

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ, ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ:  
ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ  
ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

**ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΑ**

**ΒΟΛΟΣ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2007**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5935/1  
Ημερ. Εισ.: 11-10-2007  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΗΥΤΔ  
2007  
ΠΑΠ

## Εισαγωγή

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των δικτύων αισθητήρων (sensor networks) και συγκεκριμένα η συλλογή και αποστολή της συσχετισμένης πληροφορίας που «μετρούν» οι αισθητήρες.

Ας ξεκινήσουμε κάνοντας μια αναφορά στον ορισμό του δικτύου αισθητήρων. Η πρόσφατη τεχνολογική πρόοδος διευκόλυνε την παραγωγή χαμηλού κόστους αισθητήρων μικρού μεγέθους αλλά περιορισμένης ευαισθησίας και περιορισμένης δυνατότητας επεξεργασίας και εκπομπής. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν πολύ εύκολη την παράταξή τους σε μεγάλο αριθμό ώστε να κατασκευαστεί ένα δίκτυο. Οι κόμβοι που αποτελούν αυτό το δίκτυο είναι 2 ειδών: οι κόμβοι-αισθητήρες (sensor nodes) και οι κόμβοι-καταβόθρες (sink nodes). Οι πρώτοι είναι τοποθετημένοι πολύ πυκνά γύρω από την περιοχή ενδιαφέροντος και αποστολή τους είναι η μέτρηση πληροφορίας. Η συνεργασία μεταξύ κόμβων-αισθητήρων είναι δυνατή μέσω ασύρματης επικοινωνίας. Αφού, λοιπόν, οι κόμβοι συλλέξουν την απαραίτητη πληροφορία, την κωδικοποιούν και τη μεταδίδουν στους κόμβους-καταβόθρες μέσω ασύρματων καναλιών. Ενδιάμεσοι κόμβοι-αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν relays για άλλους κόμβους απομακρυσμένους από τις καταβόθρες. Με τη σειρά τους τώρα, οι κόμβοι προορισμού, που έχουν την ευθύνη για τη συλλογή της πληροφορίας από τους αισθητήρες, λειτουργούν ως πύλες (gates) μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και του ασύρματου ή ενσύρματου backbone δικτύου.

Τα δίκτυα αισθητήρων βρίσκουν πολλές εφαρμογές σήμερα, όπως ανίχνευση στόχου ή παρακολούθηση συνθηκών περιβάλλοντος. Σχεδόν όλες οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων προϋποθέτουν ότι οι αισθητήρες δεν είναι προσβάσιμοι από την τοποθέτησή τους και μετά και επομένως δεν υπάρχει τρόπος αντικατάστασης των μπαταριών τους. Επιπλέον, λόγω του μικρού μεγέθους δε μπορούν παρά να διαθέτουν πολύ περιορισμένη μπαταρία. Άρα, η ενέργεια είναι ανεπαρκές αγαθό στα δίκτυα αισθητήρων και πρέπει να διατηρηθεί όσο το δυνατό περισσότερο. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι το βασικό θέμα που θα αναλύσουμε στη συνέχεια αυτής της εργασίας.

### I. Περιγραφή του προβλήματος και στόχοι

Το πρώτο θέμα που μας απασχολεί είναι να κατανείμουμε σε κάθε αισθητήρα έναν ρυθμό με τον οποίο θα κωδικοποιεί τα δεδομένα που συλλέγει, ο οποίος βέβαια θα πρέπει να είναι ανάλογος και προς τον ρυθμό με τον οποίο τα μεταδίδει. Η κατανομή των ρυθμών αυτών (rate allocation) γίνεται εύκολη υπόθεση αν θεωρήσουμε ότι τα δεδομένα που συλλέγονται είναι ανεξάρτητα. Σε αυτήν την περίπτωση καθένας μεταδίδει με τον ρυθμό που συλλέγει τα δεδομένα. Όμως, στην περίπτωση που η πληροφορία που συλλέγεται είναι συσχετισμένη και εφόσον οι αισθητήρες είναι πυκνά τοποθετημένοι σίγουρα θα υπάρχει

