου
if $x \neq \dot{s}$ and $\dot{s} = \{A, B\}$ **then** ; Έλεγχος κόμβων περιοχής $\{A, B\}$
 if $x = \{B\}$ **then set** $\dot{bin} := \dot{bin} \vee 0010$; ο κόμβος βρίσκεται στο όριο της A
 if $x = \{A\}$ **then set** $\dot{bin} := \dot{bin} \vee 0100$; ο κόμβος βρίσκεται στο όριο της B
 if $x = \emptyset$ **then set** $\dot{bin} := \dot{bin} \vee 1000$; ο κόμβος βρίσκεται στα όρια της A και της B
if $N = nbr$ **then** ; Έλεγχος εάν το μήνυμα tree ελείφθει από όλους τους γείτονες
 if $\dot{bin} = 0000$ and $\dot{s} = \{A, B\}$ **then**
 set $\dot{bin} := 0001$; έλεγχος εάν είναι εσωτερικό σημείο της περιοχής $\{A, B\}$
 if $\dot{bin} \neq 0000$ **then send** (rprt, \dot{bin}) to \dot{parent} ; Προώθηση μηνύματος
 ; σύνοψης προς τον πατέρα
become DONE

DONE, IDLE

Receiving (rprt, b)

if $b \vee \dot{bin} \neq \dot{bin}$ **then** ; Συνάθροιση δεδομένων
 set $\dot{bin} := b \vee \dot{bin}$; και προώθηση
 send (rprt, \dot{bin}) to \dot{parent} ; προς τον πατέρα

SINK

Receiving (rprt, b)

set $\dot{bin} := b \vee \dot{bin}$; Καθορισμός τοπολογικής σχέσης περιοχών A και B

Βάση του πρωτοκόλλου η διαδικασία εκκινείται από τον κόμβο που έχει οριστεί σε κατάσταση INIT. Ο κόμβος αυτός στέλνει με ευρεία εκπομπή στους γείτονες του μήνυμα tree που θα οδηγήσει κλιμακωτά με την ευρεία εκπομπή ανάλογων μηνυμάτων από όλους τους κόμβους του δικτύου προς την κατασκευή δενδρικής δομής κάλυψης. Δηλαδή στο τέλος αυτής της διαδικασίας όλοι οι κόμβοι θα έχουν ένα «δείκτη πατέρα». Περαιτέρω ο καθορισμός της τοπολογικής σχέσης προσεγγίζεται συστηματικά ως εξής: σε κάθε κόμβο

όπου $\mathcal{S} = \{A, B\}$ καθορίζεται με βάση τα μηνύματα tree της γειτονιάς μια κατάσταση που συνοψίζει το εάν πρόκειται για κόμβο ορίου A ή κόμβο ορίου B ή κόμβο ορίου AB ή για εσωτερικό σημείο της περιοχής AB. Η σύνοψη αυτών των καταστάσεων προς τη ρίζα οδηγεί στον τελικό καθορισμό της τοπολογικής σχέσης των δύο περιοχών. Οι συνδυασμοί που προκύπτουν φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα [Πίνακας 5.2].

Πίνακας 5.2 Καθορισμός τοπολογικής σχέσης περιοχών A και B βάση του πρωτοκόλλου 5.9

bin(sink_node)	Τοπολογική σχέση
0000	A, B ξένες
0001	A και B δεν τέμνονται μήτε είναι ξένες
0010	B περιέχει A, A δεν έχει εσωτερικούς κόμβους
0100	A περιέχει B, B δεν έχει εσωτερικούς κόμβους
1000, 1100, 1010, 0110, 1110	A, B τέμνονται
0011	B περιέχει A
0101	A περιέχει B
1001	A, B ίσες
1111	A, B επικαλύπτονται
1011	B περιέχει A
1101	A περιέχει B

Οι κωδικοποιήσεις στους δύο πίνακες είναι διαφορετικές αλλά μπορεί να αποδειχθεί ότι έχουν άμεσες αντιστοιχίες.

Ανάλυση πολυπλοκότητας

Από την όψη της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, κάθε κόμβος πρέπει να μεταδώσει ακριβώς ένα μήνυμα tree. Άρα η εξισορρόπηση φορτίου είναι $\Theta(1)$ και η συνολική πολυπλοκότητα $\Theta(|V|)$ μηνύματα tree. Στη χειρότερη περίπτωση φαίνεται ότι κάθε κόμβος εγγύς στον προορισμό μπορεί να χρειαστεί να προωθήσει $O(|V|)$ μηνύματα rprt. Μια προσεκτική εξέταση του πρωτοκόλλου αποκαλύπτει ωστόσο ότι κάθε κόμβος εκτελεί μια μικρή επεξεργασία κατά τη λήψη των μηνυμάτων rprt, συγκεκριμένα ελέγχοντας κατά πόσο περιέχουν πληροφορίες που ήδη έχουν κοινοποιηθεί. Έτσι κάθε κόμβος μπορεί να στείλει στη χειρότερη περίπτωση το πολύ 4 μηνύματα rprt (1000, 0100, 0010, 0001) πράγμα που οδηγεί σε σταθερή εξισορρόπηση φορτίου $O(1)$ και συνολική πολυπλοκότητα επικοινωνίας $O(|V|)$ για μηνύματα rprt. Κατά συνέπεια, η συνολική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι στη χειρότερη περίπτωση $5|V|$ μηνύματα προς αποστολή δηλ. $O(|V|)$.

Συμπερασματικά, το πρωτόκολλο αυτό είναι της ίδιας τάξης πολυπλοκότητας επικοινωνίας με αυτό του υπολογισμού της ρίζας δέντρου και του καθορισμού του ορίου μιας περιοχής, ωστόσο στην πράξη θα πρέπει να περιμένει κανείς τη χειρότερη περίπτωση που έχει 5 φορές περισσότερα μηνύματα προς αποστολή από το Πρωτόκολλο 4.15 σε σχέση με τα πρωτόκολλα κατασκευής δένδρου και καθορισμού ορίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αλγόριθμοι εν γνώσει θέσης

«Μυσταγωγία χωρικής πληροφορίας σε ένα δίκτυο»

Οι αλγόριθμοι «θέσης» σε σχέση με τους αλγόριθμους «γειτονιάς» που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αξιοποιούν επιπλέον την χωρική πληροφορία της θέσης των κόμβων. Η πληροφορία της θέσης γίνεται διαθέσιμη για το σύστημα με διάφορους τρόπους. Γνωστή είναι η διαθεσιμότητα γεωγραφικών συντεταγμένων από ενσωματωμένο δέκτη GPS στον κόμβο. Ωστόσο η πληροφορία της θέσης όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο μπορεί να γίνεται διαθέσιμη με διάφορους τρόπους και σε άλλες μορφές όπως: κυκλική διάταξη, γωνιακή απόσταση κ.α.. Οι αλγόριθμοι θέσης παρέχουν εκτεταμένη λειτουργικότητα σε σχέση με τους αλγορίθμους γειτονιάς που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο όπως: κατασκευή επίπεδων τοπολογιών συνδεσιμότητας δικτύου, αποδοτική γεωγραφική δρομολόγηση, υπολογισμός εμβαδού και κεντροειδούς περιοχής και καθορισμός τοπολογικής δομής περίπλοκων επιφανειακών αντικειμένων.

6.1 Κατασκευή επίπεδων τοπολογιών συνδεσιμότητας δικτύου

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφηκαν μια σειρά από επίπεδες δομές συνδεσιμότητας δικτύου. Όπως θα φανεί σε αυτό το κεφάλαιο αυτές οι επίπεδες δομές δικτύου είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σαν δίκτυα κάλυψης για τους αλγορίθμους θέσης. Για αυτό το λόγο στην ακόλουθη ενότητα παρουσιάζονται δύο πρωτόκολλα που αφορούν τον καθορισμό τέτοιων επίπεδων δομών.

6.1.1 Γράφημα Γαβριήλ (Gabriel Graph) και Γράφημα σχετικής γειτονιάς (Relative Neighborhood Graph)

Το ακόλουθο πρωτόκολλο [Πρωτόκολλο 6.1] υπολογίζει ένα γράφημα Γαβριήλ. Οι περιορισμοί που τίθενται στο πρωτόκολλο είναι οι τυπικοί περιορισμοί γειτονιάς \mathcal{N}/\mathcal{B} , η συνάρτηση αναγνωριστικού και η θέση σε καρτεσιανές συντεταγμένες ($p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$). Επιπλέον οι κοινοποιημένες θέσεις γειτονιάς αποθηκεύονται τοπικά στο σύνολο N .

Αρχικά κάθε κόμβος στέλνει με ευρεία εκπομπή το id του και τη θέση του και μεταβαίνει σε κατάσταση GBRG. Έπειτα εν γνώσει της θέσης των γειτονικών κόμβων το πρωτόκολλο ελέγχει για παραβιάσεις (του ορισμού του γραφήματος Γαβριήλ) και πράττει ανάλογα, δηλ. προσθέτει ή αφαιρεί κόμβους γείτονες από το σύνολο N όταν εντοπίζονται παραβιάσεις.

Τελικά κάθε κόμβος υπολογίζει βάση του ορισμού του γραφήματος Γαβριήλ με ποιους κόμβους συνδέεται.

Πρωτόκολλο 6.1 Πρωτόκολλο κατασκευής γραφήματος Γαβριήλ [20].

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , συνάρτηση θέσης $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$, συνάρτηση αναγνωριστικού $id : V \rightarrow \mathbb{N}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{(INIT, GBRG)\}, \{(INIT, GBRG)\}$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι INIT

Τοπικά δεδομένα: Σύνολο γειτόνων και θέσεων N , γραφήματος Γαβριήλ, $N := \emptyset$

INIT

Spontaneously

broadcast (ping, id , p) ; ευρεία εκπομπή αναγνωριστικού και θέσης
become GBRG

GBRG, INIT

Receiving (ping, i , l)

let add := **true** ; έστω ότι ο κόμβος γείτονας είναι το γράφημα Γαβριήλ
for all $(i', l') \in N$ **do**
 if $\delta(p, l')^2 + \delta(l', l)^2 < \delta(p, l)^2$ **then** ; έλεγχος για παραβίαση
 set add := **false**
 if $\delta(p, l)^2 + \delta(l', l)^2 < \delta(p, l')^2$ **then** ; έλεγχος για παραβίαση
 set $N := N - \{(l', l')\}$
if add = **true** **then**
 set $N := N \cup \{(i, l)\}$

Ουσιαστικά όμοιο είναι και το πρωτόκολλο για την κατασκευή του γραφήματος σχετικής γειτονιάς. Απλώς η συνθήκη παραβίασης διαφέρει [Πρωτόκολλο 5.2].

Πρωτόκολλο 6.2 Πρωτόκολλο κατασκευής γραφήματος σχετικής γειτονιάς [20].

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , συνάρτηση θέσης $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$, συνάρτηση αναγνωριστικού $id : V \rightarrow \mathbb{N}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{(INIT, RNBR)\}, \{(INIT, RNBR)\}$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι INIT

Τοπικά δεδομένα: Σύνολο γειτόνων και θέσεων γραφήματος σχετικής γειτονιάς, $N := \emptyset$

INIT

Spontaneously

broadcast (ping, id , p)
become RNBR

RNBR, INIT

Receiving (ping, i , l)

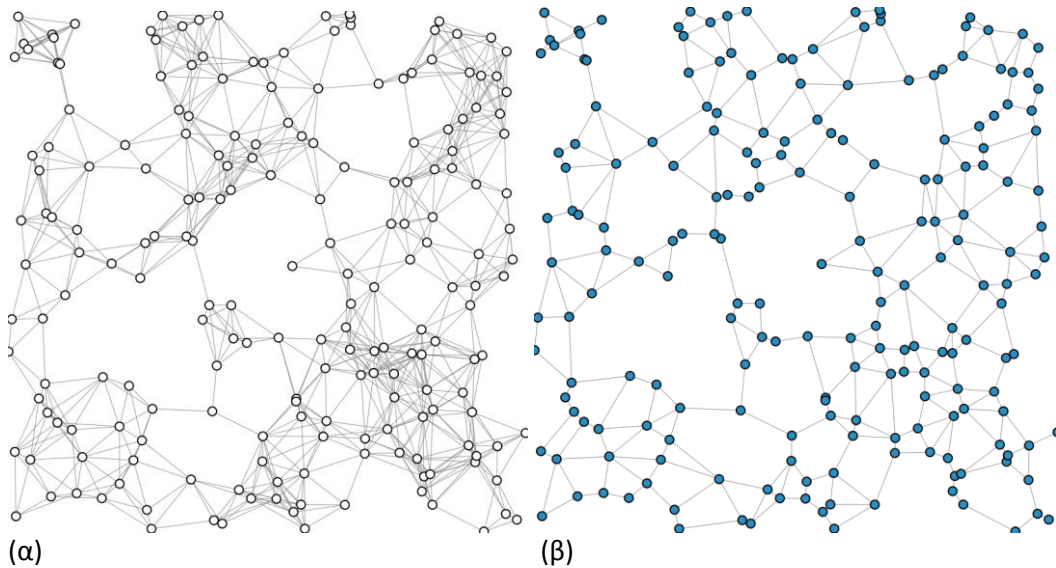
let add := **true**
for all $(i', l') \in N$ **do**
 if $\delta(p, l') < \delta(p, l)$ **and** $\delta(l, l') < \delta(p, l)$ **then** ; έλεγχος για παραβίαση
 set add := **false**

```

if  $\delta(\hat{p}, l) < \delta(\hat{p}, l')$  and  $\delta(l, l') < \delta(\hat{p}, l')$  then ; έλεγχος για παραβίαση
    set  $N := N - \{(l', l')\}$ 
if add = true then
    set  $N := N \cup \{(i, l)\}$ 

```

Ένα στιγμιότυπο από το αποτέλεσμα της εκτέλεσης του πρώτου πρωτοκόλλου για τον καθορισμό του γραφήματος Γαβριήλ φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 Στιγμιότυπο από αποτέλεσμα του πρωτοκόλλου για τον καθορισμό του γραφήματος Γαβριήλ, (α) γράφημα UDG, (β) επίπεδο γράφημα Γαβριήλ.

Η προσθήκη επιπλέον περιορισμών στην συνδεσιμότητα των κόμβων μέσω επίπεδων δομών κάλυψης των κόμβων εάν και ίσως ακούγεται αντιφατικό μπορεί να παρέχει περισσότερη αποτελεσματικότητα στις διαδικασίες και μια σειρά από τεχνικά πλεονεκτήματα, ιδίως όσον αφορά τον έλεγχο της τοπολογίας, την κατανάλωση ενέργειας, και την μείωση των επικοινωνιακών παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κόμβων.

Για αυτούς τους λόγους έχει γίνει σημαντική έρευνα σχετικά με τον ορισμό, τις ιδιότητες, και τον υπολογισμό διαφορετικών δομών επικάλυψης.

Ωστόσο, ο στόχος για αυτή την εργασία και την γεωπληροφορική βρίσκεται σε μια κάπως διαφορετική κατεύθυνση: στο σχεδιασμό αλγορίθμων για επεξεργασία χωρικών και χωροχρονικών ερωτημάτων.

Στην ενότητα που ακολουθεί αξιοποιείται η επίπεδη δομή κάλυψης για την αποδοτική δρομολόγηση πληροφοριών συντελούμενη βάση θέσης καλούμενη *γεωγραφική δρομολόγηση*.

6.2 Γεωγραφική δρομολόγηση (Georouting)

Γεωγραφική δρομολόγηση (*georouting*) είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία της δρομολόγησης δεδομένων μέσω ενός δικτύου προς έναν κόμβο γνωστής θέσης [20].

Ένα θεμελιώδες τύπου ερώτημα στις χωρικές βάσεις δεδομένων είναι το *ερώτημα σημείου* (point query). Σε ένα ερώτημα σημείου το σύστημα έχει στόχο την ανάκτηση εγγραφών από τη βάση δεδομένων που σχετίζονται με το συγκεκριμένο σημείο. Στην περίπτωση ενός αποκεντρωμένου συστήματος χωρικών πληροφοριών π.χ. ενός δικτύου γεωαισθητήρων είναι πολύ πιθανόν να υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι σημαντική η ανάκτηση δεδομένων που αφορούν μια συγκεκριμένη θέση. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι εξαιρετικά μη αποδοτικό το ερώτημα να τεθεί στο σύνολο του δικτύου.

Η δρομολόγηση του ερωτήματος προς συγκεκριμένους κόμβους που βρίσκονται «εγγύς» ή επί της συγκεκριμένης θέσης του σημειακού ερωτήματος μπορεί να επιφέρει σημαντικό κέρδος στην απόδοση επεξεργασίας του ερωτήματος.

Ένας αλγόριθμος για μία τέτοιου είδους «γεωγραφική» δρομολόγηση είναι το πρωτόκολλο *άπληστης γεωγραφικής δρομολόγησης* (*greedy georouting*) που παρουσιάζεται στη ενότητα που ακολουθεί. Το πρωτόκολλο «άπληστης γεωγραφικής δρομολόγησης» απαιτεί τη χρήση ενός επίπεδου δικτύου κάλυψης (*planar overlay network*).

6.2.1 Άπληστη γεωγραφική δρομολόγηση (*greedy georouting*)

Το πρωτόκολλο *άπληστης γεωγραφικής δρομολόγησης* [20] έχει στόχο την δρομολόγηση ενός μηνύματος από έναν κόμβο πηγή μέσω ενός *χωρικού δικτύου*²⁷ (*spatial network*) σε έναν κόμβο προορισμού γνωστής θέσης συντεταγμένων. Λόγω του ότι σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών γενικώς η πηγή και ο προορισμός δεν συνδέονται άμεσα (1 hop), κατά πάσα πιθανότητα το μήνυμα θα φτάσει στον προορισμό του με προώθηση πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*). Μια λύση όπου δε θα λαμβάνονταν υπόψη οι θέσεις των κόμβων θα ήταν ένας αλγόριθμος πλημμύρας. Όμως στις διαδικασίες πλημμύρας το μήνυμα δρομολογείται προς όλους τους κόμβους του δικτύου που στην ουσία δεν είναι αναγκαίο σε αυτήν την περίπτωση και έτσι καταναλώνονται σημαντικοί πόροι επικοινωνίας. Μια εναλλακτική λύση είναι η δρομολόγηση του μηνύματος με προώθηση κάθε φορά σε έναν συγκεκριμένο γείτονα: στον γείτονα που βρίσκεται εγγύτερα προς τον προορισμό. Υποθέτοντας ότι όλοι οι κόμβοι γνωρίζουν τη θέση τους (π.χ. σε γεωγραφικές συντεταγμένες με χρήση ενός GPS) σε κάθε βήμα προώθησης αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται μέχρι το μήνυμα τελικά να φτάσει στον προορισμό δηλ. εντοπίζοντας κάθε φορά τον επόμενο γείτονα που είναι εγγύτερα προς τον προορισμό κ.ο.κ.. Αυτή η διαδικασία καλείται *άπληστη γεωγραφική δρομολόγηση* και υλοποιείται στο ακόλουθο πρωτόκολλο [Πρωτόκολλο 6.3].

²⁷ Γενικά ο όρος *χωρικό δίκτυο* (*spatial network*) χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιοδήποτε δίκτυο στο οποίο ο κάθε κόμβος του δικτύου βρίσκεται τοποθετημένος σε ένα σημείο χώρου (συνήθως 2 διαστάσεων) εφοδιασμένου με μια μετρική. Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, ο χώρος είναι 2 διαστάσεων και η μετρική είναι συνήθως η Ευκλείδεια απόσταση. Ο ορισμός αυτός συνεπάγεται γενικώς ότι η πιθανότητα να βρεθεί μια σχέση μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου μειώνεται με την απόσταση. Τα δίκτυα μεταφοράς και κίνησης, το Διαδίκτυο, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τα κοινωνικά δίκτυα, τα νευρωνικά δίκτυα είναι όλα παραδείγματα όπου ο χώρος είναι σημαντικός και η τοπολογία από μόνη της δεν περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες. Ο χαρακτηρισμός και η κατανόηση της δομής και της εξέλιξης των χωρικών δικτύων είναι ζωτικής σημασίας για πολλούς και διάφορους τομείς που κυμαίνονται από την πολεοδομία μέχρι την επιδημιολογία.

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου έχει ως εξής [20]:

1. Αρχικά, ο κόμβος πηγή (που διαθέτει αρχικώς το μήνυμα προς δρομολόγηση m και τη θέση δρομολόγησης d) μεταδίδει ένα μήνυμα $init$ προς όλους τους γείτονές (broadcast $init$).
2. Στη συνέχεια ο κάθε γείτονας που λαμβάνει το μήνυμα $init$ αποκρίνεται με ένα μήνυμα $posn$ εσωκλείοντας τη θέση του (σε συντεταγμένες).
3. Μετά τη λήψη των συντεταγμένων όλων των γειτόνων του, ο κόμβος πηγή υπολογίζει βάση της Ευκλείδειας απόστασης τον εγγύτερο προς τον προορισμό γείτονα και προωθεί ένα μήνυμα $grdy$ προς αυτόν (unicast) εσωκλείοντας το μήνυμα προς μετάδοση και τη θέση του προορισμού. Σε περίπτωση ισοψηφίας επιλέγεται αυθαίρετα ένας από τους γείτονες προς προώθηση αυτού του μηνύματος.
4. Με την παραλαβή του μηνύματος $grdy$, ο κόμβος γείτονας αρχικά ελέγχει εάν είναι ο προορισμός (δηλ. εάν οι συντεταγμένες που εσωκλείονται στο μήνυμα $grdy$ είναι ίδιες με τις δικές του). Εάν έχει έτσι ο αλγόριθμος τερματίζεται, αλλιώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το (1)-(4) δηλ. σαν να ήταν ο ίδιος ο αρχικός κόμβος πηγή.

Πρωτόκολλο 6.3 Άπληστη γεωγραφική δρομολόγηση [20].

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , συνάρτηση θέσης $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{(SEND, IDLE, LSTN), \{(IDLE, SEND), (SEND, LSTN), (LSTN, IDLE)\}\}$

Αρχικοποίηση: Ένας κόμβος SEND, οι υπόλοιποι IDLE

Τοπικά δεδομένα: Λίστα θέσεων γειτόνων $N \subseteq n\bar{b}r$, $N := \emptyset$, μήνυμα m και προορισμός d , αρχικοποίηση με το πραγματικό μήνυμα και τη θέση προορισμού μόνο για τον κόμβο SEND

SEND

Spontaneously

become LSTN

broadcast $init$; ευρεία εκπομπή «ring» στους γείτονες

IDLE

Receiving $init$

broadcast $(posn, \bar{p})$; ευρεία εκπομπή θέσης σε απόκριση του «ring»

Receiving $(grdy, m', d')$

if $\bar{p} = d'$ **then** ; έλεγχος εάν ο κόμβος είναι και ο προορισμός

Message m' received!

else

set $m := m'$ and $d := d'$; αποθήκευση μηνύματος και προορισμού

become SEND

LSTN

Receiving $(posn, l)$

set $N := N \cup \{l\}$; αποθήκευση της θέσης του γείτονα

if $|N| = |n\bar{b}r|$ **then** ; έλεγχος εάν έχει λάβει από όλους τους γείτονες

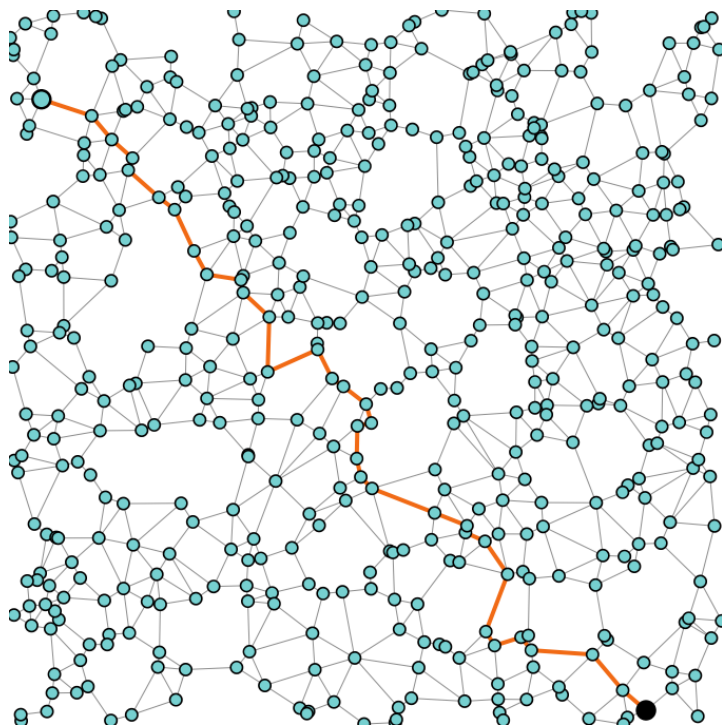
set $n \in N$ such that for all $n' \in N$, $\delta(d, n) \leq \delta(d, n')$; εντοπισμός εγγύτερου προς το

; προορισμό γείτονα n

send $(grdy, m, d)$ to node at location n ; προώθηση μηνύματος προς n

become IDLE

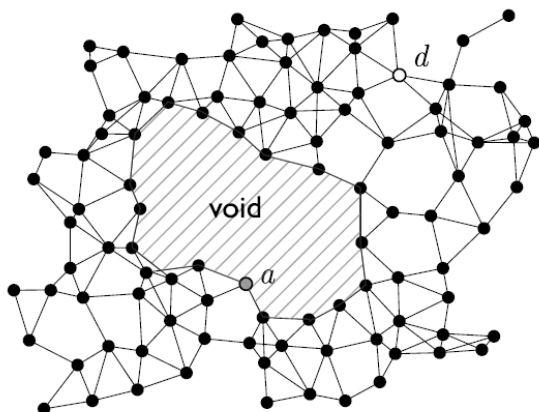
Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η γεωγραφική δρομολόγηση μηνύματος βάση του πρωτοκόλλου της άπληστης γεωγραφικής δρομολόγησης (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2 Γεωγραφική δρομολόγηση βάση του πρωτοκόλλου «Άπληστης γεωγραφικής δρομολόγησης» επί γραφήματος Γαβριήλ δικτύου 500 κόμβων, προορισμός: μαύρος κόμβος.

Αφήνοντας κατά μέρος τα θέματα αποδοτικότητας του πρωτοκόλλου, υπάρχουν μια σειρά από σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα μειονέκτημα πηγάζει από την υπόθεση ότι υπάρχει κόμβος που ταυτίζεται με τον προορισμό (όσο αναφορά τις συντεταγμένες δρομολόγησης). Αν αυτό δεν ισχύει τότε ο αλγόριθμος δεν πρόκειται να τερματίσει. Σε αυτήν την περίπτωση δύο (ή ίσως περισσότεροι) κόμβοι κοντά στον προορισμό θα διαβιβάζουν μεταξύ τους ατέρμονα το μήνυμα `grdy`. Αυτή η κατάσταση μπορεί να αποτραπεί με την αναθεώρηση του πρωτοκόλλου ώστε ο αλγόριθμος να τερματίζει όταν το μήνυμα φτάσει σε έναν κόμβο ο οποίος απέχει από τον προορισμό κάτω από ορισμένη απόσταση δηλ. να καθορισθεί ένα ουδός-κατώφλι (*threshold*). Σε πολλές περιπτώσεις μια τέτοια αντιμετώπιση είναι πολύ λογική, εφόσον χωρικά εγγύς αισθητήρες κανονικά θα ανιχνεύουν εγγύς τιμές. Εάν είναι έτσι οι πιθανοί προορισμοί θα ικανοποιούν κατά κάποιο τρόπο το ερώτημα εξίσου καλά με κάποιο κόμβο ακριβώς στον προορισμού.

Ένα πιο λεπτό πρόβλημα προκύπτει όταν ένας κόμβος που πρέπει να προωθήσει το μήνυμα είναι εγγύτερα προς τον προορισμό από ότι οι γείτονες του π.χ. στην κατάσταση του σχήματος (Σχήμα 6.3) ο κόμβος *a* είναι πλησιέστερα προς τον προορισμού *d* από ότι οποιονδήποτε από τους γείτονές του, και ωστόσο στο προκείμενο δίκτυο δεν υπάρχει βέλτιστο μέσο εκ αυτού προς τον προορισμό. Το αυτό πρόβλημα εμφανίζεται όταν υπάρχουν περιοχές «κενά» στο χώρο που δεν καλύπτονται από το δίκτυο. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος εφαρμόζεται η τεχνική που παρουσιάζεται ακολούθως και καλείται *δρομολόγηση εν πρόσωπο (face routing)*.



Σχήμα 6.3 Ένα παράδειγμα περιοχής κενού (void), όπου ένας κόμβος a είναι εγγύτερα προς τον προορισμό d από ότι η γείτονες του.

6.2.2 Δρομολόγηση εν πρόσωπο (face routing)

Στην περίπτωση επίπεδων γραφημάτων συνδεσιμότητας μπορεί κανείς να θεωρήσει της περιοχές του επιπέδου που οριοθετούνται από κορυφές και ακμές του γραφήματος. Οι περιοχές αυτές καλούνται *πρόσωπα* (*faces*) βάση του φυσικού ισομορφισμού επιφανειών και ορίων επιφανειών. Σε ένα επίπεδο γράφημα ο αριθμός των προσώπων συνδέεται με τον αριθμό των ακμών και των κορυφών από τον τύπο του Euler-Poincaré: $v - e + f = 2$, όπου v είναι ο αριθμός των κορυφών, e είναι ο αριθμός των ακμών και f είναι ο αριθμός των προσώπων. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 6.4 φαίνεται ένα επίπεδο γράφημα με 20 κορυφές και 33 ακμές και βάση του τύπου: $2 - 20 + 33 = 15$ πρόσωπα. Σημειώνεται ότι κατά τη μέτρηση των προσώπων (σύνολο 15 στο σχήμα) πρέπει να καταμετρήσει κανείς και το εξωτερικό πρόσωπο, δηλ. αυτό που περικλείει την απεριόριστη επιφάνεια έξω από το γράφημα.

Για την κατανόηση της δρομολόγησης εν πρόσωπο ως θεωρηθεί η κυκλική διάταξη (cyclic ordering) για το δίκτυο του σχήματος. Για τον κόμβο s η κυκλική διάταξη είναι rot_j (ή ισοδύναμα $jrot$, tjr ,...). Η κυκλική διάταξη για όλο το γράφημα μπορεί να αναπαρασταθεί από τη συνάρτηση $cyc: E \rightarrow V$ δηλ. στην προκειμένη περίπτωση $cyc(s, t) = j$, $cyc(s, j) = r$, $cyc(s, r) = p$, $cyc(s, p) = o$ και $cyc(s, o) = t$ κοκ ανάλογα για όλους τους κόμβους. Το επόμενο βήμα αποτελεί η παρατήρηση ότι μπορεί κανείς να επισκεφτεί συστηματικά όλους τους κόμβους κυκλικά επί ενός ορίου προσώπου: σε κάθε βήμα εντοπίζεται η επόμενη ακμή στην κυκλική διάταξη του τερματικού κόμβου π.χ. αρχίζοντας από την ακμή (s, j) , η επόμενη ακμή είναι η $(j, cyc(j, s)) = (j, k)$, έπειτα έρχεται η $(k, cyc(k, j)) = (k, l)$, ακολούθως η $(l, cyc(l, k)) = (l, t)$ τέλος η $(t, cyc(t, l)) = (t, s)$ και κλείνει ο κύκλος. Σε συνδυασμό με την κυκλική διάταξη, κάθε (κατευθυνόμενη) ακμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τον εντοπισμό ενός μοναδικού προσώπου.

Βάση αυτής της γνώσης επιτυγχάνεται η δρομολόγηση ενός μηνύματος γύρω από οποιοδήποτε πρόσωπο σε ένα επίπεδο δίκτυο. Η προδιαγραφή πρωτοκόλλου [Πρωτόκολλο 6.4] παρέχει αυτή τη λειτουργικότητα.

Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν αξιόπιστη επικοινωνία, συνεκτικό και επίπεδο γράφημα συνδεσιμότητας (συντομογραφία \mathcal{LB}), συνάρτηση γειτονιάς $nbr: V \rightarrow 2^V$. Η σημειογραφία id^* δηλώνει την εικόνα της συνάρτησης id (το σύνολο τιμών της id). Τυπικά, για συνάρτηση $id: V \rightarrow \mathbb{N}$, $id^* = \{i \in \mathbb{N} \mid id(u) = i \text{ για ένα } u \in V\}$.

Πρωτόκολλο 6.4 Δρομολόγηση εν πρόσωπο (Face routing) [20]

Περιορισμοί: \mathcal{LB} , $id : V \rightarrow \mathbb{N}$, κυκλική διάταξη $cyc : E' \rightarrow id^*$, όπου $E' = \{ (u, id(u')) \mid (u, u') \in E \}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{SEND, IDLE\}, \emptyset)$

Αρχικοποίηση: Ένας κόμβος SEND, οι υπόλοιποι IDLE

SEND

Spontaneously

broadcast init (id) ; εκκίνηση

Receiving init (i)

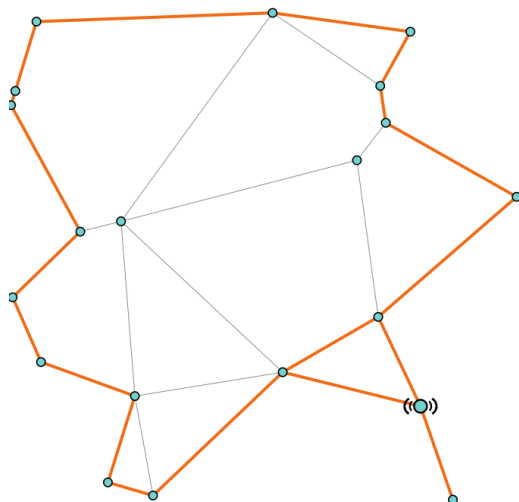
Message routed around face

IDLE

Receiving init (i)

send init (id) to node with identifier $cyc(i)$; δρομολόγηση μηνύματος στο
; επόμενο γείτονα στην κυκλική
; διάταξη

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η δρομολόγηση εν πρόσωπο βάση του παραπάνω πρωτοκόλλου (Σχήμα 6.5). Το μήνυμα διαδίδεται κυκλικά και αποκλειστικά σε όλα τα πρόσωπα του εναρκτήριου κόμβου.



Σχήμα 6.5 Δρομολόγηση μηνύματος επί προσώπων

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης εν πρόσωπο είναι μια θεμελιώδης τεχνική για μια σειρά πιο εξελιγμένων αλγορίθμων που αφορούν λειτουργίες αποκεντρωμένων συστημάτων χωρικών πληροφοριών. Ο συνδυασμός της δρομολόγησης εν πρόσωπο με την άπληστη γεωγραφική δρομολόγηση καλείται GPSR (greedy perimeter stateless routing) [15, 61]. Η διαδικασία

GPSR σαν ένα πρωτόκολλο γεωγραφικής δρομολόγησης στοχεύει στην μετάδοση ενός μηνύματος μέσω του δικτύου από μία πηγή (source) σε έναν προορισμό (sink) γνωστών συντεταγμένων. Υπό κανονικές συνθήκες η GPSR εφαρμόζει άπληστη γεωγραφική δρομολόγηση (georouting). Ωστόσο όταν ένας κόμβος u (διάφορος του προορισμού) εντοπίσει ότι όλοι οι γείτονες του βρίσκονται μακρύτερα (πρόβλημα στην άπληστη γεωγραφική δρομολόγηση) από τον προορισμό από ότι ο ίδιος τότε εφαρμόζεται δρομολόγηση εν πρόσωπο (face routing). Οι κόμβοι που λαμβάνουν εν συνεχεία το μήνυμα συνεχίζουν να εφαρμόζουν δρομολόγηση εν πρόσωπο εκτός και εάν κατά την προώθηση ένας κόμβος u' είναι εγγύτερα στον προορισμό από τον κόμβο u που ξεκίνησε τη δρομολόγηση εν πρόσωπο. Σε αυτήν την περίπτωση ο κόμβος u' εφαρμόζει άπληστη γεωγραφική δρομολόγηση. Η δρομολόγηση ενός μηνύματος κατά αυτήν την διαδικασία από την πηγή σε έναν προορισμό μπορεί να περιλαμβάνει οποιοδήποτε αριθμό εναλλαγών μεταξύ δρομολόγησης εν πρόσωπο και άπληστης γεωγραφικής δρομολόγησης.

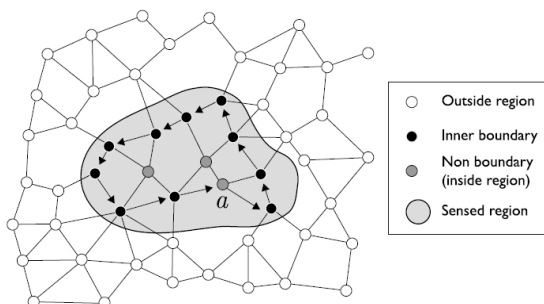
Κλείνοντας αυτήν την ενότητα, αξίζει να αναφερθεί ότι παρόμοιες τεχνικές μπορούν επίσης να αναπτυχθούν για δρομολόγηση πληροφορίας προς έναν στόχο «περιοχής» (δηλ. μιας περιοχής γνωστών συντεταγμένων πολυγωνικών ορίων). Αυτή η διαδικασία καλείται *geocasting* και αντίστοιχα με τον παραλληλισμό της γεωγραφικής δρομολόγησης με επεξεργασίες σημειακών ερωτημάτων σε μια χωρική βάση δεδομένων, το *geocasting* μπορεί να θεωρηθεί σαν επεξεργασίες ερωτημάτων έκτασης (range queries) σε χωρικές βάσεις δεδομένων. Τα ερωτήματα έκτασης αφορούν ανάκτηση εγγράφων από τη βάση δεδομένων με χωρική αναφορά εντός καθορισμένης χωρικής περιοχής.

6.3 Δρομολόγηση γύρω από όρια περιοχών

Η διαδικασία της δρομολόγησης γύρω από κάποιο πρόσωπο (face routing) μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εφαρμογή υπολογιστικών διαδικασιών σε όρια περιοχών. Γενικά ο περιορισμός των υπολογισμών στο όριο μιας περιοχής (αντί σ' όλη την περιοχή) μπορεί να μειώσει σημαντικά τις υπολογιστικές δαπάνες των αλγορίθμων.

6.3.1 Κύκλος ορίου περιοχής (Boundary cycle)

Η ιδέα της δρομολόγησης ενός μηνύματος γύρω από το εσωτερικό όριο μιας περιοχής συνδυάζει δύο τεχνικές: α) εντοπισμός ορίου της περιοχής (§ 5.4.1) και β) δρομολόγηση εν πρόσωπο (§ 6.2.2). Στόχος είναι η ανάπτυξη μιας διαδικασίας για τη διάσχιση ενός κύκλου στο γράφημα συνδεσιμότητας δικτύου που να περιέχει όλους τους κόμβους του ορίου της περιοχής. Ένας τέτοιος κύκλος φαίνεται στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6 Κύκλος ορίου [20]

Για μια περισσότερο τυπική περιγραφή, ας θεωρηθεί ένα γράφημα συνδεσιμότητας $G = (V, E)$ και το υπογράφημα αυτού $G' = (V', E')$ που δομείται από το σύνολο των κορυφών εντός της χαρακτηριστικής περιοχής (η περιοχή θεωρείται τοπολογικά ενιαία). Έτσι ισχύει: $V' \subseteq V$, $E' \subseteq E$, $E' = \{(u', u'') \in E \mid u', u'' \in V'\}$ και για κάθε $u \in V'$ είναι $s(u) = 1$. Ο ζητούμενος κύκλος διάσχισης του ορίου (κύκλος ορίου) της περιοχής σχηματίζεται από τις ακμές του εξωτερικού προσώπου του γραφήματος $G' = (V', E')$.

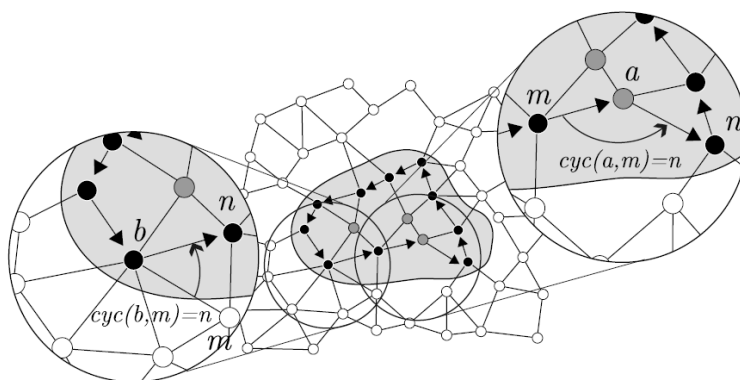
Ο σχεδιασμός μιας διαδικασίας για την διάσχιση του κύκλου ορίου γίνεται βάση δύο συνθηκών που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς τύπους κόμβων που δύναται να ανήκουν στον κύκλο του ορίου. Στον κύκλο δύναται να ανήκουν *κόμβοι ορίου* (δηλ. κόμβοι που έχουν άμεση επικοινωνία με κόμβους εκτός της περιοχής) και *κόμβοι μη ορίου* (δηλ. κόμβοι που δεν έχουν άμεση σύνδεση με κόμβους εκτός της περιοχής). Για παράδειγμα, ο κόμβος a του σχήματος 6.6 δεν είναι κόμβος ορίου, παρότι βρίσκεται εντός της περιοχής, εφόσον δεν υφίσταται άμεση σύνδεση (1 hop) με κάποιο κόμβο εκτός της περιοχής. Η απαίτηση της διαδικασίας είναι η επίσκεψη κάθε κόμβου που κείται στον κύκλο δηλ. επίσκεψη των κόμβων ορίου και μη ορίου.

Οι δύο συνθήκες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό αυτών των κόμβων (ορίου και μη ορίου) απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 6.7). Όπως μπορεί να συνάγει κανείς από το σχήμα, ένας κόμβος ορίου μπορεί να προσδιορίσει τον επόμενο κόμβο στον κύκλο ορίου από ένα ζεύγος γειτόνων σε διαδοχική κυκλική διάταξη, όπου ο πρώτος γείτονας βρίσκεται εκτός της περιοχής και ο δεύτερος εντός (συνθήκη 1). Τυπικά:

1. Κάθε *κόμβος ορίου* b μπορεί να εντοπίσει τον επόμενο κόμβο στον κύκλο ορίου ως τον μοναδικό γείτονα n που βρίσκεται εντός της περιοχής, $s(b)=s(n)$, και βρίσκεται σε κυκλική διάταξη από γείτονα m που βρίσκεται έξω από την περιοχή, $s(m) \neq s(b)$ δηλ. $cyc(b, m) = n$.

Η δεύτερη συνθήκη γεφυρώνει απλά τα χάσματα μεταξύ κόμβων ορίου και κόμβων μη ορίου. Τυπικά:

2. Κάθε κόμβος μη ορίου λαμβάνοντας μήνυμα από έναν κόμβο ορίου m μπορεί να προσδιορίσει τον επόμενο κόμβο στον κύκλο ορίου, ως τον μοναδικό γείτονα n για τον οποίο ισχύει $cyc(a, m) = n$.



Σχήμα 6.7 Οι δύο συνθήκες για διάσχιση κύκλου στο όριο [20].

Όσο αναφορά την ορθότητα των 2 παραπάνω συνθηκών: Για την 2^η συνθήκη πράγματι αποδεικνύεται ότι για κάθε γράφημα συνδεσιμότητας υπάρχει μοναδικός γείτονας για τον

οποίο ισχύει $\text{cyc}(\alpha, m) = n$. Ωστόσο η μοναδικότητα δεν εξασφαλίζεται για τη 1^n συνθήκη χωρίς την προσθήκη του περιορισμού 2-συνεκτικού γραφήματος G^{28} .

6.3.2 Πρωτόκολλο δρομολόγησης μηνύματος γύρω από κύκλο ορίου περιοχής

Για λόγους απλοποίησης το πρωτόκολλο δρομολόγησης ενός μηνύματος παρουσιάζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο [Πρωτόκολλο 6.5] παρουσιάζει έναν αλγόριθμο για τον καθορισμό των κόμβων (εσωτερικού) ορίου και επιπλέον για κάθε έναν από αυτούς τους κόμβους καθορίζει τους επόμενους κόμβους στον κύκλο ορίου βάση της 1^{ns} συνθήκης της προηγούμενης ενότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό της συνάρτησης wind , η εφαρμόζοντας την 1^n συνθήκη. Ο αλγόριθμος αναλυτικά, προχωρά ως ακολούθως:

1. Κάθε κόμβος αρχίζει στην κατάσταση INIT εκπέμποντας ένα μήνυμα ring ευρείας εκπομπής που περιέχει την τιμή αισθητήρα του και το αναγνωριστικό του και μεταβαίνει στην κατάσταση IDLE.
2. Μόλις λάβει ένα μήνυμα ring ένας κόμβος αποθηκεύει τις πληροφορίες του κόμβου γείτονα (id , s) στην τοπική δομή D . Όταν ληφθούν όλα τα μηνύματα δηλ. από όλους τους γείτονες, η σχέση D αναδομείται σε τοπική συνάρτηση $\text{data} : I \rightarrow \{0, 1\}$, όπου $I = \{i' \mid (i', d') \in D\}$ και $\text{data}(i') \rightarrow d'$ τέτοια ώστε $(i', d') \in D$. Αυτό ουσιαστικά απλώς γίνεται για να βοηθήσει στην αναγνωσιμότητα και λακωνικότητα του κώδικα δηλ. δεν υπάρχουν δεδομένα που δημιουργούνται ή μεταβάλλονται σε αυτό το βήμα. Η σχέση D πρέπει να περιέχει αναγκαστικά ένα μοναδικό $d \in D$ για κάθε i .
3. Κάθε κόμβος που βρίσκεται εντός της περιοχής ($\xi=1$) και έχει κόμβους γείτονες που βρίσκονται εκτός της περιοχής (δηλαδή, $0 \in \text{δεδομένων data}_*$, όπου data_* συμβολίζεται η εικόνα της συνάρτησης data), καθορίζει την τοπική τιμή της συνάρτησης wind δηλ. τον επόμενο κόμβο στον κύκλο ορίου βάση της συνθήκη 1 και αριστερή πλευρά του σχήματος στην προηγούμενη ενότητα. Τέλος μεταβαίνει στην κατάσταση BNDY.

Πρωτόκολλο 6.5 Καθορισμός κόμβων εσωτερικού ορίου και κύκλου ορίου για μια περιοχή [20]

Περιορισμοί: \mathcal{LB} , $s : V \rightarrow \{0, 1\}$, $\text{id} : V \rightarrow \mathbb{N}$, $\text{cyc} : E' \rightarrow \text{id}_*$, όπου $E' = \{(u, \text{id}(u')) \mid (u, u') \in E\}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{\{\text{INIT}, \text{IDLE}, \text{BNDY}\}, \{\{\text{INIT}, \text{IDLE}\}, \{\text{IDLE}, \text{BNDY}\}\}\}$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι INIT

Τοπικά δεδομένα: $\text{wind} : V \rightarrow V \cup \{\emptyset\}$, $\text{wind} := \emptyset$, σχέση $D \subset \mathbb{N} \times \{0, 1\}$, $D := \emptyset$.

INIT

Spontaneously

broadcast (ping , id , ξ) ; ευρεία εκπομπή μηνύματος ring
become IDLE

Receiving (ping , i , d)

defer until IDLE ; απόκριση αναβάλλεται ωστόσο μεταβεί σε IDLE

IDLE

²⁸ Το 2-συνεκτικό αποτελεί ένα γράφημα όπου υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικά μονοπάτια ανάμεσα σε κάθε ζεύγος κόμβων.

```

Receiving (ping, i, d)
  set D := D U (i, d)           ; αποθήκευση id και s γείτονα
  if |D| = |nbr| then          ; έλεγχος εάν έχουν καταφτάσει όλα τα ping
    Create function data : I → {0, 1}, where I = {i' | (i', d') ∈ D} and data : i' ↦ d'
    if s = 1 and 0 ∈ data* then
      set wiñd := cȳc(i''), where data(cȳc(i'')) = s and data(cȳc(i'')) ≠ data(i'')
      become BNDY

```

Ο παραπάνω αλγόριθμος έχει $\Theta(|V|)$ συνολική επικοινωνία και βέλτιστη εξισορρόπηση φόρτου $\Theta(1)$.

Το αποτέλεσμα της λειτουργίας του πρωτοκόλλου 6.5 είναι ότι οι κόμβοι που βρίσκονται στο όριο της περιοχής μεταβαίνουν σε κατάσταση BNDY και έχουν πληροφορίες σχετικά με το ποιος από τους γείτονές τους είναι ο επόμενος κόμβος στον κύκλο ορίου (τιμή τοπικής μεταβλητής *wiñd*).

Ακολουθώντας το πρωτόκολλο 6.6 αποτελεί μια επέκταση στο πρωτόκολλο 6.5 (υπέρβαση συνάρτησης χειρισμού συμβάντος *Receiving* στην κατάσταση IDLE, ορισμός νέου χειρισμού συμβάντος και κατάσταση BNDY). Ο αλγόριθμος λειτουργεί σχεδόν ίδια με το πρωτόκολλο 6.5 επιπλέον όμως όταν ένας κόμβος ορίου λάβει ένα μήνυμα *ping*, στέλνει ένα μήνυμα *msge* (το μήνυμα της δρομολόγησης εν κύκλο ορίου) που περιέχει το αναγνωριστικό του στον επόμενο στον κύκλο γείτονα. Οι επιπλέον προσθήκες χειρισμών συμβάντων στις καταστάσεις IDLE και BNDY εξασφαλίζουν την κατάλληλη απόκριση των κόμβων ώστε να προωθούνται τα μηνύματα *msge* στον επόμενο γείτονα εν κύκλο ορίου (είτε κόμβο ορίου – συνθήκη 1, είτε κόμβο μη ορίου – συνθήκη 2).

Πρωτόκολλο 6.6 Δρομολόγηση εν κύκλο ορίου περιοχής [20].

Περιορισμοί: επέκταση πρωτοκόλλου 6.5

IDLE

```

Receiving (ping, i, d)      ; υπέρβαση του αντίστοιχου χειριστή του Πρωτοκ. 6.5
  set D := D U (i, d)
  if |D| = |nbr| then
    Create function data : I → {0, 1}, where I = {i' | (i', d') ∈ D} and data : i' ↦ d'
    if s = 1 and 0 ∈ data* then
      set wiñd := cȳc(i''), where data(cȳc(i'')) = s and data(cȳc(i'')) ≠ data(i'')
      send (msge, id, id) to wiñd      ; δρομολόγηση μηνύματος msge
      become BNDY

```

```

Receiving (msge, i, i')
  defer until |D| = |nbr|
  send (msge, i, id) to node with identifier cȳc(i') ; προώθηση msge από κόμβο μη
                                                    ; ορίου εν κύκλο ορίου

```

BNDY

```

Receiving (msge, i, i')
  if i = id then ; έλεγχος εάν το μήνυμα έφτασε ξανά στον αποστολέα

```

Message traversed entire region boundary!
else
send (msge, i, id) to node with identifier wiñd ; προώθηση msge

Με μια τελευταία επέκταση [Πρωτόκολλο 6.7] είναι δυνατή η εκλογή ενός κόμβου ηγέτη (leader) για τον κύκλο όριο. Απλά προστίθεται μια νέα κατάσταση LEAD, ένα νέο τοπικό δεδομένο για να αποθηκεύετε το μικρότερο αναγνωριστικό και μια νέα δράση όπου ένας κόμβος ορίου προωθεί ένα μήνυμα msge μόνο όταν το id του εκκινήτη μηνύματος i είναι μικρότερο από το δικό του. Έτσι ο κόμβος που θα λάβει πίσω το μήνυμα του (msge) θα έχει το μικρότερο αναγνωριστικό από όλους τους κόμβους BNDY. Εν ακολουθία ο κόμβος αυτός μεταβαίνει στην κατάσταση LEAD (δηλ. κατάσταση ηγέτη).

Πρωτόκολλο 6.7 Εκλογή ηγέτη στον κύκλο ορίου [20].

Περιορισμοί: επέκταση Πρωτοκόλλου 6.6

Συστ. Πεπ. Κατ.: ({INIT, IDLE, BNDY, LEAD}, {(INIT, IDLE), (IDLE, BNDY), (BNDY, LEAD)})

Τοπικά δεδομένα: μικρότερο αναγνωριστικό m, m := id

BNDY

Receiving (msge, i, i') ; υπέρβαση χειριστή Πρωτοκόλλου 6.6
if i = id **then** ; έλεγχος εάν το μήνυμα επέστρεψε στον παραλήπτη
become LEAD
else
if i = m **then**
set m := i
send (msge, i, id) to node with identifier wiñd ; προώθηση

6.3.3 Εμβαδόν και κεντροειδές περιοχής

Στις προηγούμενες ενότητες αποδείχτηκε η δυνατότητα δρομολόγησης ενός μηνύματος γύρω από το όριο μιας περιοχής και η εκλογή ενός κόμβου ηγέτη επί του ορίου για αυτήν την περιοχή. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτών των διαδικασιών για να γίνει κατανοητό ότι αυτές διαδικασίες (δρομολόγησης μηνύματος και εκλογή ηγέτη στον κύκλο ορίου περιοχής) μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω για την τέλεση βασικών χωρικών υπολογισμών. Συγκεκριμένα θα αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό του εμβαδού και του κεντροειδούς της περιοχής.

Το εμβαδόν μιας περιοχής σχήματος πολυγώνου P που ορίζεται από τα σημεία (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ..., (x_n, y_n) όπου $(x_1, y_1) = (x_n, y_n)$ μπορεί να υπολογιστεί από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{εμβαδόν}(P) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i$$

Βάση του παραπάνω τύπου για τον υπολογισμό του εμβαδού μιας περιοχής απαιτείται η άθροιση γειτονικών κορυφών του πολυγώνου. Έτσι βάση αποκεντρωμένης προσέγγισης, ένας κόμβος ηγέτη με τη διαθεσιμότητα των συντεταγμένων ενός και μόνο γειτονικού του

κόμβου στον κύκλο του ορίου (της περιοχής) μπορεί να υπολογίζει ένα στοιχείο του παραπάνω αθροίσματος και να το προωθεί σε επόμενο κόμβο και έτσι με διαδοχική προώθηση στον κύκλο να συναθροίζεται. Έτσι με την επιστροφή του μηνύματος στον κόμβο ηγέτη θα έχει υπολογιστή το εμβαδόν της περιοχής.

Αξιοποιώντας τον ακόλουθο τύπο μπορεί να γίνει αντίστοιχα και ο υπολογισμός του κεντροειδούς της περιοχής [38]:

$$x_{\text{centr}}(P) = \frac{1}{6} \cdot \text{εμβαδόν}(P) \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i),$$

$$y_{\text{centr}}(P) = \frac{1}{6} \cdot \text{εμβαδόν}(P) \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i).$$

Το πρωτόκολλο 6.8 επεκτείνει καταλλήλως το πρωτόκολλο 6.7 για να παρέχεται αυτήν η λειτουργικότητα. Ξεκινώντας από τον «εκλεγμένο» ηγέτη κάθε κόμβος προωθεί στο επόμενο στον κύκλο γείτονα του το μήνυμα *area* που περιέχει τις συντεταγμένες της θέσης του μαζί με τα μερικά αθροίσματα (εμβαδόν περιοχής α , συντεταγμένες κεντροειδούς c_x, c_y). Με τη λήψη της επιστροφής του μηνύματος η διαδικασία τερματίζεται. Έτσι ο ηγέτης πλέον κατέχει το εμβαδό και το κεντροειδές της περιοχής.

Πρωτόκολλο 6.8 Υπολογισμός εμβαδού και κεντροειδούς περιοχής που ορίζεται από κύκλο ορίου [38].

επέκταση: Πρωτόκολλο 6.7

Περιορισμοί: συνάρτηση θέσης $p : V \rightarrow \mathbb{R}^2$

IDLE

```

Receiving (area, i, (x, y),  $\alpha$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ )
  let (x', y') :=  $\hat{p}$ 
  let u := (x * y' - x' * y)
  send (area, id,  $\hat{p}$ ,  $\alpha + u$ ,  $c_x + (x + x') * u$ ,  $c_y + (y + y') * u$ ) to node with identifier  $\text{cyc}(i)$ 

```

BNDY

```

Receiving (msge, i, i') ; υπερφόρτωση χειριστή πρωτοκόλλου 6.6
  if i = id then ; όταν επιστρέψει το μήνυμα ο κόμβος γίνεται
    send (area, id,  $\hat{p}$ , 0, 0, 0) ; εκκινώντας τη διαδικασία υπολογισμού
    become LEAD ; και κεντροειδούς
  else
    if i < m then
      set m := i
      send (msge, i, id) to winid

```

```

Receiving (area, i, (x, y),  $\alpha$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ )
  let (x', y') :=  $\hat{p}$ 
  let u := (x * y' - x' * y)
  send (area, id,  $\hat{p}$ ,  $\alpha + u$ ,  $c_x + (x + x') * u$ ,  $c_y + (y + y') * u$ ) to node with identifier winid

```

LEAD

```

Receiving (area, i, (x, y),  $\alpha$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ )

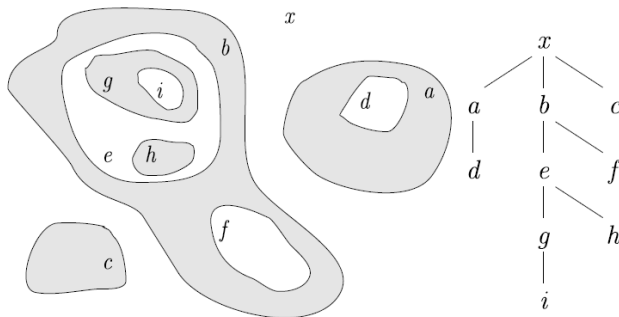
```

```

let (x', y') := p̂
let u := (x * y' - x' * y)
let area :=  $\frac{a+u}{2}$  ; τελικό εμβαδόν
let cenx :=  $\frac{c_x+(x+x')*u}{6*area}$  ; τελικές συντεταγμένες κεντροειδούς
let ceny :=  $\frac{c_y+(y+y')*u}{6*area}$ 

```

Πέρα από τα πρωτόκολλα που περιγράφηκαν σε αυτό το κεφάλαιο για δει κανείς περαιτέρω τις δυνατότητες αλγορίθμων εν γνώσει θέσης μπορεί να ανατρέξει στο [39], όπου παρουσιάζεται ένας προχωρημένος αλγόριθμος για τον καθορισμό της τοπολογικής δομής σύνθετων επιφανειακών αντικειμένων (Σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.8 Ένα σύνθετο επιφανειακό αντικείμενο και η τοπολογική του δομή αναπαριστώμενη ως δέντρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αλγόριθμοι δυναμικής

Οι αλγόριθμοι γειτονιάς και θέσης που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αφορούσαν επίλυση προβλημάτων όπου θεωρήθηκε εκ των προτέρων ότι δεν συμβαίνουν αλλαγές, μήτε στο περιβάλλον ανίχνευσης, μήτε στο σύστημα. Όμως η θεώρηση των αλλαγών είναι απαραίτητη για πολλές πρακτικές εφαρμογές, διότι ο κόσμος σε ένα σύστημα δικτύου αισθητήρων είναι ιδιαίτερα δυναμικός δηλ. συντελούνται αλλαγές στο χρόνο που αφορούν τόσο το περιβάλλον ανίχνευσης όσο και το ίδιο σύστημα.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αλγόριθμοι που εφαρμόζονται σε δίκτυα αισθητήρων για την επίλυση προβλημάτων όπου επέρχονται αυτού του είδους οι δυναμικές καταστάσεις, δηλ. όπου τα πράγματα –περιβάλλον και σύστημα- δύναται να αλλάζουν με το χρόνο. Οι αλγόριθμοι αυτοί ολοκληρώνουν την σχεδιαστική βάση της αποκεντρωμένης προσέγγισης που απαιτείται για την αντιμετώπιση εν γένει προβλημάτων χωρικών υπολογισμών.

7.1 Αλλαγές καταστάσεων στο ρου του χρόνου

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι για την επίλυση προβλημάτων για καταστάσεις που απαιτούσαν χωρικούς υπολογισμούς όπου εκ υποθέσεως θεωρήθηκε ότι δεν συμβαίνουν αλλαγές μήτε στο περιβάλλον ανίχνευσης²⁹ μήτε στο ίδιο το σύστημα (δίκτυο γεωαισθητήρων) δηλ. η διάσταση του χρόνου αγνοήθηκε από το μοντέλο.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αλγόριθμοι που εφαρμόζονται για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν δυναμικές καταστάσεις δηλ. τα πράγματα αλλάζουν με το χρόνο. Τέτοιες καταστάσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τα δίκτυα γεωαισθητήρων. Στην πραγματικότητα τα περισσότερα γεωγραφικά φαινόμενα και διάφορες άλλες καταστάσεις με χωρική αναφορά ενέχουν δυναμική δηλ. μεταβάλλονται με το χρόνο και τα δίκτυα αισθητήρων είναι η κατάλληλη τεχνολογία για την σύζευξη καταστάσεων φυσικότητας υψηλής δυναμικής με τα υπολογιστικά συστήματα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα συστήματα αυτά μπορούν να παρέχουν ένα ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο χρονικής ανάλυσης στη συλλογή-δειγματοληψία (δηλ. δυνατότητα συλλογής δεδομένων από το περιβάλλον σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα δειγματοληψίας) και επεξεργασία³⁰ των δεδομένων που

²⁹ Το περιβάλλον άμεσης σύζευξης της φυσικότητας, δηλ. οι εισοδοί της φυσικότητας στο σύστημα όπως παρέχονται από το σύστημα συλλογής δεδομένων των αισθητήρων.

³⁰ Υπενθυμίζεται ότι στα οφέλη της αποκεντρωμένης προσέγγισης που εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων σε δίκτυα αισθητήρων ή εν γένει σε κατανεμημένα συστήματα, αποτελεί η βελτιωμένη χρονική απόκριση του συστήματος, εν αντιθέση με τα συγκεντρωμένα συστήματα που καθίστανται απαγορευτικά από άποψη χρονικής απόκρισης σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. VANETs).

στην ακραία περίπτωση μάλιστα δύναται να παρέχει «αισθητήρια» ρεύματα δεδομένων δηλ. συνεχή ροή καταστάσεων φυσικότητας προς το υπολογιστικό σύστημα.

Πέρα όμως από τις αλλαγές της φυσικότητας³¹ των αντικειμένων στο περιβάλλον ανίχνευσης, σημαντικές είναι και οι αλλαγές που αφορούν το ίδιο το σύστημα δηλ. τα αισθητήρια, υπολογιστικά και επικοινωνιακά συστατικά. Παραδείγματα τέτοιων αλλαγών για ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελούν η μεταβολή της θέσης των κόμβων, η μεταβολή της δικτυακής συνδεσιμότητας των κόμβων, η μεταβολή της τοπολογίας του δικτύου (λόγω εισαγωγής, αφαίρεσης νέων κόμβων στο σύστημα) κ.α.. Έτσι απαιτείται εν γένει να ανιχνεύονται, να παρακολουθούνται, να ελέγχονται και να υφίστανται εν γένει επεξεργασίες καταστάσεις υψηλής δυναμικής. Το σύστημα θα πρέπει να χειρίζεται αυτές τις αλλαγές καταστάσεων καταλλήλως για την επίλυση προβλημάτων, διαθέτοντας την απαιτούμενη λειτουργικότητα.

7.1.1 Ιστορίες και χρονικά

Πριν καθορίσει κανείς αλγοριθμικές διαδικασίες για την επίλυση προβλημάτων όπου ενέχονται οι προαναφερόμενες δυναμικές καταστάσεις θα πρέπει να τις καθορίσει περισσότερο αναλυτικά στα πλαίσια ενός προβλήματος. Από την όψη των αλλαγών που επέρχονται στις καταστάσεις μπορούν να προκύψουν οι εξής δύο τύποι αλλαγών [20]:

- Ιστορίες (Histories)
- Χρονικά (Chronicle)

Μια *ιστορία* αποτελεί μια χωροχρονική καταγραφή (record) καταστάσεων κατά κάποιο λόγο «εμμενόντων» αντικειμένων (π.χ. σημειακών θέσεων, ορίων περιοχών, κινούμενων αντικειμένων κ.α.. Ένα *χρονικό* αποτελεί μια χωροχρονική καταγραφή *ουσιωδών* στοιχείων συμβάντων (perdurants) που συνέβησαν. Περαιτέρω οι αλλαγές μπορεί να επέρχονται *στιγμιαία* είτε να συντελούνται σε ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα, π.χ. όπως η επέκταση μιας περιοχής [40].

Η διάκριση του είδους των αλλαγών κατά το σχεδιασμό ενός αλγορίθμου είναι σημαντική για να μην υπάρξει σύγχυση, διότι οι υποκείμενες αλλαγές μπορούν συχνά να ειδικωθούν από διαφορετικές όψεις ανάλογα με τις ανάγκες μιας εφαρμογής. Για παράδειγμα, ως θεωρηθεί ένα δίκτυο γεωαισθητήρων επιφορτισμένο με την παρακολούθηση της εξάπλωσης μιας πετρελαιοκηλίδας. Αυτό το σύστημα από μια θεώρηση μπορεί να είναι επιθυμητό να παράγει μια ειδοποίηση (alert) όταν κάποια νέα πετρελαιοκηλίδα εμφανίζεται ή όταν κάποια υπάρχουσα διασπάται. Από μια άλλη θεώρηση μπορεί να είναι επιθυμητό απλώς κάθε 10 λεπτά το σύστημα να καταγράφει τα στοιχεία της συνεκτικότητας του εκχυθόντος ελαίου. Και οι δύο περιπτώσεις εντάσσονται στο ίδιο υποδειγματικό σενάριο, ωστόσο η πρώτη αποτελεί ένα παράδειγμα εφαρμογής καταγραφής *ουσιωδών αλλαγών* (χρονικό), ενώ η δεύτερη αποτελεί ένα παράδειγμα απλής καταγραφής της κατάστασης κάθε 10 λεπτά (ιστορία). Βέβαια δεν αποκλείεται μια εφαρμογή να απαιτεί και τους δύο τύπους πληροφοριών (ιστορίας και χρονικών). Η ενσωμάτωση ενός μόνο από τους δύο τύπους δεν επαρκεί πάντοτε.

³¹ Αφορούν αλλαγές σε πρωτογενή ή δευτερογενή περιγραφικά χαρακτηριστικά της φυσικότητας, π.χ. στη θερμοκρασία, στη θολότητα του νερού, στο pH κ.α.. Οι αλλαγές αυτές αφορούν περιγραφικά χαρακτηριστικά αλλά και τη θέση στο χώρο. Γενικώς, οι γεωγραφικές οντότητες ενέχουν μια δυναμική η οποία αφορά αυτές ακριβώς τις μεταβολές των παραμέτρων περιγραφόμενων σε γεωγραφικό χωροχρονικό πλαίσιο.

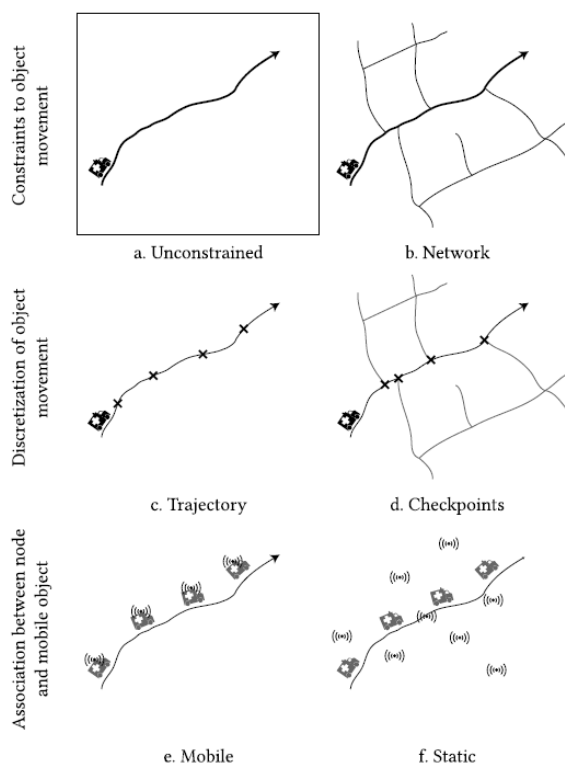
Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι αισθητήρες σε μια απλή εφαρμογή παρατήρησης ανιχνεύουν και παρέχουν δεδομένα σε μορφή ιστοριών παρά ανιχνεύουν άμεσα ουσιώδη συμβάντα (δηλ. τις εμφανίσεις που ενδιαφέρουν). Για παράδειγμα όταν εφαρμόζονται για την παρακολούθηση επιπέδων μόλυνσης (ατμοσφαιρικής ή υδάτινης) συλλέγουν συνεχώς δεδομένα για την παρουσία ή απουσία ορισμένων ρυπογόνων παραγόντων (ιστορίες). Οποιαδήποτε άλλη ουσιαστική πληροφορία – πληροφορία που ενδιαφέρει τους χρήστες του συστήματος παρακολούθησης όπως εξάπλωση ή διασπορά ρυπογόνων παραγόντων, πρέπει να συναχθεί από τις διαθέσιμες καταστάσεις (ιστορίες). Έτσι οι ενδιαφέρουσες καταστάσεις πρέπει αρκετές φορές να παράγονται από αρχέτυπες διαθέσιμες ιστορίες. Μια διαθέσιμη κατάσταση δεν είναι συνήθως άμεσα συνδεδεμένη ή σχετιζόμενη με το συμβάν που ενδιαφέρει.

7.1.2 Κινητά αντικείμενα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσο αναφορά τις αλλαγές καταστάσεων στο χρόνο, αποτελούν τα κινητά αντικείμενα. Πέρα από τη διάκριση των αλλαγών σε ιστορίες και χρονικά στο πλαίσιο των κινητών αντικειμένων μπορεί κανείς να διακρίνει και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά που είναι τα εξής [20]:

- **Χωρικοί περιορισμοί κινητικότητας:** Η κίνηση που λαμβάνει χώρα μπορεί να θεωρηθεί χωρικά περιορισμένη. Παράδειγμα αποτελεί ο περιορισμός της κίνησης εντός ενός δικτύου π.χ. η κίνηση ενός οχήματος στο οδικό δίκτυο μιας πόλης. Γενικώς η κίνηση οποιουδήποτε αντικειμένου μπορεί να επηρεάζεται από τους περιορισμούς κίνησης που επιβάλλονται από το περιβάλλον. Σε πολλές περιπτώσεις ο γεωγραφικός κόσμος επιβάλλει σημαντικούς περιορισμούς στην κίνηση. Κτίρια, δρόμοι, σιδηρόδρομοι, φράχτες, γέφυρες, ποτάμια, εθνικά σύνορα, τοπογραφία και άλλοι παράγοντες θέτουν περιορισμούς στην κυκλοφορία προσώπων, ζώων, ρομπότ και οχημάτων. Στην πραγματικότητα γεωγραφική κίνηση δίχως περιορισμούς είναι σπάνια. Οι περιορισμοί συχνά μπορούν να μοντελοποιηθούν από το δίκτυο μεταφοράς εντός του οποίου συντελείται η κίνηση. Στην αντίθετη πλευρά είναι η θεώρηση κίνησης δίχως χωρικούς περιορισμούς π.χ. όπως η κίνηση ενός ανθρώπου στο ύπαιθρο, η κίνηση ενός αεροπλάνου, μια οποιαδήποτε κίνηση στην επιφάνεια της Γης ή ακόμη και σε τρεις διαστάσεις π.χ. κίνηση στον αέρα.
- **Μορφή ανίχνευσης κινητικότητας:** Η κίνηση των αντικειμένων δύναται να ανιχνεύεται από το σύστημα σε μορφή «συνεχών» θέσεων στο χρόνο (ανίχνευση τροχιάς) είτε σε καθορισμένες θέσεις στο χώρο –σημεία ανίχνευσης– σε τυχαίους χρόνους ανίχνευσης. Αν και η κίνηση ενός αντικειμένου στο χώρο είναι ‘συνεχής’ μια πυκνή ακολουθία θέσεων ενός αντικειμένου κατά την κίνηση του κάθε Δt στο χρόνο (τροχιά) δεν είναι πάντα διαθέσιμη στις εφαρμογές και απλά υφίσταται η περίπτωση όπου το αντικείμενο ανιχνεύεται σε καθορισμένες θέσεις στο χρόνο π.χ. ενός οχήματος σε διόδια και απλά υφίσταται μια σειρά από χρονοσημάνσεις του αντικειμένου (timestamps). Τα σημεία στο χώρο όπου γίνεται η ανίχνευση καλούνται *σημεία ανίχνευσης ή ελέγχου (checkpoints)*. Σημεία ελέγχου μπορεί να υφίστανται ελεύθερα στο χώρο σε διάφορες θέσεις ή εντός δικτύων όπως κυψέλες κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ οδικού δικτύου κ.α..
- **Κινητικότητα κόμβων-αντικειμένων:** Οι κόμβοι του δικτύου αισθητήρων που παρακολουθούν την κίνηση αντικειμένων στην εμβέλεια τους μπορεί να είναι είτε κινητοί είτε στατικοί. Συχνά συμβαίνει η μεταφορά αισθητήρων από κινητά αντικείμενα λ.χ. αισθητήρες ενσωματωμένοι σε κινητά τηλέφωνα, οχήματα, ρομπότ κ.α..

Στο Σχήμα 7.1 συνοψίζονται όλα αυτά τα χαρακτηριστικά [20].



Σχήμα 7.1 Τρία χαρακτηριστικά της κινητικότητας που δύναται να αφορούν μια εφαρμογή δικτύου γεωαισθητήρων: α) Χωρικοί περιορισμοί κινητικότητας, β) Μορφή ανίχνευσης κινητικότητας, γ) Κινητικότητα κόμβων-αντικειμένων.

7.2 Ιστορίες δυναμικών περιβαλλόντων ανίχνευσης

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται αλγόριθμοι που εμπλέκουν απλά ιστορίες δεδομένων και το σύστημα θεωρείται στατικό δηλ. δεν υφίσταται κινητικότητα των κόμβων του συστήματος μήτε συμβαίνουν μεταβολές σε άλλες παραμέτρους του συστήματος. Το μόνο που μεταβάλλεται είναι οι τιμές των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών που ανιχνεύονται από τους αισθητήρες. Για παράδειγμα, μια τέτοια περίπτωση μπορεί να εμφανίζεται σε μια εφαρμογή ενός «μη κινητού» δικτύου αισθητήρων για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών όπως θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση CO₂ κ.α..

Τέτοιου είδους καταστάσεις είναι ένα καλό σημείο εκκίνησης για την διερεύνηση και σχεδιασμό αλγορίθμων επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών που αφορούν ένα δίκτυο αισθητήρων. Ένα σύνολο χωροχρονικών πλειάδων σε ένα δίκτυο αισθητήρων γίνεται τυπικά διαθέσιμο κατά τη δειγματοληψία σε μορφή ιστορίας και εάν θεωρηθεί περαιτέρω και ότι το σύστημα παραμένει στατικό δηλ. μη μεταβαλλόμενο, μη κινούμενο κοκ, σίγουρα είναι η απλούστερη περίπτωση δυναμικής προς αντιμετώπιση.

Ακολούθως θα παρουσιαστούν δύο τεχνικές για την καταγραφή ιστοριών. Η πρώτη τεχνική είναι η επαναληπτική πυροδότηση ενός δεδομένου αλγορίθμου «στατικού περιβάλλοντος ανίχνευσης». Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να πυροδοτείται επαναληπτικά

σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα ένας αλγόριθμος που έχει σχεδιαστεί για ένα στατικό περιβάλλον ανίχνευσης και έτσι να επιτυγχάνεται η συλλογή ιστοριών του δυναμικού περιβάλλοντος π.χ. ο αλγόριθμος «στατικού περιβάλλοντος ανίχνευσης» του ορίου μιας περιοχής που περιγράφηκε στο 5^ο κεφάλαιο μπορεί εύκολα να επεκταθεί για την ανίχνευση των αλλαγών του ορίου στο χρόνο, με κατάλληλη επαναληπτική πυροδότηση της εκκίνησης του. Η επαναληπτική πυροδότηση ενός «στατικού» αλγορίθμου δημιουργεί μια σειρά από στιγμιότυπα - ιστορίες.

Η δεύτερη τεχνική αφορά την αξιοποίηση πληροφοριών από προηγούμενα στιγμιότυπα που μπορούν να είναι χρήσιμες στις διαδικασίες πράγμα που οδηγεί στη διατήρηση προηγούμενων καταστάσεων και χρήση αυτών σε μεταγενέστερες χρονικές στιγμές.

Οι δύο τεχνικές παρουσιάζονται στις ακόλουθες υποενότητες με εφαρμογή στο παράδειγμα ανίχνευσης του ορίου μιας περιοχής.

7.2.1 Ιχνηλάτηση ορίου περιοχής (Boundary Tracking): Επαναληπτική πυροδότηση

Το Πρωτόκολλο 7.1 αποτελεί επέκταση του αλγορίθμου ανίχνευσης ορίου περιοχής του 5^{ου} κεφαλαίου εφαρμόζοντας την τεχνική της επαναληπτικής πυροδότησης [20].

Μια μικρή αλλαγή στο πρωτόκολλο 7.1 είναι το πεδίο ορισμού της συνάρτησης αισθητήρα s από $\{0, 1\}$ στο σύνολο των πραγματικών αριθμών \mathbb{R} . Αυτή η αλλαγή μοντελοποιεί λίγο πιο φυσικά τους περισσότερους αισθητήρες οι οποίοι παρέχουν μετρήσεις τιμών αναλογικών βαθμωτών μεγεθών όπως θερμοκρασία, φωτός κ.ο.κ.. Στην κεφαλίδα του πρωτοκόλλου ορίζεται ένα κατώφλι r κάτω από το οποίο οι αισθητήρες βρίσκονται εκτός της περιοχής. Η αλλαγή δεν αποτελεί ουσιαστική διαφορά όσο αναφορά τη λειτουργία του αλγορίθμου, καθώς υπάρχει άμεση αντιστοίχιση της ανιχνευόμενης τιμής βάση της τιμής του κατωφλίου με τις Boolean τιμές 0 ή 1. Υπάρχουν όμως οι ακόλουθες τρεις σημαντικές τεχνικές επεκτάσεις που έχουν σχέση με τον χειρισμό των χωροχρονικών αλλαγών του περιβάλλοντος ανίχνευσης:

- Το δίκτυο αισθητήρων μοντελοποιείται με χρονομετάβλητη συνάρτηση αισθητήρα $s: V \times T \rightarrow \mathbb{R}$. Έτσι για κάθε χρόνο $t \in T$, η $s(u, t)$ υποδηλώνει την ανιχνευόμενη τιμή στον κόμβο u σε χρόνο t .
- Η λέξη *now* χρησιμοποιείται για αναφορά "στην παρούσα χρονική στιγμή $t \in T$ ". Για παράδειγμα, η $s(u, now)$ υποδηλώνει την ανιχνευόμενη τιμή του κόμβου κατά την παρούσα χρονική στιγμή.
- Προκειμένου να καταστεί δυνατή η επαναλαμβανόμενη πυροδότηση μιας δράσης καθορίζεται το συμβάν "When time step elapsed". Ίσως θα ήταν πιο ακριβές να καθοριζόταν κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πυροδότησης d . Ωστόσο ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σίγουρα ποικίλει από εφαρμογή σε εφαρμογή και δεν σχετίζεται άμεσα με τη λειτουργία του αλγορίθμου.

Πρωτόκολλο 7.1. Ιχνηλάτηση (tracking) του εσωτερικού ορίου (inner boundary) μιας περιοχής σε δυναμικό περιβάλλον ανίχνευσης [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} ; $s: V \times T \rightarrow \mathbb{R}$; τιμή κατωφλίου περιοχής (r)

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{INIT, IDLE, BNDY\}, \{(INIT, IDLE), (IDLE, BNDY), (IDLE, INIT), (BNDY, INIT)\})$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι INIT

INIT

Spontaneously

broadcast (ping, $\hat{s}(\text{now})$) ; ευρεία εκπομπή ανιχνευόμενης τιμής
become IDLE

IDLE

Receiving(ping, s')

if $s' < r \leq \hat{s}$ then ; έλεγχος εάν ο κόμβος είναι εντός της περιοχής και γειτονικός
become BNDY ; με έναν κόμβο που βρίσκεται εκτός της περιοχής.

IDLE, BNDY

When time step elapsed

become INIT

Ο παραπάνω αλγόριθμος παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητος σε σχέση με τον αλγόριθμο «στατικής κατάστασης» καθορισμού ορίου περιοχής που παρουσιάστηκε στο 5^ο κεφάλαιο, πέρα από την επαναληπτική πυροδότηση. Έτσι η συνολική επικοινωνιακή πολυπλοκότητα (τα μηνύματα που στέλνονται) είναι $\Theta(|V| * |T|)$. Το σύνολο T θεωρείται ότι περιέχει τις χρονικές στιγμές της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Έτσι το $|T|$ ισούται με τον αριθμό των επαναληπτικών εκτελέσεων του αλγορίθμου. Τέλος η εξισορρόπηση φόρτου (load balance) είναι βέλτιστη, $O(1 * |T|)$ δηλ. $O(|T|)$.

7.2.2 Ιχνηλάτηση ορίου περιοχής (Boundary Tracking): Διατήρηση κατάστασης

Στο προηγούμενο πρωτόκολλο (Πρωτόκολλο 7.1) δεν λαμβάνεται υπόψη η χρονική αυτοσυσχέτιση των τιμών των κόμβων για τον καθορισμό του ορίου. Συχνά όμως στις εφαρμογές δικτύων αισθητήρων υπάρχουν καταστάσεις που είναι αρκετά όμοιες σε εγγύς χρόνους. Σε αυτήν την περίπτωση η επαναρχικοποίηση όλου του δικτύου βάση «σταθερού» χρονικού βήματος είναι μη αποτελεσματική. Μια τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτήν την περίπτωση είναι η διατήρηση πληροφοριών σχετικά με τις προηγούμενες καταστάσεις. Στο Πρωτόκολλο 7.2 επαναρχικοποιείται κάποιος κόμβος μόνο όταν η ανιχνευόμενη τιμή μιας περιβαλλοντικής παραμέτρου έχει αλλάξει αρκετά και ξεπεράσει το κατώφλι r εντός ή εκτός περιοχής. Αποθηκεύοντας την τιμή αισθητήρα s_i της προηγούμενης κατάστασης ένας κόμβος μπορεί να γνωρίζει εάν η τρέχουσα κατάσταση έχει ξεπεράσει το κατώφλι r , δηλ. εάν $s_i < r \leq s(u,t)$ ή $s(u,t) < r \leq s_i$.

Πρωτόκολλο 7.2 Ιχνηλάτηση (tracking) του εσωτερικού συνόρου μιας περιοχής με διατήρηση πληροφοριών κατάστασης [20]

Περιορισμοί: \mathcal{NB} ; $s : V \times T \rightarrow \mathbb{R}$; $id : V \rightarrow \mathbb{N}$, τιμή κατωφλιού περιοχής (r)

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{ \text{INIT}, \text{IDLE}, \text{BNDY} \}, \{(\text{INIT}, \text{IDLE}), (\text{IDLE}, \text{BNDY}), (\text{BNDY}, \text{INIT})\})$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι INIT

Τοπικά δεδομένα: ανιχνευόμενη τιμή στο χρόνο αλλαγής κατάστασης s_i ,
δεδομένα γείτονα $d : \text{nbr} \rightarrow \{-1, 0, 1\}$, $d(u) := -1$

INIT

Spontaneously

set $s_i := \hat{s}(\text{now})$; αποθήκευση τελευταίας τιμής
broadcast (ping, $\hat{s}(\text{now})$, \hat{id}) ; ευρεία εκπομπή τιμής και αναγνωριστικού
become IDLE

IDLE, BNDY

Spontaneously

if $\hat{s}(\text{now}) = 1$ and $0 \in d_*$ **then** ; ελέγχεται η συνθήκη ορίου
become BNDY
else
become IDLE

Receiving(ping, s', i)

set $d(i) := s'$; αποθήκευση τιμές γειτόνων

When $\hat{s}(\text{now}) < r \leq s_i$ **or** $s_i < r \leq \hat{s}(\text{now})$; έλεγχος ύπαρξης εναλλαγής τιμής
become INIT

Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται η αποστολή $|V|+|T|*|V'|$ μηνυμάτων, όπου $V' \subseteq V$ είναι το σύνολο των κόμβων που οι τιμές τους έχουν ξεπεράσει το κατώφλι r (δηλ. οι κόμβοι που έχουν αλλάξει από το να είναι εντός ή εκτός της περιοχής). Έτσι στην χειρότερη περίπτωση η επικοινωνιακή πολυπλοκότητα είναι ίδια με το Πρωτόκολλο 7.1.. Όμως στην καλύτερη περίπτωση, για παράδειγμα όταν υπάρχουν μόνο μερικοί (σταθερός αριθμός) κόμβοι αλλάζουν σε κάθε χρονικό βήμα η συνολική επικοινωνιακή πολυπλοκότητα γίνεται $\Omega(|V|)$. Σε αυτό το σημείο εάν αγνοηθεί το βήμα αρχικοποίησης (ως απλό κόστος ρύθμισης του δικτύου) το κόστος στην καλύτερη περίπτωση γίνεται $\Omega(1)$! Αν και είναι απίθανο να συμβεί αυτή η περίπτωση δηλ. εφόσον τα πράγματα είναι δυναμικά και ουσιαστικά αναμένεται ο αριθμός των κόμβων όπου επέρχονται αλλαγές να είναι ανάλογος του μεγέθους του δικτύου, αυτή η ιδέα δείχνει μια δραματική, σημαντική, και ενάντια στη διαίσθηση αρχή: ένας αλγόριθμος δυναμικής (δηλ. κατάλληλος για εφαρμογή σε δυναμικό περιβάλλον ανίχνευσης) μπορεί να είναι ίσος ή ακόμη και καλύτερος σε απόδοση από τον αντίστοιχο αλγόριθμο «στατικού περιβάλλοντος ανίχνευσης».

Ακριβώς όπως η μετάβαση από τους αλγορίθμους γειτονιάς στους αλγορίθμους θέσης επέφερε οφέλη λόγω της εγγενούς αυτοσυσχέτισης στο χώρο, έτσι και οι αλγόριθμοι δυναμικής εκμεταλλεύονται την χωροχρονική αυτοσυσχέτιση που είναι εγγενής σε πολλά

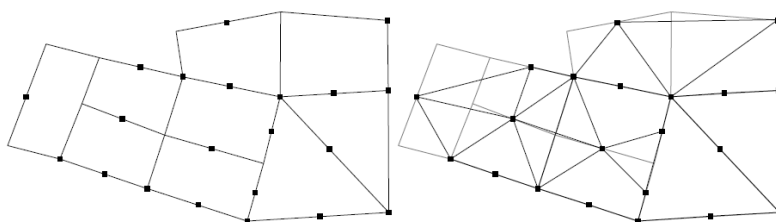
γεωγραφικά φαινόμενα. Έτσι οι αλγόριθμοι όπου διατηρείται η κατάσταση του παρελθόντος μπορούν να παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τους αλγόριθμους με απλή επαναληπτική πυροδότηση.

7.3 Ιστορίες κινητών αντικειμένων

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν στοιχειώδεις αλγόριθμοι επεξεργασίας χωρικής πληροφορία που αφορούσαν ένα δυναμικό περιβάλλον ανίχνευσης. Ένα ιδιαίτερο δυναμικό περιβάλλον ανίχνευσης αποτελούν τα κινητά αντικείμενα. Οχήματα, άνθρωποι, ρομπότ καθώς κινούνται στο χώρο δύναται να ανιχνεύονται και να εξάγονται περαιτέρω χωρικές πληροφορίες για αυτά από ένα δίκτυο αισθητήρων. Ακολουθώντας το θέμα προσεγγίζεται από τη θεώρηση ιστοριών αλλαγής κινητών αντικειμένων - ακολουθίες των καταστάσεων του προκείμενου κόσμου ανίχνευσης, παρά ουσιώδη γεγονότα ή συμβάντα.

7.3.1 Ιχνηλάτηση κινητών αντικειμένων μέσω σημείων ελέγχου (*check points*)

Έστω ένα δίκτυο μεταφορών με κινητά αντικείμενα (π.χ. οχήματα) που κινούνται αποκλειστικά σε αυτό και ένα δίκτυο αισθητήρων καταλλήλως εγκατεστημένο σε κατάλληλες θέσεις -σημεία ελέγχου- (όπως διασταυρώσεις, φανάρια κοκ). Μία τέτοια κατάσταση φαίνεται στο σχήμα 7.2α. Στο σχήμα 7.2α απεικονίζεται το δίκτυο μεταφοράς και τα σημεία ελέγχου (μαύρα τετράγωνα) σε ορισμένες θέσεις στις ακμές του δικτύου. Κάθε σημείο ελέγχου είναι ικανό να ανιχνεύει το όχημα και το αναγνωριστικό του καθώς διέρχεται από μπροστά του. Για αυτήν την κατάσταση δύναται να καθοριστεί ένα γράφημα συνδεσιμότητας όπου απεικονίζεται η γειτνίαση των σημείων ελέγχου δηλ. για κάθε σημείο ελέγχου με ποια σημεία ελέγχου συνδέεται άμεσα, έτσι ώστε κάθε κινούμενο όχημα που θα περάσει μπροστά από ένα σημείο ελέγχου να περάσει αναγκαστικά κατά την εξέλιξη της πορείας του από ένα άλλο σημείο ελέγχου που καθορίζεται στο γράφημα συνδεσιμότητας. Το σχήμα 7.2β δείχνει το γράφημα συνδεσιμότητας που «επάγεται» για την κατάσταση του σχήματος 7.2^α [20].



(α) Δίκτυο μεταφοράς και σημεία ελέγχου

(β) Επαγόμενο γράφημα συνδεσιμότητας

Σχήμα 7.2 Ένα δίκτυο αισθητήρων εγκατεστημένο σε δίκτυο μεταφοράς για την ανίχνευση κινητών αντικειμένων-οχημάτων

Σε αυτό το σενάριο θα ήταν χρήσιμος ένας αλγόριθμος βάση του οποίου το δίκτυο αισθητήρων θα κατέγραφε το χρόνο διέλευσης κάθε οχήματος μπροστά από κάθε σημείο ελέγχου και θα μπορούσε να απαντήσει το ερώτημα σε ποιες ακμές του γραφήματος συνδεσιμότητας και σε ποιους χρόνους βρίσκονται συγκεκριμένα οχήματα. Ένα

πρωτόκολλο που υλοποιεί έναν τέτοιο αλγόριθμο είναι το πρωτόκολλο 7.3.. Στο πρωτόκολλο 7.3 κάθε σημείο ελέγχου (κόμβος αισθητήρα) διατηρεί στην τοπική του βάση δεδομένων έναν πίνακα m εγγραφών με τα εξής πεδία: αναγνωριστικό ανιχνευόμενου κινητού αντικειμένου (oid), χρόνος εισόδου στην ακμή ($enter$), χρόνος εξόδου από την ακμή ($exit$), αναγνωριστικό σημείου ελέγχου εισόδου (in), αναγνωριστικό σημείου ελέγχου εξόδου (out). Βάση αυτού του πρωτοκόλλου γίνονται τα εξής:

Πρωτόκολλο 7.3 Ιχνηλάτηση κινητών αντικειμένων μέσω σημείων ελέγχου [20].

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , το «επαγόμενο» γράφημα συνδεσιμότητας V είναι υπογράφημα του γραφήματος συνδεσιμότητας του δικτύου αισθητήρων, $s : V \times T \rightarrow O \cup \{\emptyset\}$ όπου O είναι το σύνολο των αναγνωριστικών των κινητών αντικειμένων, $id : V \rightarrow \mathbb{N}$.

Συστ. Πεπ. Κατ.: ({IDLE}, \emptyset)

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

Τοπικά δεδομένα: Table $m = \langle oid : O, enter : T, exit : T, in : \mathbb{N}, out : \mathbb{N} \rangle$, $m := \emptyset$

IDLE

```

When  $\hat{s}(now) \neq \emptyset$  ; ανίχνευση κινητού αντικειμένου
  let  $o = \hat{s}(now)$  ; αποθήκευση κωδικού αντικειμένου
  INSERT INTO  $m$  VALUES ( $o, now, NULL, id, NULL$ ) ; δημιουργία νέας εγγραφής
  broadcast ( $exodus, o, now, id$ )

Receiving ( $exodus, o, t_x, i$ ) ; έλεγχος εάν υπάρχει ανοιχτή εγγραφή και κλείσιμο
  if SELECT count(*) FROM  $m$  WHERE exit = NULL AND oid =  $o$  AND in =  $id > 0$  then
    let  $t_n :=$  SELECT enter INTO  $t_n$  FROM  $m$  WHERE exit = NULL AND oid =  $o$ 
    UPDATE  $m$  SET exit =  $t_x, out = i$  WHERE exit = NULL AND oid =  $o$  ; κλείσιμο εγγραφής
    send ( $entr, o, t_n, t_x, id$ ) to node with identifier  $i$ 

Receiving ( $entr, o, t_n, t_x, i$ )
  INSERT INTO  $m$  VALUES ( $o, t_n, t_x, i, id$ )

```

1. Όταν το σημείο ελέγχου ανιχνεύσει ένα κινητό αντικείμενο δημιουργεί μια εγγραφή στον πίνακα «κίνησης» m με το αναγνωριστικό του κινητού αντικειμένου (oid), τον χρόνο εισόδου στην ακμή ($enter$), και το δικό του αναγνωριστικό (in). Αυτές τις πληροφορίες τις μεταδίδει με ένα μήνυμα *exodus* στους γείτονές του.
2. Με τη λήψη μηνύματος *exodus*, ένας κόμβος ελέγχει πρώτα εάν ο δικός του πίνακας κίνησης περιέχει "ανοικτές" εγγραφές για το συγκεκριμένο κινητό αντικείμενο. Μια «ανοιχτή» εγγραφή είναι εκείνη όπου είναι γνωστά το αναγνωριστικό του κινητού αντικειμένου, το αναγνωριστικό εισόδου είναι ίσο με το αναγνωριστικό του κόμβου, ο χρόνος εισόδου αλλά ο χρόνος εξόδου και το αναγνωριστικό εξόδου είναι άγνωστα (τιμές NULL). Εάν εντοπιστεί μία τέτοια εγγραφή ενημερώνεται με τον χρόνο εξόδου και το αναγνωριστικό εξόδου από τα στοιχεία του μηνύματος *exodus*. Έπειτα αποστέλλεται

ένα μήνυμα ENTR με την πλήρη εγγραφή που αφορά τη συγκεκριμένη κίνηση, στον κόμβο που έστειλε το μήνυμα exodus.

3. Το σημείο ελέγχου που λαμβάνει το μήνυμα ENTR εισάγει μια νέα εγγραφή στον πίνακα κίνησης m με τις πληροφορίες σχετικά με την κίνηση αντικειμένου που περιέχονται στο μήνυμα exodus.

Για την διαχείριση του πίνακα κίνησης m γίνεται χρήση δηλώσεων SQL.

Πέρα από την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου μια ανάλυση αντιπάλου αποκαλύπτει ότι ο αλγόριθμος δεν λειτουργεί σωστά όταν κάποιο όχημα κινηθεί έτσι ώστε να εισέρθει και ακολούθως να εξέρθει από το ίδιο σημείο ελέγχου. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει το πρωτόκολλο να τροποποιηθεί καταλλήλως. Επίσης υπάρχει πρόβλημα όταν δύο οχήματα ταυτόχρονα διέρθουν από κάποιο σημείο ελέγχου. Δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολο να τροποποιηθεί το πρωτόκολλο ώστε να αντιμετωπιστεί και αυτή η περίπτωση.

Ένα ποιο λεπτό ζήτημα είναι να τροποποιηθεί ο αλγόριθμος ώστε να επεξεργάζεται το σύστημα διάφορα ερωτήματα που αφορούν το σύνολο της κατανεμημένης πληροφορίας κίνησης και όχι απλά την τοπική κίνηση. Για αυτήν την κατανεμημένη πληροφορία μπορούν να διατυπωθούν ποικίλα ερωτήματα, από ερωτήματα στιγμών (moments) για συγκεκριμένα οχήματα μέχρι ερωτήματα για την κίνηση ομάδων οχημάτων. Για αυτό το λόγο πρέπει να διερευνηθούν και να σχεδιαστούν εξελιγμένοι αλγόριθμοι.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός δημιουργίας της πληροφορίας (generation of information) και της επεξεργασίας των ερωτημάτων (querying) είναι ταχτικός πολύ περισσότερο σε χωροχρονικούς αλγορίθμους παρά σε χωρικούς αλγορίθμους. Επειδή αλλαγές συμβαίνουν συνεχώς το δίκτυο θα πρέπει αρχικώς να καταγράφει αυτές τις αλλαγές τη στιγμή που συμβαίνουν. Αυτές οι πληροφορίες (σχετικές με τις αλλαγές) μπορεί να μην απαιτούνται την τρέχουσα στιγμή της καταγραφής αλλά σε κάποια μεταγενέστερη στιγμή και έτσι είναι συχνά βολικό η επεξεργασία των ερωτημάτων να διαχωρίζεται από την καταγραφή αποθήκευση των πληροφοριών, δηλ. δύναται να χρησιμοποιούνται ξεχωριστοί αλγόριθμοι..

7.3.2 Διάχυση πληροφορίας στην περίπτωση κινητών κόμβων: Πλημμύρες και επιδημίες

Όπως είναι γνωστό οι αλγόριθμοι πλημμύρας είναι τεχνικές για την διάχυση πληροφοριών σε ένα δίκτυο. Αυτού του είδους οι τεχνικές μπορούν σχετικά εύκολα να προσαρμοστούν για περιπτώσεις όπου οι κόμβοι του δικτύου είναι κινούμενοι, λ.χ. όπως σε ένα δίκτυο αισθητήρων κινητών κόμβων. Το Πρωτόκολλο 7.4 παρέχει ένα παράδειγμα αλγόριθμου πλημμύρας με καταμέτρηση των βημάτων διάχυσης (hop-count) για κινητούς κόμβους. Η συνάρτηση αισθητήρα στο πρωτόκολλο έχει οριστεί ως χρονομεταβαλλόμενη bool –ανίχνευση παρουσίας ή απουσίας κάποιου περιβαλλοντικού χαρακτηριστικού- π.χ. της ρύπανσης. Όταν ο αισθητήρας ανιχνεύσει την παρουσία του φαινομένου σε έναν κόμβο u στο χρόνο t (δηλαδή, όταν $\xi(u,t) = 1$), ο κόμβος εκπέμπει ένα νέο μήνυμα με το μετρητή βημάτων αρχικοποιημένο στην τιμή 0 και μεταβαίνει από την κατάσταση IDLE στην κατάσταση DONE. Το μήνυμα εξακολουθεί να διαβιβάζεται από τους κόμβους μέχρι ένα ανώτατο όριο αλμάτων (max hop count). Ο κόμβος μπορεί μόνο να επαναρχικοποιηθεί (μετάβαση στην κατάσταση IDLE) μόνο σε έναν μεταγενέστερο χρόνο t , άπαξ και $\xi(u,t)=0$, δηλ. κατά την απουσία περιβαλλοντικού χαρακτηριστικού φαινομένου. Με τον τρόπο αυτό παράγεται μόνο μήνυμα ανά ανίχνευση από κάθε κόμβο.

Πρωτόκολλο 7.4 Πλημμύρα με καταμέτρηση βημάτων διάχυσης (hop-count flooding) για κινητούς κόμβους [20].

Περιορισμοί: Αξιόπ. επικοινωνία χρονικά μεταβαλλόμενο γράφημα συνδεσιμότητας

$$G(t) = (V, E(t)), s : V \times T \rightarrow \{0,1\}$$

Συστ. Πεπ. Κατ.: ({IDLE, DONE}, {(IDLE, DONE), (DONE, IDLE)})

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

IDLE

When $\hat{s}(\text{now}) = 1$; έλεγχος παρουσίας χαρακτηριστικού
broadcast (msg, 0) ; Ευρεία εκπομπή μηνύματος *msg* στους γείτονες με
become DONE ; με αρχικοποίηση μετρητή στο μηδέν

DONE

When $\hat{s}(\text{now}) = 0$; έλεγχος για απουσία χαρακτηριστικού
become IDLE

IDLE, DONE

Receiving (msg, h)
if $h < 10$ **then** ; Μέγιστος αριθμός βημάτων προώθησης
broadcast (msg, h + 1) ; Ευρεία εκπομπή μηνύματος *msg* στους γείτονες

Το Πρωτόκολλο 7.4 έχει σχεδιαστεί για κινητούς κόμβους σε δυναμικό περιβάλλον ανίχνευσης. Το γράφημα συνδεσιμότητας θεωρείται χρονικά μεταβαλλόμενο $G(t) = (V, E(t))$, δηλ. οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων $E(t)$ δύναται να μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και υποθέτοντας ότι το γράφημα συνδεσιμότητας παραμένει συνεκτικό. Ο αλγόριθμος λειτουργεί σωστά ακόμα και αν οι περιορισμοί χαλαρωθούν περαιτέρω, επιτρέποντας πτητικούς κόμβους δηλ. δίκτυα όπου κόμβοι μπορούν να προστίθενται ή να αφαιρούνται από το σύστημα, δηλ. όταν $G(t) = (V(t), E(t))$. Και επίσης ο αλγόριθμος θα λειτουργεί σωστά όταν οι κόμβοι είναι ακίνητοι. Πράγματι, αυτό είναι ένα γενικό χαρακτηριστικό των αλγορίθμων για κινητούς κόμβους, όπου η μη κινητικότητα μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της κινητικότητας. Το πρωτόκολλο τέλος δεν το ενδιαφέρει εάν η κίνηση περιορίζεται με κάποιον τρόπο π.χ. όπως την περίπτωση κίνησης οχημάτων σε ένα δίκτυο μεταφοράς.

Το πρωτόκολλο 7.5 υιοθετεί μια πιο ρητή χωροχρονική προσέγγιση σε σχέση με το προηγούμενο, με βάση την ιδέα μιας επιδημίας. Αντί για καταμέτρηση βημάτων προώθησης, μετράται ο αριθμός των γειτόνων που "μολύνονται" από το διαχεόμενο τεμάχιο πληροφορίας. Στο πρωτόκολλο 7.5 καθορίζεται επίσης ένας μετρητής επιδημικής διάδοσης e . Όταν ένας κόμβος ανιχνεύει ένα περιβαλλοντικό χαρακτηριστικό ενημερώνει e και γείτονες που συναντά.

Πρωτόκολλο 7.5 Επιδημική διάχυση πληροφορίας σε κινητούς κόμβους [20].

Περιορισμοί: Αξιόπιστη επικοινωνία με πιθανή απώλεια συνδέσεων $G(t) = (V, E(t))$,

$id : V \rightarrow \mathbb{N}$, $nbr : V \times T \rightarrow \mathbb{N}$, όπου $nbr(u,t) \mapsto \{id(u') \mid \{u, u'\} \in E(t)\}$, $s : V \times T \rightarrow \{0,1\}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{IDLE, SEND\}, \{(IDLE, SEND), (SEND, IDLE)\})$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

Τοπικά δεδομένα: Μετρητής μολύνσεων e , $e := 10$, set N of visited neighbors, $N := \emptyset$

IDLE

When $\dot{s} = 1$; *Check for presence of sensed variable*
become SEND

SEND

When $|nbr(now)| > 0$; *Check for presence of sensed variable*
if $e \geq |nbr(now) - N|$ **then**
 send (msge) to $nbr(now) - N$; *Send msge to unvisited neighbors*
 set $e := e - |nbr(now) - N|$
else
 send (msge) to e arbitrarily chosen neighbors in $nbr(now) - N$
 set $e := 0$
if $e = 0$ **then**
 set $e := 10$; *Infection count set to 10 neighbors*
 set $N := \emptyset$; *Reset visited neighbors*
become IDLE

Μια σημαντική αλλαγή στο σχεδιασμό του πρωτοκόλλου 7.5 είναι η απομάκρυνση του περιορισμού για συνδεδεμένο δίκτυο. Το γράφημα συνδεσιμότητας θεωρείται της μορφής $G(t) = (V, E(t))$ δηλ. οι ακμές συνδεσιμότητας είναι χρονικά μεταβαλλόμενες και σε οποιαδήποτε στιγμή είναι δυνατόν μερικοί ή ακόμα και όλοι οι κόμβοι να έχουν αποσυνδεθεί. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο κόμβος που πρέπει να διαδώσει κάποιο μήνυμα απλώς περιμένει έως ότου να μπορεί να επικοινωνήσει. Η προσέγγιση επίτρεψης διάχυσης πληροφορίας από κινητούς κόμβους απουσία συνδεσιμότητας δικτύου είναι θεμελιώδους σημασίας και χρησιμοποιείται ευρέως σε κινητούς κόμβους. Η προσέγγιση είναι αυτή αποκαλείται *διάχυση κινητικότητας* (mobility diffusion) [20].

Στο πρωτόκολλο 7.5 οι κόμβοι κάνουν πλήρη χρήση της διάχυσης κινητικότητας απλά «μολύνοντας» τους γείτονες (one hop).

Όσον αφορά την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου, το πρωτόκολλο 7.5 είναι πολύ αποδοτικό, απαιτώντας μόνο την αποστολή e μηνυμάτων ανά περιβαλλοντικό γεγονός. Αν θεωρηθεί ότι στην καλύτερη περίπτωση, ο αριθμός των γεγονότων που ανιχνεύονται είναι γραμμικά συσχετισμένος ως προς το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου η συνολική επικοινωνιακή πολυπλοκότητα γίνεται $\Omega(e \cdot |T|)$ (δηλ. ανεξάρτητη από το μέγεθος του δικτύου).

Ωστόσο ένα μειονέκτημα της χρήσης της διάχυσης κινητικότητας είναι η έλλειψη εγγυήσεων παράδοσης. Στις περισσότερες εφαρμογές είναι εξαιρετικά απίθανο ένας κινητός κόμβος να γίνει one-hop γείτονας προς κάθε άλλο κόμβο του δικτύου σε εύλογο χρονικό διάστημα. Ως εκ τούτου, μόλις ανιχνευτεί ένα συμβάν οι πληροφορίες θα μολύνουν

συνήθως μόνο ένα μικρό ποσοστό κόμβων του δικτύου, ανεξαρτήτως από το όριο της διάδοσης της επιδημίας (threshold). Για να αντιμετωπίσει αυτό, η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε επίσης εύκολα να συνδυαστεί με τη διάχυση πλημμύρας hop-count, όπου η πληροφορίες που λαμβάνονται αναμεταδίδονται μέχρι κάποιο όριο βημάτων (hop-count) ωστόσο σε αντίτιμο της αποδοτικότητας.

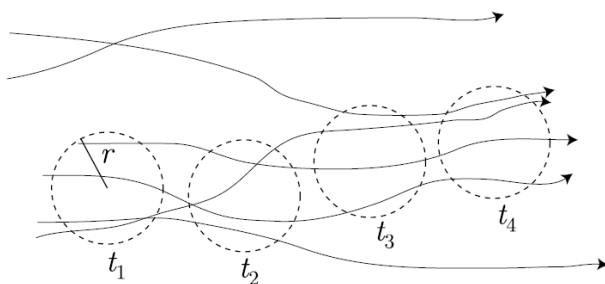
Επιπλέον, το πρωτόκολλο 7.5 θεωρεί ότι ο κάθε κόμβος αντιμετωπίζει μόνο μία περιβαλλοντική ανίχνευση κάθε στιγμή. Αν ένας κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση SEND (δηλαδή μολύνει) τους γείτονες του με πληροφορίες προς διάχυση, δεν μπορεί να προκληθεί εκ πυροδότηση η ανίχνευση νέων περιβαλλοντικών εμφανίσεων.

7.4 Χρονικά κινητών κόμβων

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ανεπεξέργαστα δεδομένα αισθητήρα είναι υπό μορφή ιστοριών. Κατά συνέπεια τίθεται το πρόβλημα της μετάβασης από ιστορίες σε χρονικά όπου από ένα σύνολο καταστάσεων (ιστορίες) επιχειρείται η συναγωγή (συμπερασμός) ουσιωδών πληροφοριών (χρονικά). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εξαγωγή προτύπων κίνησης (movement patterns) από δεδομένα τροχιών (trajectories) [41].

Το *σμήνος (flocking)* είναι ένα από τα πιο μελετημένα και πιο προκλητικά πρότυπα κίνησης. Μια ομάδα κινητών αντικείμενων αποτελεί ένα "σμήνος" όταν τα μέλη της προχωρούν μαζί για κάποιο χρονικό διάστημα. Τα σμήνη παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την παρακολούθηση από ένα δίκτυο αισθητήρων ανθρώπων αλλά και ζώων. Για παράδειγμα, ο εντοπισμός σμήνων πεζών μπορεί να είναι σημαντικός για την κατάλληλη αντιμετώπιση του πλήθους, ώστε να αποφευχθεί συμφόρηση κατά τη διάρκεια εκκένωσης έκτακτης ανάγκης [41]. Περαιτέρω η γνώση της συμπεριφοράς σμήνους ζώων μπορεί να είναι σημαντική για την προστασία βοσκοτόπων κα.

Ένας από τους πιο διαδεδομένους ορισμούς για το σμήνος είναι το nkr -σμήνος: μια ομάδα από n κινητά αντικείμενα τα οποία παραμένουν εντός κυκλικού δίσκου ακτίνας r για ένα χρονικό διάστημα k [42]. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται αυτή η ιδέα: ένα σμήνος όπου $n = 4$, $k = 4$ και ακτίνα r (Σχήμα 7.3). Το σμήνος που απεικονίζεται στο σχήμα δεν απαρτίζεται κατά τη διάρκεια της ύπαρξής του κατ' ανάγκη από τα ίδια κινητά αντικείμενα. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σημαντικό να γίνετε διάκριση εάν το σμήνος αφορά τα ίδια αντικείμενα κατά τη διάρκεια της ύπαρξής του και σε άλλες δεν είναι.



Σχήμα 7.3 Ένα παράδειγμα nkr -σμήνους, με μέγεθος $n=4$, διάρκεια $k=4$ και ακτίνα r .

Γενικώς, οι υπολογισμοί που αφορούν σμήνη μπορεί να γίνουν αρκετά περίπλοκοι ακόμα και για συγκεντρωμένα συστήματα χωρικών πληροφοριών. Αυτό ισχύει και για το nkr -σμήνους το οποίο είναι υπολογιστικά δυσεπίλυτο. Έτσι για τον υπολογισμό του εφαρμόζονται ευρετικές (heuristics). Το πρωτόκολλο 7.6 αποτελεί έναν αλγόριθμο

υπολογισμού σμήνους-nkr, όπου εφαρμόζεται μια απλή ευρετική [20]. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

- Κάθε κόμβος μεταδίδει περιοδικά ένα μήνυμα posn που περιέχει το αναγνωριστικό του, τη θέση του και την τρέχουσα χρονική σήμανση (time stamp) καθώς και προσθέτει μια εγγραφή με το id του και αυτήν την χρονική σήμανση στον πίνακα κίνησης m.
- Οι κόμβοι που λαμβάνουν το μήνυμα posn ελέγχουν α) εάν η απόσταση μεταξύ της δικής τους θέσης και αυτής που αναφέρεται στο μήνυμα είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα r του σμήνους, β) εάν έχουν ήδη λάβει και αποθηκεύσει ένα παρόμοιο μήνυμα. Εάν αυτές οι προϋποθέσεις δεν ισχύουν ο κόμβος μπορεί να αποθηκεύσει τις πληροφορίες από το μήνυμα posn στο δικό του πίνακα κίνησης m.

Πρωτόκολλο 7.6 Στοιχειώδης αλγόριθμος υπολογισμού σμήνους [20]

Περιορισμοί: Αξιόπιστη επικοινωνία: $G(t) = (V, E(t))$, $id : V \rightarrow \mathbb{N}$,

συντεταγμένες θέσης $p : V \times T \rightarrow \mathbb{R}^2$, παράμετροι σμήνους: n (ελάχιστος αριθμός αντικειμένων στο σμήνος), k (ελάχιστη διάρκεια ύπαρξης σμήνους), r (ακτίνα σμήνους)

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{\{IDLE, \emptyset\}\}$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

Τοπικά δεδομένα: Εποχή e, $e := t_0$, πίνακας κίνησης $m = \langle nid : \mathbb{N}, epoch : T \rangle$,
 $m := \langle id, t_0 \rangle$ (προσθήκη εγγραφής)

IDLE

When time trigger elapsed

set e := now ; Αποθήκευση τρέχουσας εποχής
INSERT INTO m VALUES (id, e) ; Προσθήκη
broadcast (posn, id, p(now), e) ; Ευρεία εκπομπή id, τρέχουσας θέσης και
; και τρέχουσας εποχής

Receiving (posn, i, p', e')

; Έλεγχος εάν το μήνυμα προήρθε από κόμβο εντός κύκλου ακτίνας r

if $\delta(p(e'), p') < r$ **then**

let g := SELECT max(epoch) INTO g FROM m WHERE epoch \leq e' ; Εντοπισμός
; κοντινής εποχής

let d be SELECT COUNT (*) INTO d FROM m WHERE nid = i AND epoch = g

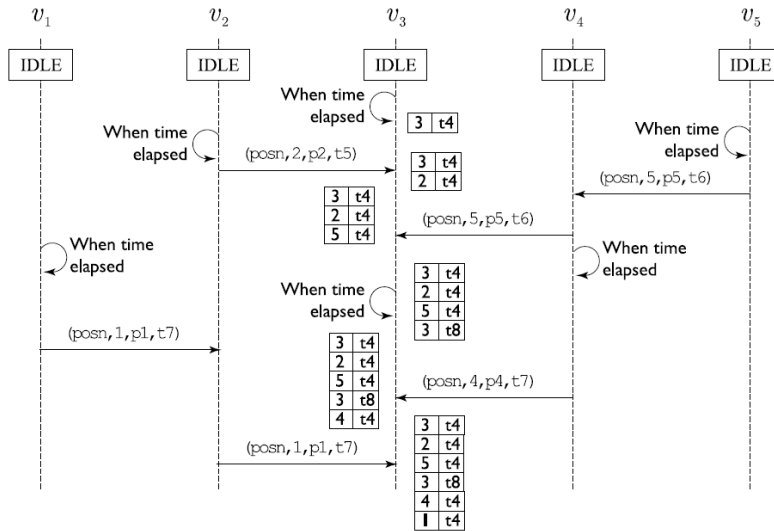
if d = 0 **then** ; Έλεγχος εάν τα δεδομένα είναι νέα

INSERT INTO m VALUES (i, g) ; Αποθήκευση νέων δεδομένων

broadcast (posn, i, p', e') ; Αναμετάδοση μηνύματος

Λόγω του ότι τα μηνύματα posn που παράγονται από διαφορετικούς κόμβους στον ίδιο χρόνο μπορεί να έχουν ελαφρώς διαφορετικές χρονικές σημάνσεις και να υφίστανται διαφορετικές καθυστερήσεις καθώς μεταδίδονται στο δίκτυο, οι κόμβοι δεν μπορούν να συγχρονιστούν κατά την πυροδότηση της αποστολής των μηνυμάτων posn. Γι' αυτό το λόγο όταν ένας κόμβος αποθηκεύει μια εγγραφή από ένα μήνυμα posn στον πίνακα κίνησής του, ο κόμβος εντάσσει την εγγραφή σε μια τοπική εποχή - συγκεκριμένα στην τελευταία εποχή που πυροδοτήθηκε η αποστολή ενός μηνύματος posn. Στο σχήμα 7.4 φαίνεται σε ένα

διάγραμμα ακολουθίας η λειτουργία του πρωτοκόλλου 7.6, όπου φαίνονται βάση αυτού οι αλλαγές που συντελούνται στο πίνακα κίνησης για τον κόμβο u_3 .



Σχήμα 7.4 Διάγραμμα ακολουθίας για 5 κόμβους, u_1, u_2, \dots, u_5 , όπου φαίνεται οι αλλαγές που συντελούνται στον πίνακα κίνησης του κόμβου u_3 [20].

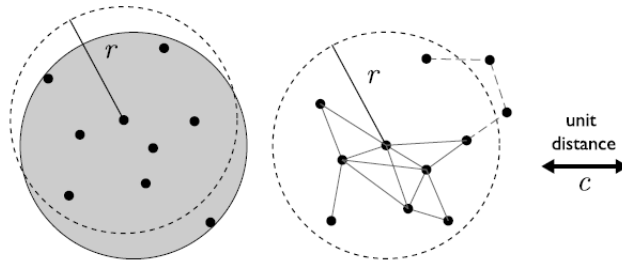
Στην περίπτωση που περισσότερες από n εγγραφές εντοπίζονται για διαδοχικές εποχές και εκτείνονται σε χρονικό διάστημα k , ο κόμβος δύναται να εντοπίζει την ύπαρξη ενός σμήνους. Η συνθήκη αυτή μπορεί να ελέγχεται με κατάλληλη επαναληπτική διεργασία αναζήτησης στις εγγραφές του πίνακα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί λόγω της δυσεπιλυσιμότητας του προβλήματος η μέθοδος που εφαρμόζεται είναι προσεγγιστική. Στην πραγματικότητα η συγκεκριμένη προσέγγιση παρέχει μια «συνεπή υποεκτίμηση» του σμήνους λόγω του ότι ενώ δεν υφίσταται κανένα σφάλμα προμήθειας, ωστόσο υπόκειται σε σφάλματα παράλειψης για τους ακόλουθους λόγους:

- Βάση του πρωτόκολλο 7.6 εντοπίζονται μόνο σμήνη εντός δίσκου ακτίνας r κεντραρισμένου σε έναν κόμβο του δικτύου. Βάση αυτής της ευρετικής είναι δυνατόν ορισμένα σμήνη με μικρότερο n ή περισσότερα αυτοσυσχετιζόμενες θέσεις κόμβων να μην εντοπίζονται (Σχήμα 7.5α).
- Τα μηνύματα $posn$ δεν μπορεί να ταξιδέψουν πέρα από απόσταση r από την προέλευση τους (λόγω της συνθήκης αναμετάδοσης στο πρωτόκολλο 7.6 στη δράση χειρισμού του συμβάντος Receiving ενός μηνύματος $posn$). Κατά συνέπεια, σε περιπτώσεις που το υπογράφημα συνδεσιμότητας που επάγεται από το σύνολο των κόμβων που βρίσκονται εντός του δίσκου είναι μη συνεκτικό, το μέγεθος του κοπαδιού μπορεί να υποτιμηθεί. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε απλώς επειδή η απόσταση c (εμβέλεια μετάδοσης) σε σύγκριση με το r είναι πολύ μικρή είτε γιατί οι μόνες διαδρομές μεταξύ των κόμβων στο δίσκο περνούν μέσω κόμβων εκτός του δίσκου (Σχήμα 7.6b).
- Εάν και τα ρολόγια στους κόμβους δεν χρειάζεται να είναι συγχρονισμένα, ωστόσο εάν επιπλέον στην έλλειψη συγχρονισμού ορισμένα από αυτά έχουν και σημαντικό συστηματικό σφάλμα (drift) (δηλ. τρέχουν γρηγορότερα ή πιο αργά από τα ρολόγια σε άλλους κόμβους) είναι πιθανό να προκαλείται που και που η παράλειψη κάποιας εποχής σε

έναν κόμβο ο οποίος είναι μέλος του σμήνους. Στην περίπτωση που το σμήνος αριθμεί ακριβώς ή σχεδόν n κόμβους οι παραλειπόμενες εγγραφές μπορεί να γίνουν αιτία να πέσει ο μετρητής των κόμβων στον πίνακα κίνησης κάτω από τον ελάχιστο αριθμό αντικειμένων σε ένα σμήνος.

Τέλος πιο εξελιγμένες ευρετικές μπορούν να βρεθούν στο [43, 44] και άλλα σημαντικά πρότυπα κίνησης που με παρόμοιες τεχνικές είναι δυνατόν να προσδιορίζονται όπως η ηγεσία (leadership), σύγκλιση (convergence) και απόκλιση (divergence) [45].



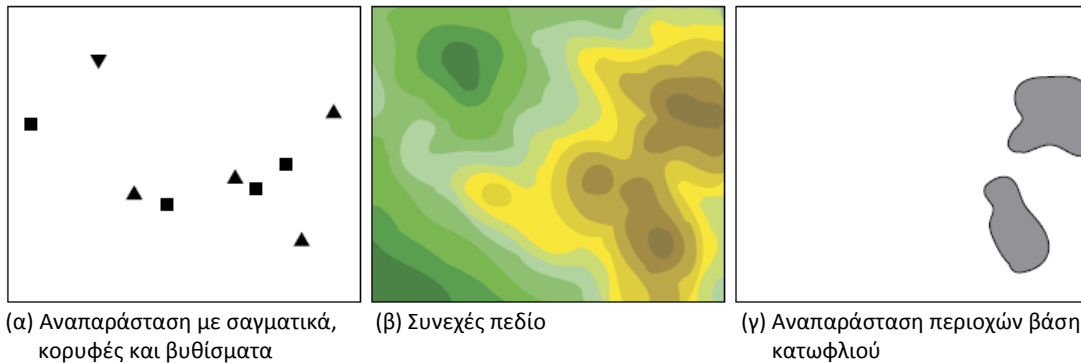
(α) Μη κεντραρισμένος δίσκος στον κόμβο (β) Ο δίσκος επάγει μη συνεκτικό γράφημα

Σχήμα 7.4 Δύο παραδείγματα που οδηγούν σε μη ανιχνεύσιμα σμήνη. Στην περίπτωση (α) οι 9 κόμβοι στον γκριζό δίσκο δεν περιέχονται εντός κεντραρισμένου δίσκου σε κάποιο κόμβο, (β) Οι κόμβοι εντός κεντραρισμένου δίσκου δεν επάγουν συνεκτικό υπογράφημα [20].

7.5 Χρονικά δυναμικών περιβαλλόντων ανίχνευσης

Στους αλγορίθμους που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες ένας τρόπος ποιοτικής αναπαράστασης περιοχών πεδίων συντελούνταν βάση μιας τιμής κατωφλιού (threshold). Δηλαδή όταν σ ένα σύνολο κόμβων του δικτύου η ανιχνευόμενη τιμή ξεπερνούσε την τιμή του κατωφλιού οι κόμβοι θεωρούνταν εντός ή εκτός της περιοχής. Μια άλλη ποιοτική αναπαράσταση περιοχών ενός πεδίου μπορεί να γίνει με τον καθορισμό των λεγόμενων *κρίσιμων σημείων* του πεδίου. Ο καθορισμός αυτός οδηγεί σε σαγματικά³² σημεία (saddle points), σημεία κορυφές (peaks) και σε σημεία βυθίσματα (pits). Για παράδειγμα σε ένα πεδίο υψομέτρων της γης μπορούν να εντοπιστούν αντίστοιχα κρίσιμα σημεία: περάσματα, βουνοκορφές, ωκεάνια βάθη. Αυτά μπορεί κανείς να τα εντοπίσει εύκολα σε έναν χάρτη ισοΐψών καμπυλών (Σχήμα 7.5β).

³² Αντίστοιχη έννοια για τα σημεία καμψής μιας συνάρτησης μίας μεταβλητής για σημεία σε δύο, τρεις ή περισσότερες διαστάσεις.



Σχήμα 7.5 Δύο ποιοτικές αναπαραστάσεις ενός συνεχούς πεδίου [20].

Βάση τέτοιου είδους ποιοτικών καθορισμών ακολούθως θα παρουσιαστεί ένας αλγόριθμος για την ανίχνευση ουσιαστών πληροφοριών σε ένα δυναμικό πεδίο. Η διαδικασία εντοπίζει τα κρίσιμα σημεία [Πρωτόκολλο 7.7] και συνακόλουθα συμβάντα που τα αφορούν συγκεκριμένα: εμφάνιση, εξαφάνιση και μετακίνηση σημείων κορυφών και βυθισμάτων [Πρωτόκολλο 7.8].

Ο εντοπισμός σημείων κορυφών και βυθισμάτων σε ένα ανιχνευόμενο πεδίο (π.χ. θερμοκρασιακό πεδίο) είναι απλός. Μια κορυφή είναι απλά ένας κόμβος που ανιχνεύει την υψηλότερη τιμή από όλους τους γείτονές του. Ομοίως ένα βύθισμα είναι ο κόμβος που ανιχνεύει τη χαμηλότερη τιμή από τους γείτονές του. Το Πρωτόκολλο 7.7 εκτελεί αυτή την εργασία ως εξής: κάθε κόμβος από την κατάσταση INIT μεταδίδει στους γείτονες του την ανιχνευόμενη τιμή του και στη συνέχεια την συγκρίνει με τις αντίστοιχες εκπομπόμενες τιμές των γειτόνων του. Κόμβοι με χαμηλότερη τιμή από όλους τους γείτονές τους μεταβαίνουν σε κατάσταση PITX, ενώ κόμβοι με μεγαλύτερη τιμή από όλους τους γείτονες μεταβαίνουν σε μια κατάσταση PEAK. Οι υπόλοιποι, μεταβαίνουν σε κατάσταση IDLE.

Πρωτόκολλο 7.7 Εντοπισμός κορυφών και βυθισμάτων σε ανιχνευόμενο πεδίο [20].

Περιορισμοί: \mathcal{NB} , $id : V \rightarrow \mathbb{N}$, $s : V \times T \rightarrow \mathbb{R}$

Συστ. Πεπ. Κατ.: $(\{INIT, IDLE, LSTN, PEAK, PITX\}, \{(INIT, LSTN), (LSTN, IDLE), (LSTN, PEAK), (LSTN, PITX)\})$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι INIT

Τοπικά δεδομένα: Peak id pk, pit id pt,

ανιχνευόμενες τιμές γειτόνων $r : N \rightarrow \mathbb{R}$, όπου $N = \{id(u) | u \in nbr\}$

INIT

Spontaneously

broadcast (ping, $\hat{s}(now)$, id) ; Ευρεία εκπομπή ανιχνευόμενης τιμής
become LSTN

LSTN

Receiving (ping, s, i)

set r(i) := s ; Αποθήκευση γειτονικής τιμής

```

if ping received from all neighbors then
  become IDLE
  if  $\max(r_*) < \hat{s}(\text{now})$  then ; Έλεγχος εάν η μέγιστη τιμή των γειτόνων είναι μικρότερη
    set rk := new non-negative peak id ; Καθορισμός ταυτότητας κορυφής
    become PEAK ;
  if  $\min(r_*) > \hat{s}(\text{now})$  then ; Έλεγχος εάν η ελάχιστη τιμή των γειτόνων είναι μεγαλύτερη
    set pt := new non-negative pit id ; Καθορισμός ταυτότητας βυθίσματος
    become PITX

```

Τα πράγματα γίνονται περισσότερο ενδιαφέροντα επεκτείνοντας το πρωτόκολλο 7.7 ώστε να εντοπίζονται συνακόλουθα συμβάντα που αφορούν τα συγκεκριμένα σημεία κορυφών και βυθισμάτων: εμφάνιση, εξαφάνιση και μετακίνηση [Πρωτόκολλο 7.8].

Το πρωτόκολλο 7.8 λειτουργεί ως εξής:

1. Όταν ένας κόμβος ανιχνεύει μια μεταβολή στην ανιχνευόμενη τιμή του (λ.χ. μια αύξηση θερμοκρασίας) μεταδίδει ένα μήνυμα upd8 με τις λεπτομέρειες της εν λόγω αλλαγής. Ένας κόμβος που λαμβάνει το μήνυμα δεν είναι πλέον κορυφή, είτε επειδή η του τιμή έχει πέσει κάτω από τις τιμές των γειτόνων του είτε επειδή η τιμή κάποιου γείτονα έχει αυξηθεί και έχει γίνει μεγαλύτερη από αυτόν. Έτσι ο κόμβος αυτός μεταβαίνει σε κατάσταση IDLE και στέλνει ένα μήνυμα peak στον αναδυόμενο γείτονα κορυφή.

2. Το μήνυμα peak εξακολουθεί να προωθείται σε μέγιστης τιμής αναδυόμενους γείτονες μέχρι να φτάσει σε έναν άλλο κόμβο PEAK. Αν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχουν ίσες τιμές στο πεδίο (δηλ. γείτονες με ίσες τιμές), το μήνυμα peak θα πρέπει αργά ή γρήγορα να φθάσει σε μία άλλη μοναδική κορυφή.

3. Ένας κόμβος που θα μεταβεί πρώτη φορά σε κατάσταση PEAK θα πρέπει να ασχοληθεί στη συνέχεια με τρεις περιπτώσεις:

- α) Αν ο νέος κόμβος PEAK έχει λάβει ακριβώς ένα μήνυμα peak, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η κορυφή έχει μετακινηθεί.
- β) Αν ο νέος κόμβος PEAK δεν έχει λάβει μηνύματα peak, τότε αποτελεί αυτό το peak αποτελεί εμφάνιση κορυφής.
- γ) Αν ο νέος κόμβος PEAK έχει λάβει πολλαπλά μηνύματα peak, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι τα πρόσθετα μηνύματα peak προέρχονται από κορυφές που έχουν εξαφανιστεί.

Πρωτόκολλο 7.8 Εντοπισμός συμβάντων εμφάνισης, εξαφάνισης και κίνησης κορυφών και βυθισμάτων σε ανιχνευόμενο πεδίο [20].

Περιορισμοί: επέκταση πρωτοκόλλου 7.7

Συστ. Πεπ. Κατ.: ((INIT, IDLE, LSTN, PEAK, PITX), ((INIT, LSTN), (LSTN, IDLE), (LSTN, PEAK), (LSTN, PITX), (PEAK, IDLE), (PITX, IDLE), (IDLE, PEAK), (IDLE, PITX)))

IDLE

When $\hat{s}(\text{now})$ changes
broadcast (upd8, $\hat{s}(\text{now})$, id)

```

if  $\max(r_*) < \hat{s}(\text{now})$  then ; έλεγχος για peak
    set  $pk := \text{new negative peak id}$  ; ταυτότητα peak
    become PEAK
if  $\min(r_*) > \hat{s}(\text{now})$  then ; έλεγχος για pit
    set  $pt := \text{new negative pit id}$  ; ταυτότητα pit
    become PITX

```

Receiving (upd8, s, i)

```

set  $r(i) := s$ 
if  $\max(r_*) < \hat{s}(\text{now})$  then ; έλεγχος για peak
    set  $pk := \text{new negative peak id}$  ; ταυτότητα peak
    become PEAK
if  $\min(r_*) > \hat{s}(\text{now})$  then ; έλεγχος για pit
    set  $pt := \text{new negative pit id}$  ; ταυτότητα pit
    become PITX

```

Receiving (peak, p)

```

send (peak, p) to neighbor i such that  $r(i) = \max(r_*)$  ; προώθηση peak στο μέγιστο γείτονα

```

Receiving (pitx, p)

```

send (pitx, p) to neighbor i such that  $r(i) = \min(r_*)$  ; προώθηση peak στο ελάχιστο γείτονα

```

PEAK

When $\hat{s}(\text{now})$ changes

```

broadcast (upd8,  $\hat{s}(\text{now})$ , id)
if  $\max(r_*) > \hat{s}(\text{now})$  then
    if  $pk < 0$  then set  $pk := -pk$  ; εμφάνιση Peak
    send (peak, pk) to neighbor i such that  $r(i) = \max(r_*)$  ; προώθηση peak στο μέγιστο γείτονα
    become IDLE

```

Receiving (upd8, s, i)

```

set  $r(i) := s$ 
if  $\max(r_*) > \hat{s}(\text{now})$  then
    if  $pk < 0$  then set  $pk := -pk$  ; εμφάνιση Peak
    send (peak, pk) to neighbor i such that  $r(i) = \max(r_*)$  ; προώθηση peak στο μέγιστο γείτονα
    become IDLE

```

Receiving (peak, p)

```

if  $pk < 0$  then
    set  $pk := p$  ; Peak p μετακίνηση
else
    No specified operation ; Peak p εξαφάνιση

```

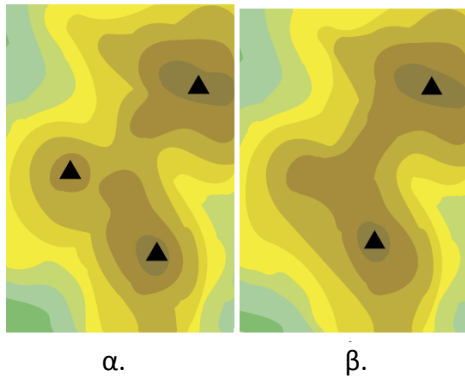
PITX

Events and actions for PITX correspond directly to PEAK state

Στις περιπτώσεις όπου έχουν ληφθεί πολλαπλά μηνύματα peak στην πραγματικότητα είναι

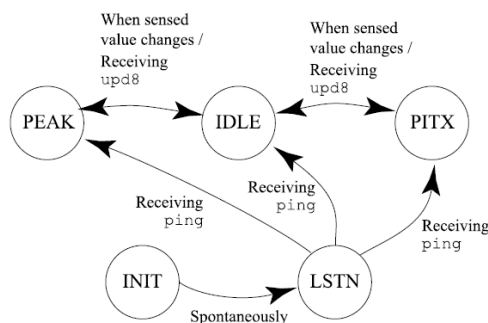
απροσδιόριστο ποια από τις κορυφές έχει μετακινηθεί και ποια έχει εξαφανιστεί. Θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει όλες τις κορυφές σαν να έχουν συγχωνευτεί ή ισοδύναμα σαν να έχουν εξαφανιστεί και νέες κορυφές να έχουν εμφανιστεί. Για παράδειγμα μια φυσική ερμηνεία της μετακίνησης από (Σχήμα. 6.9α) στο β είναι ότι η κάτω δεξιά κορυφή έχει μετακινηθεί λιγάκι, ενώ η αριστερή κορυφή έχει εξαφανιστεί. Ωστόσο και πολλές άλλες

ερμηνείες είναι δυνατές όπως ότι η κάτω δεξιά κορυφή έχει εξαφανιστεί, ενώ η αριστερή κορυφή έχει μετακινηθεί σημαντικά ή ακόμη ότι όλες οι κορυφές έχουν εξαφανιστεί και δύο νέες κορυφές έχουν εμφανιστεί.



Σχήμα 7.6 Παράδειγμα εξαφάνισης, εμφάνισης και μετακίνησης κορυφής σε δύο χρονικά βήματα (α) και (β) [20].

Το Πρωτόκολλο 7.8 χειρίζεται αυθαίρετα το πρώτο μήνυμα peak που λαμβάνει ως ένδειξη μετακίνησης (με υπόθεση ότι το πρώτο μήνυμα peak θα είναι από πρώην-κορυφή) και τα συνακόλουθα μηνύματα peak θα θεωρηθούν ενδείξεις εξαφάνισης. Για λόγους συντομίας τα συμβάντα και οι ενέργειες για την κατάσταση PITX έχουν παραληφθεί από το πρωτόκολλο 7.8 ωστόσο αντιστοιχούν άμεσα συμβάντα και δράσεις της κατάστασης PEAK. Στο Σχήμα 7.7 φαίνεται το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων για το πρωτόκολλο 7.8.



Σχήμα 7.7 Το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων του πρωτοκόλλου 7.8 [20].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα πρωτόκολλα 7.7 και 7.8 μπορούν να αποτύχουν εάν εμφανιστούν γειτονικοί κόμβοι κορυφών ή βυθισμάτων με ίσες τιμές. Στην πράξη συνήθως αυτό δεν είναι και τόσο πιθανό. Τα δεδομένα των αισθητήρων περιέχουν σπανίως πανομοιότυπες τιμές. Πανομοιότυπες τιμές συνήθως εμφανίζονται σε καταστάσεις βλαβών, δυσλειτουργίας, μη σωστής ρύθμισης, και υπέρβασης εύρος ευαισθησίας. Η υπέρβαση του ορίου ευαισθησίας επέρχεται για παράδειγμα όταν ένας αισθητήρας φωτός εσωτερικών χώρων με μέγιστη ευαισθησία 10.000 lux εκτίθενται άμεσα στο ηλιακό φως [50.000 + lux] ή κατά τη μέτρηση περιβαλλοντικών παραμέτρων με μέγιστη ή ελάχιστη τιμή (π.χ. σχετικής υγρασίας 0-100%).

7.6 Χρονικά Τοπολογικών αλλαγών περιοχών

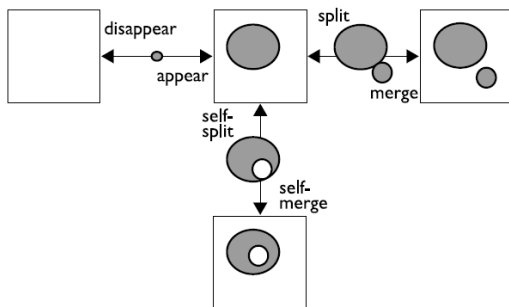
Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί ένας αλγόριθμος για την ανίχνευση τοπολογικών αλλαγών περιοχών ενός δυναμικού πεδίου. Οι περιοχές μοντελοποιούνται με την αναπαράσταση του κατωφλιού. Οι τοπολογικές αλλαγές που ανιχνεύονται αφορούν την εμφάνιση, την εξαφάνιση, την συγχώνευση και την διάσπαση των περιοχών. Ωστόσο πριν παρουσιαστεί ο αλγόριθμος θα συζητηθούν διάφορες απλουστευτικές παραδοχές που έχουν γίνει.

7.6.1 Απλουστευτικές παραδοχές

Για το σχεδιασμό του πρωτοκόλλου που παρουσιάζεται παρακάτω έχουν γίνει ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές που αφορούν το δίκτυο, τις περιοχές και τις προκείμενες αλλαγές.

Ενιαίες συμπαγείς περιοχές

Οι περιοχές θεωρούνται συμπαγή στοιχεία επιφανειακών αντικειμένων δηλ. τοπολογικά ισοδύναμα στοιχεία με έναν συμπαγή κυκλικό δίσκο. Αυτό σημαίνει ότι θεωρείται ότι τα επιφανειακά στοιχεία δεν περιέχουν τρύπες, νησίδες, τρύπες εντός νησίδων κοκ. Η θεώρηση αυτή περιορίζει τις τοπολογικές αλλαγές που δύναται να επέλθουν σε εμφάνιση, εξαφάνιση, συγχώνευση και διάσπαση περιοχών. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο [58] έχει αποδειχθεί ότι οι τοπολογικές αλλαγές που μπορεί να υφίσταται ένα σύνθετο επιφανειακό αντικείμενο (δηλ. που περιέχει νήσους, τρύπες κοκ) μπορούν να αναλυθούν σε έναν συνδυασμό 6 τύπων ατομικών τοπολογικών αλλαγών περιοχών (δηλ. τύποι τοπολογικών αλλαγών που δεν μπορούν να διασπαστούν περαιτέρω): οι 4 προαναφερόμενοι τύποι και η αυτοσυγχώνευση (self-merge) και αυτοδιάσπαση (self-split), όπου στην πρώτη μια περιοχή αποκτά μια τρύπα και στην δεύτερη χάνει μια τρύπα (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.8 6 Ατομικοί τύποι τοπολογικών αλλαγών που δύναται να αφορούν εν γένει περίπλοκα επιφανειακά αντικείμενα (εμφάνιση, εξαφάνιση, συγχώνευση, διάσπαση, αυτοσυγχώνευση, αυτοδιάσπαση) [20].

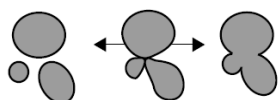
Αρχικοποίηση σε χώρο κενού περιοχών

Η δεύτερη παραδοχή υποθέτει ότι η έναρξη της διαδικασίας ανίχνευσης τοπολογικών αλλαγών περιοχών γίνεται σε έναν χώρο κενού περιοχών δηλ. όλοι οι αισθητήρες ανιχνεύουν στην αρχή $s(u)=0$. Αυτό απλοποιεί την λειτουργία του αλγορίθμου. Έτσι οι περιοχές πρέπει πρώτα να εμφανιστούν πριν υποστούν οποιοσδήποτε άλλες τοπολογικές αλλαγές. Αυτό απλοποιεί την υλοποίηση της αρχικής κατάστασης του πρωτοκόλλου. Οι

κόμβοι στην αρχική κατάσταση δεν χρειάζεται να ανακαλύψουν όρια ή να εντοπίσουν περιοχές.

Συνάντηση και διάσπαση μόνο ζευγών περιοχών

Αυτή η παραδοχή αποκλείει την ύπαρξη εμπλοκής περισσότερων από δύο περιοχών σε συγχώνευση ή διάσπαση στις τοπολογικές αλλαγές (Σχήμα 7.9).



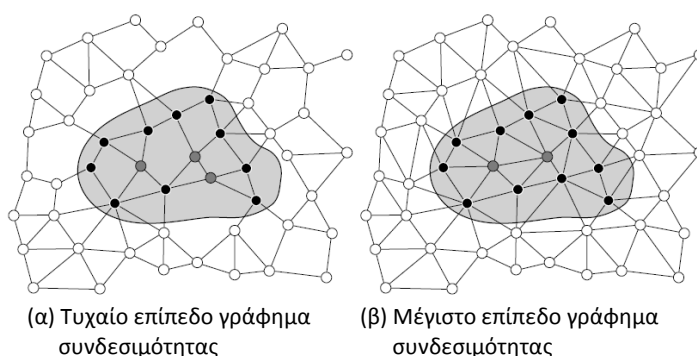
Σχήμα 7.9 Το πρωτόκολλο θεωρεί ότι δεν επέρχονται περιστάσεις όπου εμπλέκονται σε τοπολογικές αλλαγές συγχώνευσης ή διάσπαση περισσότερα από δύο στοιχεία. Οι εικονιζόμενες καταστάσεις –συγχώνευση τριών στοιχείων θεωρούνται ανεπίτρεπτες [20].

Περιοχές εντός ορίων του δικτύου

Οι ανιχνευόμενες περιοχές θεωρούνται ότι βρίσκονται εξολοκλήρου εντός των ορίων του δικτύου αισθητήρων.

Μέγιστο επίπεδο γράφημα συνδεσιμότητας

Το γράφημα συνδεσιμότητας θεωρείται επίπεδο και μέγιστο (τριγωνισμός). Εκ πρώτης όψεως αυτό μπορεί να φαντάζει αινιγματικό, ωστόσο ο περιορισμός αυτός είναι απλώς για το λόγο ότι έτσι γίνεται πιο συνοπτική η δρομολόγηση γύρω από ένα όριο περιοχής. Ένα μέγιστο επίπεδο γράφημα συνδεσιμότητας ουσιαστικά εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος στο όριο του κύκλου που περικλείει μια περιοχή έχει δύο γείτονες κόμβους ορίου (Σχήμα 7.10).

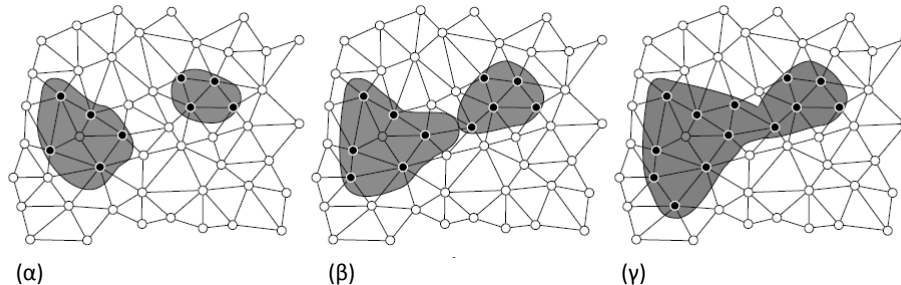


Σχήμα 7.10 Στο (β) το μέγιστο επίπεδο γράφημα συνδεσιμότητας, ο κύκλος ορίου περιέχει μόνο κόμβους ορίου (μαύροι κόμβοι), ενώ σε ένα τυχαίο επίπεδο γράφημα συνδεσιμότητας δύναται να περιέχει και κόμβους μη ορίου (γκρι κόμβοι) [20].

Σταδιακές αλλαγές

Σε αυτήν την τελευταία παραδοχή θεωρείται ότι οι αλλαγές επέρχονται σταδιακά στους κόμβους. Αυτό σημαίνει ότι κάθε στιγμή ένας μόνο κόμβος ανιχνεύει κάποια αλλαγή τιμής.

Με άλλα λόγια η χρονική ανάλυση (temporal granularity) του συστήματος είναι αρκετά καλά ώστε να συλλαμβάνει την εξέλιξη των αλλαγών που επέρχονται. Στο σχήμα εικονίζεται αυτή η παραδοχή «σταδιακής ανίχνευσης» κατά τη συγχώνευση δύο περιοχών (Σχήμα 7.11).



Σχήμα 7.11 Παράδειγμα σταδιακής ανίχνευσης αλλαγών δυναμικού πεδίου. Η σειρά καταστάσεων α,β,γ αφορά σταδιακές αλλαγές ανιχνευόμενες από έναν κόμβο κάθε φορά, ενώ η σειρά α, γ δεν είναι [20].

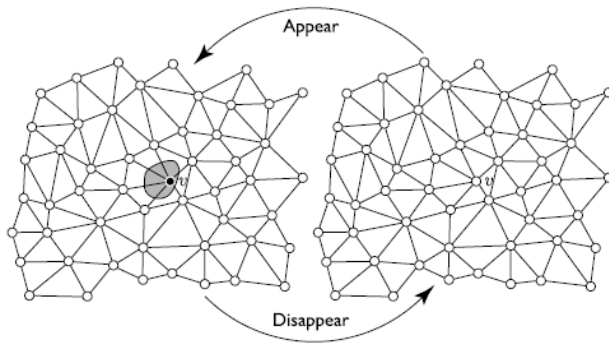
7.6.2 Πρωτόκολλο ανίχνευσης τοπολογικών αλλαγών

Συνοπτικά οι περιορισμοί που καθορίζονται για το πρωτόκολλο 7.9 είναι οι εξής:

- κάθε περιοχή θεωρείται συμπαγής (δηλ. δίχως τρύπες),
- το σύνολο των περιοχών αρχικά είναι κενό δηλ. $s(u)=0$ για κάθε $u \in V$,
- το πολύ δύο περιοχές συμμετέχουν σε οποιαδήποτε τοπολογική αλλαγή ανά πάσα στιγμή,
- οι περιοχές παραμένουν εντός της χωρικής έκτασης του δικτύου,
- το γράφημα συνδεσιμότητας G είναι ένα μέγιστο επίπεδο γράφημα,
- οι αλλαγές στο δυναμικό πεδίο είναι σταδιακά ανιχνευόμενες με την έννοια ότι ένας και μόνο αισθητήρας αλλάζει ανιχνευόμενη τιμή σε κάθε χρονική στιγμή κατά την εξέλιξη του φαινομένου.

Βάση αυτών των παραδοχών είναι εύκολο να εξηγηθεί διαισθητικά η λειτουργία του πρωτοκόλλου. Τα συμβάντα εμφάνισης, εξαφάνισης, συγχώνευσης και διάσπασης μπορούν εύκολα να ανιχνευθούν σε *τοπικό επίπεδο* δηλ. για έναν κόμβο και την άμεση γειτονιά του (one-hop neighbors). Σημαντικοί σε αυτή τη διαδικασία σε χρόνο t είναι οι κόμβοι που έχουν υποστεί την αλλαγή τιμής (δηλ. από $s(u,t-1)=0$ σε $s(u,t)=1$ ή από $s(u,t-1)=1$ σε $s(u,t)=0$). Αυτοί οι κόμβοι καλούνται *ενεργοί κόμβοι* στο χρόνο t . Υποθέτοντας συνάρτηση αισθητήρα της μορφής $s: V \times T \rightarrow \{0, 1\}$ οι τοπολογικές αλλαγές ανιχνεύονται ως εξής:

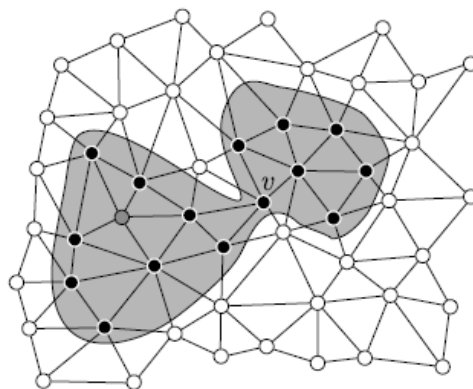
1. Μια περιοχή εμφανίζεται εάν ένας ενεργός κόμβος u με $s(u,t)=1$ έχει γείτονες που όλοι βρίσκονται εκτός της περιοχής δηλ. $s(u',t)=0$ για κάθε $u' \in nbr(u)$. Αντιστρόφως, μια περιοχή εξαφανίζεται εάν ένας ενεργός κόμβος u με $s(u,t)=0$ έχει γείτονες που βρίσκονται εκτός της περιοχής δηλ. $s(u',t)=0$ για κάθε $u' \in nbr(u)$. Το σχήμα 7.12 απεικονίζει την εμφάνιση και την εξαφάνιση μιας περιοχής βάση αυτού του τοπικού προσδιορισμού.



Σχήμα 7.12 Ένας ενεργός κόμβος u περιτριγυρισμένος από γείτονες εκτός της περιοχής μπορεί να ανιχνεύσει την εμφάνιση ή την εξαφάνιση (τοπικά) μιας περιοχής [20].

2. Μια περιοχή συγχωνεύεται ή διασπάται σε ένα «σημείο στένωσης»: έναν κόμβο που η αφαίρεση του θα είχε ως αποτέλεσμα δύο ξεχωριστές περιοχές. Σημεία στένωσης μπορούν να εντοπιστούν όπως φαίνεται στο σχήμα χρησιμοποιώντας την κυκλική διάταξη γύρω από έναν κόμβο (Σχήμα 7.13)

Τυπικά, εάν για έναν κόμβο u ισχύει $|\{ n \in \text{nbr}(u) : d(n)=0 \text{ και } d(\text{cyc}(n))=1 \}|=2$ τότε ο κόμβος είναι ένα «σημείο στένωσης». Σε αυτό το σημείο οι παραδοχές ότι η κάθε περιοχή δεν έχει τρύπες και ότι το πολύ δύο περιοχές συμμετέχουν σε οποιαδήποτε τοπολογική αλλαγή εξασφαλίζουν την ισχύ του συγκεκριμένου κανόνα.



Σχήμα 7.13 Η αφαίρεση ενός σημείου στένωσης u έχει ως αποτέλεσμα δύο ξεχωριστές περιοχές

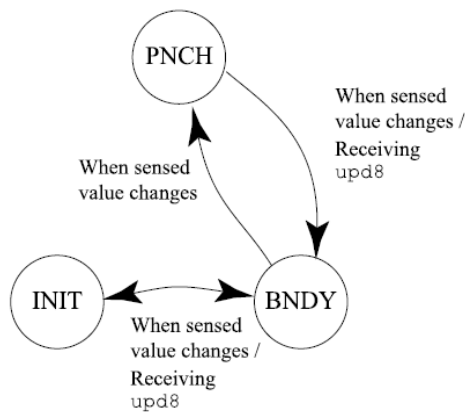
Βάση των παραπάνω ο αλγόριθμος προχωρά με τον ακόλουθο απλό τρόπο:

- Οι κόμβοι που ανιχνεύουν μια αλλαγή τιμής (δηλ. οι ενεργοί κόμβοι) πληροφορούν τους γείτονές τους με ένα μήνυμα $upd\delta$. Οι γείτονες με τη σειρά τους κατά τη λήψη αυτής της πληροφορίας αποθηκεύουν την αλλαγή στα τοπικά τους δεδομένα d .
- Αν ένας ενεργός κόμβος u δεν έχει γείτονες με τιμές εντός της περιοχής τότε έχει ανιχνεύσει είτε την εμφάνιση είτε την εξαφάνιση μιας περιοχής ανάλογα εάν $s(u, now) = 1$ ή $s(u, now) = 0$.
- Ένας ενεργός κόμβος που αποκαλύπτει ότι είναι σημείο στένωσης έχει ανιχνεύσει την συγχώνευση δύο περιοχών. Αυτό το σημείο στένωσης δημιουργεί έναν νέο μοναδικό

προσδιοριστή της συγχωνευθείσας περιοχής. Η συνάρτηση $u: \mathbb{N} \times T \rightarrow \mathbb{N}$ αφορά τη δημιουργία μοναδικών αναγνωριστικών νέων περιοχών. Αν και δεν καθορίζεται ρητά αυτή η λειτουργία, υποτίθεται ότι συνδυάζεται το (μοναδικό) αναγνωριστικό του κόμβου με την τρέχουσα χρονική σήμανση (timestamp) *now* ώστε να μην υπάρχουν διπλότυπα (δεδομένου ότι σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ένας μόνο συγκεκριμένος κόμβος είναι υπεύθυνος για μια νέα περιοχή, π.χ. $u(n,t) \rightarrow n*|T| + t$). Ο κόμβος σημείου στένωσης έπειτα ενημερώνει όλους τους άλλους κόμβους ορίου της νέας περιοχής με αυτό το νέο αναγνωριστικό μέσω ενός μήνυμα *regh*, δρομολογώντας το γύρω από το όριο.

- Ένας μη ενεργός κόμβος που ανιχνεύει ότι είναι σημείο στένωσης με τη λήψη ενός μηνύματος *upd8* μεταβαίνει σε κατάσταση PNCH. Αν αυτός κόμβος *u* ακολούθως γίνει ενεργός τότε έχει ανιχνεύσει τη διάσπαση μιας περιοχής. Τότε ενημερώνει τα δύο στοιχεία περιοχών με νέα μοναδικά αναγνωριστικά, χρησιμοποιώντας και πάλι το μηχανισμό του μηνύματος *regh*.

Στο σχήμα 7.14 φαίνεται το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων και ακολούθως ο καθορισμός του πρωτοκόλλου.



Σχήμα 7.14 Το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων του πρωτοκόλλου 7.9 [20].

Πρωτόκολλο 7.9 Ανίχνευση τοπολογικών αλλαγών περιοχών [20].

Περιορισμοί: Συνεκτικό γράφημα $G = (V, E)$, $s: V \times T \rightarrow \{0,1\}$, $id: V \rightarrow \mathbb{N}$, κυκλική διάταξη $cyc: E' \rightarrow id_*$, όπου $E' = \{(u, id(u')) | (u, u' \in E), nbr: V \rightarrow \mathbb{N}$, όπου $nbr(u) \mapsto \{id(u') | \{u, u'\} \in E\}$, συνάρτηση αναγνωριστικού νέας περιοχής $u: \mathbb{N} \times T \rightarrow \mathbb{N}$, επιπλέον οι παραδοχές που αναφέρθηκαν στην ενότητα.

Συστ. Πεπ. Κατ.: $\{(IDLE, BNDY, PNCH), \{(IDLE, BNDY), (BNDY, IDLE), (BNDY, PNCH), (PNCH, BNDY)\}\}$

Αρχικοποίηση: Όλοι οι κόμβοι IDLE

Τοπικά δεδομένα: $d: id(nbr) \rightarrow \{0,1\}$, $d(i) := 0$, αναγνωριστικό περιοχής id $rid \in \mathbb{N}$, $rid := 0$

IDLE

When $\hat{s}(now)$ changes

broadcast (*upd8*, *id*, $\hat{s}(now)$) ; *Ευρεία εκπομπή id και τιμής*

if $d(n) = 0$ for all $n \in nbr$ **then**

set $rid := u(id, now)$; *Αναφορά εμφάνισης περιοχής rid*

```

else
  if  $|\{n \in \text{nbr} \mid d(n) = 0 \text{ and } d(\text{cyc}(n)) = 1\}| = 1$  then
    send (ident, id) to node with identifier  $i \in I$ 
  else
    set rid := u(id, now)
    send (regn, rid) to nodes with identifiers  $i \in I$  ; Αναφορά συγχώνευσης περιοχής

```

become BNDY

Receiving (upd8, i, s)

set $d(i) := s$

```

if  $\dot{s} = 1$  then ; όχι δυνατόν για μη ενεργούς κόμβους
  send (idnt, id) to node(s) with identifier(s)  $i \in \{n \in \text{nbr} \mid d(n) = 0 \text{ and } d(\text{cyc}(n)) = 1\}$ 
  become BNDY

```

PNCH

When $\dot{s}(\text{now})$ changes

```

broadcast (upd8, id,  $\dot{s}(\text{now})$ ) ; Ευρεία εκπομπή τιμής και id
become IDLE ; Αναφορά διάσπασης περιοχής r
for all  $i \in \{n \in \text{nbr} \mid d(n) = 0 \text{ and } d(\text{cyc}(n)) = 1\}$  do
  send (regn, u(cyc(i), now), id) to node with identifier cyc(i)

```

BNDY

When $\dot{s}(\text{now})$ changes

```

broadcast (upd8, id,  $\dot{s}(\text{now})$ )
if  $d(i) = 0$  for all  $i \in \text{nbr}$  then
  Report region rid disappeared
set rid = 0
become IDLE

```

Receiving (idnt, i)

send (regn, rid, id) to node with id i

Receiving (regn, r, i)

```

if  $r \neq \text{rid}$  then
  set rid := r
  while  $\neg (d(i) \neq 0 \text{ or } d(\text{cyc}(i)) \neq 1)$  do
    set  $i := \text{cyc}(i)$ 
  send (regn, r, id) to node with id cyc(i)

```

PNCH, BNDY

Receiving (upd8, i, s)

set $d(i) := s$

let $I := \{n \in \text{nbr} \mid d(n) = 0 \text{ and } d(\text{cyc}(n)) = 1\}$

if $|I| = 0$ then become IDLE ; Boundary node now in region interior

if $|I| = 1$ then become BNDY ; Pinch point now in region interior

if $|I| = 2$ then become PNCH ; Boundary node now pinch point

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται νύξη σε διάφορα ενδιαφέροντα θέματα που αφορούν τα δίκτυα γεωαισθητήρων καθώς και περιλαμβάνονται τα τελικά συμπεράσματα από την εκπόνηση αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

8.1 Προσομοίωση

Προσομοίωση (simulation) είναι η μίμηση της λειτουργίας διαδικασιών ή συστημάτων συνήθως με τη βοήθεια υπολογιστή. Διαδικασία ή σύστημα θεωρείται ένα σύνολο στοιχείων τα οποία εξελίσσονται και αλληλεπιδρούν σύμφωνα με κάποιους καθορισμένους κανόνες. Οι κανόνες αυτοί εκφράζονται με μαθηματικές ή λογικές σχέσεις, και αποτελούν το μοντέλο του συστήματος [54].

Η προσομοίωση σε σχέση με τη σύνθεση ενός πραγματικού συστήματος και θέση του σε λειτουργία μπορεί να είναι οικονομικότερη, ταχύτερη, και λιγότερο επικίνδυνη ή περισσότερο προσιτή από την πραγματική διεργασία.

Η προσομοίωση ενός δικτύου γεωαισθητήρων παρέχει πολλαπλά οφέλη κατά το σχεδιασμό και την αξιολόγηση ενός συστήματος. Από ερευνητική σκοπιά σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης μπορούν να αναπτυχθούν ή να επεκταθούν και να αξιολογηθούν πρωτόκολλα που η εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες θα ήταν απαγορευτική από πλευράς κόστους αλλά και ίσως ανούσια. Οι τεχνολογίες προοδεύουν και για πολλές διαδικασίες πολλές φορές δεν έχει νόημα κάποια πραγματική υλοποίηση αλλά μια εικονική εφαρμογή αρκεί. Η προσομοίωση καθώς συντελείται με κατάλληλο αφαιρετικό τρόπο επιτρέπει την εστίαση στα χαρακτηριστικά ή σε υποκείμενες διαδικασίες που ενδιαφέρουν π.χ. στην προσομοίωση επεξεργασιών χωρικών πληροφοριών σε ένα δίκτυο γεωαισθητήρων όπως αυτών που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, μπορούν να αγνοούνται οι διάφορες υποκείμενες τεχνολογίες των κόμβων και να εστιάζεται κατ' εξοχήν στο υπολογιστικό κομμάτι των επεξεργασιών της χωρικής πληροφορίας.

Κατά την προσομοίωση ενός δικτύου γεωαισθητήρων μπορούν να διενεργηθούν αναλύσεις και εξερευνητικοί πειραματισμοί που αφορούν διάφορες διαστάσεις του συστήματος. Οι αναλύσεις μπορούν να αφορούν για παράδειγμα το επικοινωνιακό κόστους, την καλύτερη, μέση και χειρότερη περίπτωση εφαρμογής των πρωτοκόλλων, ελέγχους υποθέσεων, εξισορρόπηση φορτίου (load balance), ευρωστία αλγορίθμων κ.α..

Για την προσομοίωση συστημάτων δικτύων αισθητήρων μπορεί κανείς να επιλέξει διάφορα περιβάλλοντα που είναι διαθέσιμα. Μεταξύ αυτών είναι: ns-2, TOSSIM, OMNeT + +, OPNET, jist / ΚΥΚΝΟΙ, GloMoSim, MATLAB / Simulink [20] κ.α.. Πολλά από αυτά είναι αρκετά πολύπλοκα καθώς επικεντρώνονται σε μεγάλο βαθμό σε τεχνικές λεπτομέρειες π.χ. παρέχουν εργαλεία και απαιτούν την μοντελοποίηση στο φυσικό επίπεδο δηλ. τη μοντελοποίηση του υλικού και της ζεύξης των δεδομένων κοκ.. Ένα περιβάλλον προσομοίωσης όπου κανείς μπορεί με εύκολο τρόπο και σε ύψιστο επίπεδο αφαίρεσης να

προσομοιώσει διαδικασίες που αφορούν ένα δίκτυο αισθητήρων είναι το Netlogo [20]. Αυτό θα ενδιέφερε στα πλαίσια αυτής της εργασίας για την προσομοίωση διαδικασιών επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών, δηλ. την διενέργεια προσομοιώσεων μακριά από λεπτομέρειες που δεν ενδιαφέρουν. Ακολούθως το περιβάλλον του Netlogo παρουσιάζεται αναλυτικότερα.

8.1.1 NetLogo

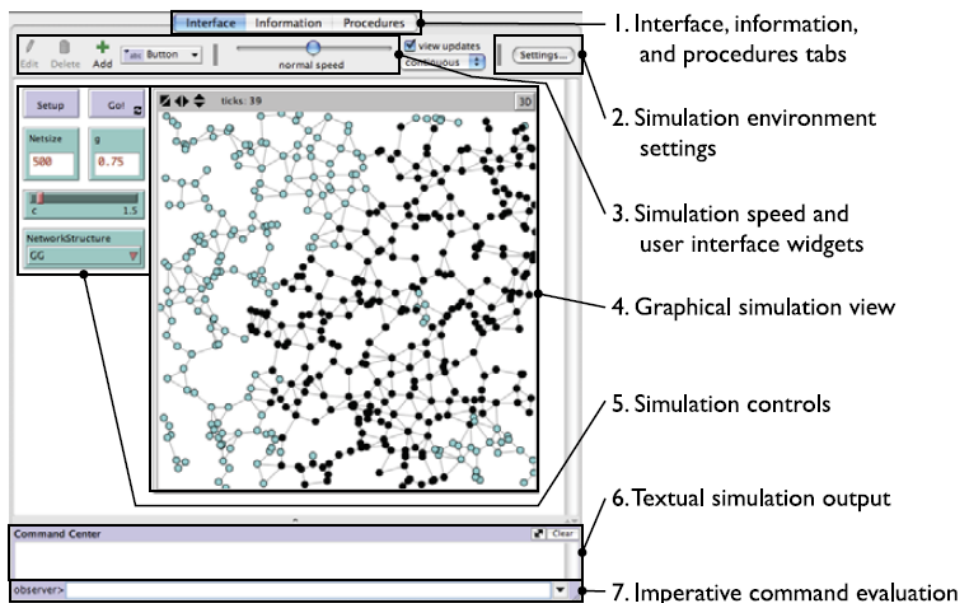
Το NetLogo είναι ένα πλατειά διαδεδομένο περιβάλλον προσομοίωσης. Το NetLogo διατίθεται δωρεάν και είναι ανοιχτού κώδικα. Το NetLogo είναι καλά τεκμηριωμένο (βλ. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>).

Στο περιβάλλον του NetLogo, μπορεί κανείς εύκολα και σε ύψιστο επίπεδο αφαίρεσης να καθορίσει αλγοριθμικά στο πώς συμπεριφέρεται και αλληλεπιδρά ένα σύστημα με το περιβάλλον του.

Το NetLogo βασίζεται στον καθορισμό λογισμικών πρακτόρων (agent-based system). Ένας πράκτορας είναι ουσιαστικά ένα αυτόνομο κομμάτι κώδικα ικανό να ενεργεί και να αλληλεπιδρά με ένα περιβάλλον στο οποίο δύναται να έχουν καθοριστεί να αλληλεπιδρούν και άλλοι λογισμικοί πράκτορες. Έτσι προσομοιώνεται μια διαδικασία ή σύστημα, ως ένα σύνολο αλληλεπιδρώντων «πρακτόρων».

Το σύστημα αυτό είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την μοντελοποίηση διαδικασιών επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών που αφορούν ένα δίκτυο γεωαισθητήρων. Αυτό διότι υπάρχει μια άμεση αντιστοιχία μεταξύ κόμβων δικτύου και των πρακτόρων καθώς και του γεωγραφικού περιβάλλοντος με το περιβάλλον 'διασύνδεσης' των πρακτόρων.

Στο σχήμα 8.1 συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία του συστήματος τα οποία είναι τα εξής:



Σχήμα 8.1 Τα 7 πιο σημαντικά στοιχεία του NetLogo [20].

(Εξηγώντας τα βασικά χαρακτηριστικά του NetLogo γίνεται διάκριση ανάμεσα στο μοντέλο προσομοίωσης (την υλοποίηση ενός συγκεκριμένου αλγορίθμου στο σύστημα προσομοίωσης NetLogo) και την συγκεκριμένη εκτέλεση της προσομοίωσης).

1. **Καρτέλες (tabs):** Σε σχετικές καρτέλες στο πάνω μέρος του NetLogo παρέχονται τρεις βασικές επιλογές οθόνων: η 'διεπαφή' – όπου φαίνεται το περιβάλλον προσομοίωσης, η 'πληροφορία' – όπου περιλαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο προσομοίωσης όπως όνομα πρωτοκόλλου, μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας κοκ, και οι 'διαδικασίες' – η οθόνη συγγραφής κώδικα που αφορά την προσομοίωση.
2. **Ρυθμίσεις περιβάλλοντος προσομοίωσης (Simulation environment settings):** Εδώ παρέχονται δυνατότητες ρύθμισης διαφόρων καθολικών παραμέτρων για το σύστημα όπως, οι διαστάσεις και το σχήμα του κόσμου προσομοίωσης (ορθογώνιος, επίπεδος, κυλινδρικός κόσμος κοκ).
3. **Ταχύτητα προσομοίωσης και στοιχεία διεπαφής χρήστη (Simulation speed and user interface widgets):** Εδώ ρυθμίζεται η ταχύτητα με την οποία εκτελείται μια προσομοίωση. Αυτή μπορεί να μεταβάλλεται από το χρήστη καταλλήλως κατά τη διάρκεια ενός πειράματος προσομοίωσης. Περαιτέρω στοιχεία διεπαφής χρήστη όπως κουμπιά, πλαίσια κειμένου και άλλα μπορούν να προσαρτώνται στο σύστημα.
4. **Γραφική όψη προσομοίωσης (graphical simulation view):** Εδώ απεικονίζεται σε γραφική μορφή ο κόσμος της προσομοίωσης.
5. **Έλεγχος προσομοίωση (Simulation controls):** Εδώ τοποθετούνται κουμπιά ή/και άλλα στοιχεία για την έναρξη και λειτουργία μιας προσομοίωσης, όπως πλαίσια κειμένου για εισαγωγή παραμέτρων, sliders κοκ.
6. **Παράθυρο εξόδου (Textual simulation output):** Περιστασιακά σε αυτό το χώρο μπορούν να εμφανίζονται διάφορες πληροφορίες κατά το χρόνο της εκτέλεσης όπως έχουν καθοριστεί στον κώδικα για διάφορους λόγους εποπτείας της εκτέλεσης.
7. **Επιτακτική εκτέλεση εντολών (Imperative command evaluation):** Εδώ μπορεί να υποβάλει κανείς εντολές στο σύστημα NetLogo. Οι εντολές αυτές εκτελούνται άμεσα. Είναι εξαιρετικά χρήσιμο κατά την αποσφαλμάτωση και διερεύνηση των προσομοιώσεων.

Συγγραφή διαδικασιών προσομοίωσης στο NetLogo

Ένα παράδειγμα κώδικα προσομοίωσης NetLogo για το πρωτόκολλο gossiping φαίνεται στο Σχήμα 8.2. Για την πλήρη ανάλυση της γλώσσας NetLogo μπορεί να ανατρέξει κανείς στο [46].

```
;; Εκτέλεση ενός βήματος προσομοίωσης από κάθε κόμβο

to go
  ask motes [ step ]
  tick
end

;;
;; Πρωτόκολλο gossiping
;;

;; Ροή ελέγχου πρωτοκόλλου βάση τρέχουσας κατάστασης
to step
  if state = "INIT" [ step_INIT stop ]
  if state = "IDLE" [ step_IDLE stop ]
```

```

    if state = "DONE" [ step_DONE stop ]
end

;; Ευρεία εκπομπή (προς όλους του γείτονες) και μετάβαση στην κατάσταση DONE
to step_INIT
  broadcast ["MSGE"]
  become "DONE"
end

;; Όταν ένα κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα αποφασίζει πιθακρατικά εάν πρόκειται
να το προωθήσει
;; πιθανότητα g.
to step_IDLE
  if has-message "MSGE" [ ;; χειρισμός συμβάντος λήψης μηνύματος
    let msg received "MSGE" ;;
    become "DONE"
    let r random-float 1 ;; Δημιουργία τυχαίου αριθμού στο διάστημα [0,1]
    if r < g [ ;; Αναμετάδοση μηνύματος MSGE με πιθανότητα g
      broadcast ["MSGE"] ]
    stop
  ]
end

;; Η κατάσταση DONE δεν περιλαμβάνει χειρισμούς συμβάντων μήτε δράσει
to step_DONE
end

```

Σχήμα 8.2 Ενδεικτικός κώδικας προσομοίωσης στο περιβάλλον του Netlogo [20].

Τα βασικά στοιχεία του κώδικα είναι τα εξής:

- Η διαδικασία "go" προκαλεί την εκτέλεση ενός βήματος προσομοίωσης από κάθε κόμβο προσομοίωσης (κόμβο αισθητήρα). Ενώ σε ένα πραγματικό δίκτυο αισθητήρων οι κόμβοι λειτουργούν παράλληλα, στη προσομοίωση των διαδικασιών στο NetLogo συντελείται σειριακή εκτέλεση. Κάθε κόμβος λαμβάνει θέση εκτέλεσης με μια σειρά. Η σειρά είναι αυθαίρετη και διαφέρει κάθε φορά.
- Η διαδικασία "step" καθορίζει τη ροή ελέγχου της προσομοίωσης βάση της τρέχουσας κατάστασης.
- Οι διαδικασίες step_INIT, step_IDLE και step_DONE αφορούν το χειρισμό των συμβάντων για κάθε κατάσταση.
- Η διαδικασία step_INIT εκκινείται αυτόματα (spontaneously) εκπέμποντας ένα μήνυμα (MSGE) προς όλους και γίνεται μετάβαση στη κατάσταση DONE.
- Η διαδικασία step_IDLE ορίζει μια δράση, για χειρισμό του συμβάντος λήψης μηνύματος MSGE.
- Η διαδικασία step_DONE δεν περιέχει συμβάντα μήτε δράσεις, πέρα από την αλλαγή του χρώματος του κόμβου σε μαύρο.

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας δεν διερευνάται περαιτέρω το θέμα της προσομοίωσης ενός δικτύου γεωαισθητήρων. Ο σκοπός αυτής της ενότητας ήταν απλά η κοινοποίηση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος, ώστε να παροτρύνει την χρήση και εφαρμογή του σε άλλες εργασίες.

8.2 Μοντέλα ερωτημάτων

Στα συστήματα δικτύων αισθητήρων η διατύπωση και η εκτέλεση ερωτημάτων στο πληροφοριακό σύστημα ουσιαστικά διαφέρει από τα παραδοσιακά συστήματα. Για αυτό το λόγο κατά την ανάπτυξη αλγορίθμων ίσως συχνά έχει νόημα σε ένα πρώτο στάδιο να διαχωρίζονται οι αλγόριθμοι σε *αλγόριθμους διατήρησης των πληροφοριών* που αφορούν τις αλλαγές της κατάστασης του περιβάλλοντος και σε *αλγόριθμους ανάκτησης και επεξεργασίας ερωτημάτων* των εν λόγω πληροφοριών.

Ένας λόγος για αυτό είναι ότι σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα χωρικών πληροφοριών, όπως ένα δίκτυο γεωαισθητήρων, συχνά δεν υπάρχει ενιαίο μοντέλο για τη χρήση των πληροφοριών [20]. Αυτό γίνεται κατανοητό από τα πολλαπλά σενάρια χρήσης που μπορούν να αφορούν ένα δίκτυο αισθητήρων. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο αισθητήρων που εφαρμόζεται ως ένα σύστημα προειδοποίησης δασικών πυρκαγιών δύναται να περιλαμβάνονται τα ακόλουθα σενάρια [20]:

- Ένας διοικητής υποβάλλει ερωτήματα (queries) στο δίκτυο αισθητήρων από μια απομακρυσμένη θέση π.χ. για πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή παρακολούθησης κ.α..
- Ένας πυροσβέστης που βρίσκεται στην περιοχή παρακολούθησης αιτεί πληροφορίες σχετικά με την υγρασία του περιβάλλοντος στην άμεση γειτονία του.
- Ένα απομακρυσμένο σύστημα μοντελοποίησης πυρκαγιών αιτεί πληροφορίες σχετικά με τις θερμοκρασίες της περιοχής παρακολούθησης για να συνδυαστούν με άλλα δεδομένα όπως καιρικές συνθήκες, χάρτες για σκοπούς προσομοίωσης.
- Μια ψηφιακή βιντεοκάμερα που βρίσκεται στην περιοχή παρακολούθησης αιτεί πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές συνθήκες προκειμένου να εκκινήθει βιντεοσκόπηση σε περιπτώσεις μη τυπικών τιμών παρατήρησης κ.α..

Τα παραπάνω σενάρια δείχνουν ότι τα ερωτήματα μπορεί να είναι είτε απομακρυσμένης είτε τοπικής (εντός δικτύου) προέλευσης, να προέρχονται από ανθρώπους-χρήστες ή από άλλα συστήματα πληροφοριών καθώς και συσκευές. Και η κατάσταση περιπλέκεται ακόμα περισσότερο. Από τα παραπάνω σενάρια γίνεται αντιληπτό και μάλλον αυτονόητο ότι η οντότητα που αιτεί το ερώτημα είναι επίσης και η οντότητα που απαιτεί την απάντηση. Ωστόσο μπορεί κανείς να διανοηθεί καταστάσεις όπου το ερώτημα μπορεί να έχει διαφορετική οντότητα προέλευσης και διαφορετικό προορισμό δηλ. οι απαντήσεις να πρέπει να παραδίδονται αλλού π.χ. σε ένα σύστημα αντλιών πυρόσβεσης κ.α..

Περαιτέρω, τα είδη των ερωτημάτων που υποβάλλονται σε αυτά τα παραδείγματα θα μπορούσε να ενταχθούν σε δύο διαφορετικές κατηγορίες [47]:

- **ερωτήματα έλξης (pull queries):** σε ένα ερώτημα έλξης απαιτείται μια άμεση απάντηση που αφορά την τρέχουσα ή παρελθοντικές καταστάσεις του περιβάλλοντος παρατήρησης. Για παράδειγμα ο διοικητής πυροσβεστικής της περιοχής θα μπορούσε να υποβάλει το εξής ερώτημα: «Δείξε μου σε ένα χάρτη τις τρέχουσες ταχύτητες ανέμου». Εναλλακτικά, ένας πυροσβέστης μπορεί να υποβάλει το εξής ερώτημα: «Δείξτε μου στο χάρτη, τη μέση υγρασία για την περασμένη εβδομάδα».
- **ερωτήματα πίεσης (push queries):** ένα ερώτημα πίεσης (που ονομάζεται επίσης και μακροχρόνιας εκτέλεσης – long-running query) παραμένει στο δίκτυο, ενεργό και δημιουργεί απαντήσεις βάση προκαθορισμένων συμβάντων πυροδότησης. Για παράδειγμα, ο διοικητής θα μπορούσε να έχει απαιτήσει «Δείχνε μου κάθε ώρα την

ταχύτητα του ανέμου" ή "Ειδοποίησε με εάν κάποιος κόμβος ανιχνεύσει άνεμο σε τάξη ισχυρότερο από «υψηλό άνεμο» της κλίμακας Beaufort.

Τα θέματα αυτά δεν αφορούν αποκλειστικά τα αποκεντρωμένα συστήματα χωρικών πληροφοριών. Η ισορροπία στη διατύπωση ερωτημάτων μεταξύ έλξης και πίεσης είναι ένα σημαντικό ζήτημα για παράδειγμα σε εφαρμογές υπηρεσιών θέσης (location based services) [48]. Παρ' όλα αυτά σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα χωρικών πληροφοριών, δεν υπάρχει κανένας λόγος να υποθέσει κανείς εκ των προτέρων τι τύπους ερωτημάτων απαιτούνται στο σύστημα δηλ. εάν πρόκειται για ερωτήματα έλξης ή πίεσης, προερχόμενα από ανθρώπους ή μηχανές, ή αφορούν διαφορετικές προελεύσεις και προορισμούς, απομακρυσμένους ή τοπικούς κόμβους κοκ.

Εν αντιθέσει όλες αυτές οι διαφορετικές δυνατότητες ενδέχεται να είναι σημαντικές. Κατά συνέπεια, σε γενικές γραμμές είναι λογικό να αποσυνδέονται οι μηχανισμοί για την επεξεργασία των ερωτημάτων από τους μηχανισμούς διατήρησης των πληροφοριών σχετικά με το υπό παρακολούθηση περιβάλλον.

Πέρα από αυτές τις παραπάνω προκλήσεις η έρευνα είναι ενεργή σημειώνοντας πρόοδο στον καθορισμό συνεπών γλωσσών ερωτημάτων για δίκτυα αισθητήρων σε αναλογία με τα συμβατικά συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων. Αξιοσημείωτη είναι η έννοια του «δικτύου αισθητήρων ως μια βάση δεδομένων [49]» για τον χειρισμό της πολυπλοκότητας μεγάλων και ετερογενών δικτύων αισθητήρων με την επεξεργασία των δικτύων ως "εικονικές βάσεις δεδομένων" όπου μπορούν να γίνουν ερωτήματα χρησιμοποιώντας εκτεταμένες εκδόσεις του προτύπου γλωσσών ερωτημάτων όπως η SQL. Φυσικά, εάν τα ερωτήματα που καθορίζονται πρέπει να εκτελούνται αποδοτικά, απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων διαδικασιών βάση αποκεντρωμένης προσέγγισης για την επεξεργασία των ερωτημάτων π.χ. υλοποίηση ευρετηρίων, και τελεστών ερωτημάτων.

8.3 Ρεύματα δεδομένων

Μια εναλλακτική προσέγγιση διαχείρισης δεδομένων που μπορεί να αφορά και τα δίκτυα αισθητήρων και ξεκινά από μια διαφορετική εννοιολογική βάση είναι η *επεξεργασία ρευμάτων δεδομένων*. Η *επεξεργασία ρευμάτων δεδομένων* ξεκινά από την πεποίθηση ότι τα παραδοσιακά συστήματα βάσεων δεδομένων είναι ανεπαρκή για τη διαχείριση δεδομένων για δίκτυα αισθητήρων. Σε ένα δίκτυο αισθητήρων παράγονται *συνεχώς* νέα δεδομένα, ενώ μια παραδοσιακή βάση δεδομένων ενημερώνεται συνήθως σπάνια. Τα ερωτήματα σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι συνήθως ερωτήματα πίεσης (push), ενώ στις παραδοσιακές βάσεις πρόκειται μάλλον κατά το πλείστον για ερωτήματα έλξης (pull). Περαιτέρω σε συστήματα δικτύων αισθητήρων η ετερογένεια καλπάζει. Οι διαδικασίες που γεννάν τα δεδομένα σε δίκτυα αισθητήρων υπόκεινται σε παράγοντες περιβάλλοντος, όπου τα δεδομένα μπορούν να αφορούν διαφορετικούς αισθητήρες και συστήματα δικτύων αισθητήρων, εν αντιθέσει με τις παραδοσιακές βάσεις δεδομένων που το σχήμα των δεδομένων μπορεί εύκολα να οριστεί καθώς ουσιαστικά είναι σταθερό και ακριβές.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις ουσιαστικές διαφορές για την επεξεργασία «συνεχών» και «απεριόριστων» δεδομένων από αισθητήρες απαιτείται η υλοποίηση ενός κατάλληλου πληροφοριακού συστήματος για διαχείριση και επεξεργασία ερωτημάτων, ενός συστήματος *διαχείρισης ρευμάτων δεδομένων (data stream processing system - DSMS)*.

Οι ροές δεδομένων σε ένα DSMS θεωρούνται πλειάδες με χρονική σήμανση. Η χρονική σήμανση σε κάθε πλειάδα υπονοεί το χρόνο απόκτησης των δεδομένων. Εξαιτίας όμως των προβλημάτων συγχρονισμού σε δίκτυα αισθητήρων οι χρονικές σημάνσεις δεν είναι ακριβείς. Έτσι στα DSMS σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται ο χειρισμός πολλαπλών

χρονικών σημάνσεων (timestamps) και χρονικών περιορισμών όπως ο χρονικός ρυθμός (timing) για τη διάταξη των συλλεγόμενων ρευμάτων δεδομένων, ώστε στη συνέχεια το DSMS να μπορεί να επεξεργάζεται ερωτήματα που αφορούν ερωτήματα πίεσης σε ρεύματα δεδομένων προέλευσης από ένα ή περισσότερα δίκτυα αισθητήρων. Ένα τυπικό ερώτημα πίεσης σε ρεύματα δεδομένων δικτύου αισθητήρων μπορεί να είναι το εξής: «Συνεχής αναφορά της μέσης τιμής του διαλυμένου οξυγόνου σε διάστημα μιας ώρα».

Από την όψη αυτής της εργασίας αξίζει να αναφερθεί ότι η επεξεργασία ρευμάτων δεδομένων είναι κατά κάποιον τρόπο εγγενώς περισσότερο κοντά στη συγκεντρωμένη προσέγγιση επεξεργασίας πληροφοριών. Τα ρεύματα δεδομένων είναι κατά κάποιον τρόπο συγκεντρωμένες δομές δηλ. είναι συμπλέγματα δεδομένων πραγματικού χρόνου που έχουν αποκτηθεί από ποικίλες πηγές. Έτσι η μεθοδολογία της επεξεργασίας ρευμάτων δεδομένων απέχει προς το παρόν από την αποκεντρωμένη προσέγγιση που απαιτείται στην επεξεργασία των πληροφοριών σε ένα δίκτυο αισθητήρων.

Για περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τα DSMS ο αναγνώστης παραπέμπεται στα [50, 51].

8.4 Οπτικοποίηση

Ένα τελευταίο σημαντικό ζήτημα που αφορά ιδιαίτερα τον άνθρωπο-χρήστη των δεδομένων ενός δικτύου αισθητήρων, αποτελεί η κατανόηση των δεδομένων και εξαγωγή περαιτέρω πληροφοριών από τα δεδομένα αυτά.

Στο πλαίσιο αυτό υπάρχουν περιπτώσεις που ο χρήστης δεν έχει σαφή ιδέα για το τι πληροφορίες χρειάζεται από το σύνολο των δεδομένων δηλ. δεν υφίστανται σαφείς προδιαγραφές για να ανακτήσει την απαιτούμενη πληροφορία μέσω ενός ερωτήματος (query). Στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαίος ένας μηχανισμός αλληλεπίδρασης, μέσω του οποίου θα μπορεί να εντοπίζει και να κατανοεί τα πρότυπα και τα συμβάντα που τον ενδιαφέρουν.

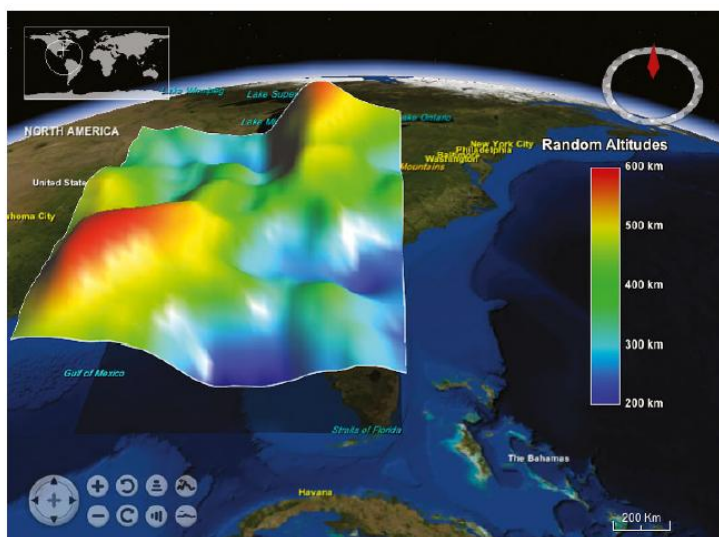
Σε αυτό το σημείο η οπτικοποίηση των χωρικών πληροφοριών (geovisualisation) μπορεί να υποστηρίξει τον άνθρωπο-χρήστη στη διαδικασία να ανακαλύψει τις πληροφορίες που τον ενδιαφέρουν.

Εάν και το αντικείμενο της οπτικοποίησης τις περισσότερες φορές εμπλέκει γραφικές διασυνδέσεις χρήστη ο σκοπός είναι πολύ βαθύτερος. Ο σκοπός της "οπτικοποίησης" γενικώς είναι να εγείρει σε "οπτική σκέψη" αλλά και να εγείρει την οπτική σκέψη ανεξάρτητα ή και συμπληρωματικά με άλλες μορφές σκέψης όπως λεκτική και λογική σκέψη. Σε αυτό το σκοπό οι τυπικοί χάρτες ως διεπαφές χωρικής πληροφορίας παίζουν ουσιαστικό ρόλο. Πράγματι βοηθούν ιδιαίτερα στη αναγνώριση χωρικών προτύπων και χωρικών διαδικασιών. Λόγου χάρη οι πυκνοκατοικημένες (αστικές) ή αραιοκατοικημένες (αγροτικές) περιοχές αναγνωρίζονται εύκολα από έναν τυπικό χάρτη που αναπαρίσταται η κατανομή του πληθυσμού, παρά από τα δεδομένα σε μορφή πίνακα της αντίστοιχης κατανομής. Ωστόσο οι αναπαραστάσεις αυτές μήτε ενδείκνυνται μήτε επαρκούν για την απεικόνιση και διερεύνηση δεδομένων που συλλέγονται από ένα δίκτυο αισθητήρων για τους εξής δύο λόγους [20]:

- οι τυπικοί χάρτες αποτελούν στατικές αναπαραστάσεις, ενώ τα δεδομένα του αισθητήρα είναι ιδιαίτερα υψηλής δυναμικής φύσεως,
- οι τυπικοί χάρτες αποτελούν απλές αναπαραστάσεις χωρικών δεδομένων και παρουσιάζουν περιορισμένες δυνατότητες για αλληλεπίδραση προς εξερεύνηση των

δεδομένων.

Γι' αυτούς τους λόγους η έρευνα κατά την τελευταία δεκαετία έχει επικεντρωθεί στην κατασκευή εξειδικευμένων χωρικών αναπαραστάσεων και διεπαφών με αυξημένες δυνατότητες αλληλεπίδρασης. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιούνται κινούμενοι χάρτες (animated maps), τρισδιάστατες αναπαραστάσεις και πολυτροπικές διεπαφές (π.χ. με αξιοποίηση ήχων κ.α.), εξελιγμένες δυνατότητες αλληλεπίδρασης κ.α.. Στο σχήμα 8.3 φαίνεται μια τυπική τρισδιάστατη διεπαφή γεωγραφικής πληροφορίας με δυνατότητες αλληλεπίδρασης από τη δουλειά του έργου Wind NASAWorld [52].



Σχήμα 8.3 Εξελιγμένη διεπαφή χωρικής πληροφορίας με αυξημένες δυνατότητες αλληλεπίδρασης από τη δουλειά του έργου Wind NASAWorld [52]

Ο σχεδιασμός διαδικασιών οπτικοποίησης δεδομένων αισθητήρων είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο έργο. Τα δεδομένα από ένα δίκτυο αισθητήρων πέρα από το ότι συνήθως είναι ιδιαίτερα δυναμικά (μεταβάλλονται σε όρια πραγματικού χρόνου) ενέχουν επιπλέον ανακρίβειες και ασάφειες λόγω του χαμηλού κόστους των αισθητήρων καθώς και εξαιτίας της φτωχής βαθμονόμησης των οργάνων παρατήρησης. Επιπλέον το πλήθος των χρονικών σημειακών παρατηρήσεων είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Έτσι λόγω αυτών των χαρακτηριστικών απαιτείται ιδιαίτερη προσπάθεια ώστε να εναρμονιστούν οι παρατηρήσεις και να εξαχθούν περαιτέρω έγκυρες και ουσιώδεις πληροφορίες (π.χ. hot spots, κυκλοφοριακή συμφόρηση κοκ.). Βάση αυτών ο στόχος της οπτικοποίησης δεδομένων αισθητήρων είναι συχνά η εξερεύνηση των δεδομένων και η διαμόρφωση δοκιμών και υποθέσεων σχετικά με τις διαδικασίες που μπορεί να οδήγησαν στις παρατηρούμενες τιμές. Σε τέτοιους στόχους εστιάζει το πεδίο της οπτικοποίησης που καλείται οπτική αναλυτική (Visual Analytics). Το πεδίο της οπτικής αναλυτικής μελετάει το πώς μπορούν να συνδυαστούν οι γνωσιακές ικανότητες του ανθρώπου-χρήστη (αναγνώριση προτύπων, απόκτησης γνώσης κ.α.), με τις ικανότητες των υπολογιστών (ταχεία δημιουργία, διαδραστικών και σύνθετων δεδομένων αισθητήρα κ.α.) [53]. Το πεδίο της οπτικής αναλυτικής ευελπιστεί να παρέχει εργαλεία που μπορούν να κάνουν ευκολότερο το έργο σε άνθρωπους-χρήστες να εντοπίζουν τάσεις, ακραίες τιμές, σχέσεις, κατηγορίες (clusters) και κατανομές που έχουν νόημα σε συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Πολλές οι προκλήσεις παραμένουν και τα αποτελέσματα αναμένεται να είναι εξίσου σημαντικά για τα δίκτυα αισθητήρων όσο η υλοποίηση αποδοτικών συστημάτων επεξεργασίας χωρικών ερωτημάτων.

8.5 Τελικά Συμπεράσματα

Σε αυτήν την τελευταία ενότητα θα επιχειρηθεί ένα είδος σύνοψης και τελικών συμπερασμάτων που αφορούν το περιεχόμενο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας.

Καταρχάς, από όσα ειπώθηκαν, από την έναρξη μέσω του υποδείγματος του 1^{ου} Κεφαλαίου και την ακολουθείσα εξειδικευμένη ανάλυση των συστημάτων δικτύων γεωαισθητήρων μπορεί κανείς πλέον να οραματίζεται και να κινηθεί προς το σχεδιασμό και την υλοποίηση ιδιαίτερων συστημάτων επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας. Σε αυτό το πλαίσιο είναι συναρπαστική η δυναμική των χωρικών διαδικασιών που επέρχεται ως είσοδος είτε ως έξοδος στα συστήματα αυτά. Με μια δόση υπεροψίας μπορεί να τα αποκαλέσει δυναμικά συστήματα που εφαρμόζονται σε γεωγραφική κλίμακα για την ανίχνευση καταστάσεων ενός δυναμικού χωρικού κόσμου για να επιλύσουν δυναμικά χωρικά προβλήματα.

Τα συστήματα αυτά έχοντας ως είσοδο τμήματα και χαρακτηριστικά του χώρου υψηλής δυναμικής, για να επιτελέσουν την λειτουργία τους έχουν ανάγκη από χωρική «σκέψη» και χωρικούς υπολογισμούς, όπως αυτή περιέχεται στα συμβατικά συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών αλλά και ακόμα παραπέρα (πολυτροπικές διεπαφές, διασύνδεση μηχανών, εξερεύνηση δεδομένων, νέα μοντέλα διαχείρισης κ.α.). Στο πλαίσιο αυτό οι επεξεργασίες χωρικών πληροφοριών θα έχουν ιδιαίτερο μέλλον εξέλιξης για το γνωσιολογικό πεδίο της επιστήμης της Γεωπληροφορικής η οποία έχει ως σκοπό την μελέτη και ανάπτυξη υπολογιστικών διαδικασιών επεξεργασίας χωρικών δεδομένων για δημιουργία χωρικής πληροφορίας, επηρεαζόμενη από τις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις της πληροφορικής και των συστημάτων.

Η εφαρμογή αποκεντρωμένων υπολογιστικών μοντέλων επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας αποδεικνύει περίτρανα την αποτελεσματικότητα των νέων μορφών συμβατικών διαδικασιών. Σε αυτό το σημείο γίνεται φανερό ότι από ένα δίκτυο αισθητήρων πέρα από ένα απλό σύστημα συλλογής χωρικών δεδομένων που επιδέχεται αυτοματοποίηση μπορεί να προκύψει με την ανάπτυξη των κατάλληλων διαδικασιών βάση της αποκεντρωμένης προσέγγισης ένα ολοκληρωμένο σύστημα επεξεργασίας χωρικής πληροφορίας δηλ. ένα Σύστημα Γεωγραφικών πληροφοριών.

Ένα άλλο συμπέρασμα που αφορά γενικώς τα δίκτυα, είναι πόσο εναρμονισμένα, αποτελεσματικά και αποδοτικά κάνουν εργασίες, και στο πλαίσιο των χωρικών δεδομένων και χωρικών διαδικασιών. Κατά κάποιον τρόπο σε πολλά συμβάντα λόγω της τυραννίας της γεωγραφίας επιβάλλεται η διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών μέσω δικτύων. Η μετουσίωση των συστημάτων σε αποκεντρωμένα στοιχεία επεξεργασίας χωρικών πληροφοριών –δίκτυα αισθητήρων– δίνει πολλές φορές την αναγκαία μορφή απόκρισης στα συστήματα που η συγκεντρωμένη προσέγγιση αδυνατεί. Πάνω σε παρόμοια φυσική βάση που μετουσιώθηκε αργότερα στα πρωτόκολλα του, άνθισε και το γνωστότερο αποκεντρωμένο σύστημα: το Διαδίκτυο. Ίσως κατά παρόμοιο τρόπο ανθίσουν και τα αποκεντρωμένα συστήματα χωρικών πληροφοριών –δίκτυα αισθητήρων– δίνοντας μοναδικές πηγές ταχέως προσβάσιμων πληροφοριών για το χώρο και από τον Κυβερνοχώρο. Ο τελευταίος λόγος ανήκει στους ερευνητές και στους λύτες προβλημάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] Goulimis E.D., Spanaki M., Tsoulos L., "Context-based cartographic display on mobile devices" , In LBS & TeleCartography, G. Gartner, Ed. *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, vol. 66, 2003.
- [2] Silvia Nittel, "A Survey of Geosensor Networks: Advances in Dynamic Environmental Monitoring", *Sensors*, 2009.
- [3] S. Nittel, M. Duckham, and L. Kulik, "Information dissemination in mobile ad-hoc geosensor networks", In M.J. Egenhofer, C. Freksa, and H.J. Miller, editors, *GIScience 2004*, volume 3234 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, 2004.
- [4] Wang, Min, et al. "Mobile GIS system for pipeline inspection at CoalBed Methane field" *Geoinformatics, 19th International Conference on IEEE*, 2011.
- [5] Taylor, David Ruxton Fraser, "Cybercartography: Theory and practice", Vol. 4. Elsevier Science Limited, 2005.
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Actuator>.
- [7] Sifakis, Joseph. "A vision for computer science—the system perspective", *Central European Journal of Computer Science* 1.1, 2011.
- [8] Sohraby, Kazem, Daniel Minoli, and Taieb Znati, "Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications", Wiley-Interscience, 2007.
- [9] Fritsch, Dieter, and Steffen Volz. "Nexus-the mobile GIS-environment", *Mobile Future and Symposium on Trends in Communications*, 2003.
- [10] Chen, Shu-yong, et al, "Survey on smart grid technology", *Power System Technology*, 2009.
- [11] Pendarakis, Dimitrios, et al, "Information aggregation and optimized actuation in sensor networks: enabling smart electrical grids", *INFOCOM 2007, 26th IEEE International Conference on Computer Communications.*, IEEE, 2007.
- [12] Resch, Bernd, et al. "Live Geography--Embedded Sensing for Standardised Urban Environmental Monitoring", 2009.
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things.
- [14] Duckham, Matt, and Rohan Bennett. "Ambient spatial intelligence", *Behaviour Monitoring and Interpretation-BMI-Smart Environments* 3, 2009.
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Ubiquitous_computing.
- [16] Cordova-Lopez, L. E., et al. "Online vehicle and atmospheric pollution monitoring using GIS and wireless sensor networks", *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 76. No. 1. IOP Publishing, 2007.

- [17] Gardner, Julian W., and Vijay K. Varadan, "Microsensors, MEMS and smart devices", John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [18] Hsu, V., J. M. Kahn, and K. S. J. Pister, "Wireless Communications for Smart Dust. Electronics Research Laboratory Technical Memorandum Number M98/2", University California Berkeley, 1998.
- [19] Dust Networks Company website: <http://www.dustnetworks.com/>, 2009.
- [20] Duckham, Matt. "Decentralized Spatial Computing", Springer, 2012.
- [21] Crossbow Technologies. Agricultural Orchard Sensor Network: <http://blog.xbow.com/xblog/2007/10/index.html>
- [22] Werner-Allen, G.; Lorincz, K.; Ruiz, M.; Marcillo, O.; Johnson, J.; Lees, J.; Welsh, M. "Deploying a wireless sensor network on an active volcano", IEEE Internet Comput, 2006.
- [23] Networked Aquatic Microbial Observing System (NAMOS), <http://robotics.usc.edu/~namos/>
- [24] Madden, Samuel R., et al. "TinyDB: An acquisitional query processing system for sensor networks" ACM Transactions on Database Systems (TODS) 30.1, 2005.
- [25] Madden, S.; Franklin, M.; Hellerstein, J.; Hong, W. "TAG: Tiny aggregate queries in ad-hoc sensor networks", Proceedings of the USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston, MA, USA, 2002.
- [26] <http://telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb/>, documentation
- [27] Kim, S.; Fonseca, R.; Culler, D. "Reliable transfer in wireless sensor networks", The First IEEE International Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks, Santa Clara, CA, USA, 2004.
- [28] Jin, G.; Nittel, S. NED, "Efficient event detection in sensor network", Workshop Proceedings Mobile Location-Aware Sensor Networks, Nara, Japan, 2006.
- [29] Duckham, M.; Nittel, S.; Worboys, "M. Monitoring dynamic spatial fields using responsive geosensor networks", Proceedings of the 13th annual ACM International Workshop on Geographic Information Systems (ACM-GIS), Bremen, Germany, 2005.
- [30] Jiang, J.; Worboys, M., "Detecting basic topological changes in sensor networks by local aggregation", Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, Los Angeles, CA, USA, 2008.
- [31] Farah, C.; Zhong, C.; Worboys, M.; Nittel, S. Detecting topological change using wireless sensor networks, Proceedings of GIScience, Park City, Utah, 2008.

- [32] Jin, G.; Nittel, S. Supporting spatio-temporal queries in wireless sensor networks by tracking deformable 2D objects. Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, Los Angeles, USA, 2008.
- [33] Grosky, W.I.; Kansal, A.; Nath, S.; Liu, J.; Zhao, F. SenseWeb: an infrastructure for shared sensing. IEEE Multimedia, 2007.
- [34] Worboys, Michael, and Matt Duckham. GIS: A computing perspective, CRC, 2004.
- [35] Hightower, Jeffrey, and Gaetano Borriello. "Location systems for ubiquitous computing." Computer 34.8, 2001.
- [36] Soheili, Amir, Vana Kalogeraki, and Dimitrios Gunopulos. "Spatial queries in sensor networks", Proceedings of the 13th annual ACM international workshop on Geographic information systems. ACM, 2005.
- [37] http://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation
- [38] Sadeq, Muhammad Jafar, and Matt Duckham. "Decentralized area computation for spatial regions", Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, ACM, 2009.
- [39] Duckham, Matt, et al, "Efficient, decentralized computation of the topology of spatial regions, "Computers, IEEE Transactions on 60.8, 2011.
- [40] Galton, Antony, "Qualitative spatial change", Oxford,, UK: Oxford University Press, 2000.
- [41] Galton, Antony, "Dynamic collectives and their collective dynamics", Spatial Information Theory , 2005.
- [42] Benkert, Marc, et al, "Reporting flock patterns", Computational Geometry, 2008.
- [43] Laube, Patrick, Matt Duckham, and Marimuthu Palaniswami, "Deferred decentralized movement pattern mining for geosensor networks", International Journal of Geographical Information Science 25.2 , 2011.
- [44] Laube, Patrick, Matt Duckham, and Thomas Wolle, "Decentralized movement pattern detection amongst mobile geosensor nodes", Geographic Information Science, 2008.
- [45] Dodge, Somayeh, Robert Weibel, and Anna-Katharina Lautenschütz, "Towards a taxonomy of movement patterns", Information visualization 7.3-4, 2008.
- [46] Willensky, U., "Netlogo", Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, 1999. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- [47] Bonnet, Philippe, Johannes Gehrke, and Praveen Seshadri. "Querying the physical world" Personal Communications, IEEE 7.5, 2000.

- [48] Espinoza, Fredrik, et al, "Geonotes: Social and navigational aspects of location-based information systems", UbiComp 2001: Ubiquitous Computing. Springer Berlin/Heidelberg, 2001.
- [49] Govindan, Ramesh, et al., "The sensor network as a database", Technical Report 02-771, Computer Science Department, University of Southern California, 2002.
- [50] Abadi, Daniel J., et al., "Aurora: a new model and architecture for data stream management", The VLDB Journal 12.2, 2003.
- [51] Chen, J., DeWitt, D., Tian, F., and Wang, Y. Niagara, "CQ: A scalable continuous query system for Internet databases", SIGMOD Record 29, 2000.
- [52] NASA, "NASA World Wind Java demo applications and applets"
<http://worldwind.arc.nasa.gov/java/demos/>.
- [53] Andrienko, G., Andrienko, N., Demšar, U., Dransch, D., Dykes, J., Fabrikant, S., Jern, M., Kraak, M.-J., Schumann, H., and Tominski, "C. Space, time, and visual analytics", International Journal Geographical Information Science 24, 2010.
- [54] Βασίλης Σ. Κουϊκόγλου, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ (Σημειώσεις μαθήματος), ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, 2002