επικάλυψη των περιοχών ευαισθησίας τους με αποτέλεσμα να συλλέγεται και περιττή πληροφορία. Αυτό το γεγονός θα πρέπει σίγουρα να το εκμεταλλευτούμε ώστε να μειώσουμε τον όγκο των δεδομένων που μεταδίδονται στο δίκτυο και επομένως να περισώσουμε ενέργεια. Πρέπει, δηλαδή, να βρούμε μια βέλτιστη κατανομή που θα ελαχιστοποιεί τους ρυθμούς κωδικοποίησης των αισθητήρων ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζεται ότι οι ρυθμοί αυτοί είναι αρκετοί για να αναπαραστήσουν όλη την ανεξάρτητη πληροφορία που συλλέγεται. Το δεύτερο θέμα που μας απασχολεί είναι να βρούμε μια δομή μετάδοσης (transmission structure) στο γράφο του δικτύου τέτοια ώστε η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται κατά την μεταφορά των δεδομένων από τους sensor nodes στους sink nodes να ελαχιστοποιείται. Φυσικά, εάν το εύρος ζώνης του δικτύου δεν υπόκειται σε περιορισμούς αυτό είναι εύκολο να συμβεί. Κάθε κόμβος ως μεταδίδει τα δεδομένα που συνέλεξε διαμέσου μονοπατιού που καταναλώνει την ελάχιστη ενέργεια. Ωστόσο, αυτό δε συμβαίνει ποτέ στην πράξη διότι πάντα υπάρχουν περιορισμοί στη χωρητικότητα του μέσου μετάδοσης αλλά και παρεμβολές μεταξύ των σημάτων. Δημιουργείται, λοιπόν, ανταγωνισμός (contention) για την πρόσβαση στο κοινό ασύρματο μέσο μετάδοσης όταν πολλοί γειτονικοί κόμβοι έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση σε αυτό. Έτσι, προκειμένου να βρούμε τη βέλτιστη δομή μετάδοσης πρέπει να λάβουμε υπόψη και τη χωρητικότητα αλλά και την παρεμβολή στο μέσο μετάδοσης.

## II. Διατύπωση του προβλήματος

### A. Μοντελοποίηση του δικτύου (Network model)

Μοντελοποιούμε το δίκτυο αισθητήρων με έναν κατευθυνόμενο γράφο  $G = (V, E)$ , όπου  $V$  είναι ο αριθμός των κόμβων και  $E$  ο αριθμός των συνδέσεων. Οι κόμβοι αποτελούνται από τους κόμβους-αισθητήρες ( $S_N$ ) και τους κόμβους-καταβόθρες ( $S_K$ ). Άρα,  $V = S_N \cup S_K$ . Σε κάθε αισθητήρα θα αποδώσουμε έναν ρυθμό μετάδοσης  $R_i, \forall i \in S_N$ . Επίσης, όλοι οι αισθητήρες διαθέτουν ένα συγκεκριμένο εύρος στο οποίο μπορούν να μεταδίδουν (transmission range), ως το ονομάσουμε  $r_x$ . Θεωρούμε ότι μεταξύ δύο κόμβων  $i, j$  υπάρχει σύνδεσμος (link) αν  $d_{ij} \leq r_x$ , δηλαδή εάν ο ένας κόμβος βρίσκεται μέσα στο πεδίο που ο άλλος μπορεί να μεταδώσει και το αντίθετο. ( $d_{ij}$  = απόσταση μεταξύ των κόμβων  $i, j$ ). Κάθε σύνδεσμος έχει ένα βάρος  $e_{ij} = d_{ij}^2$  που αναφέρεται στην ενέργεια που καταναλώνεται στο σύνδεσμο ανά μονάδα ροής. Τέλος, ονομάζουμε  $f_{ij}$  το ρυθμό ροής με το οποίο έχει επιβαρυνθεί κάθε link. Σκοπός μας είναι να ρυθμίσουμε τα διανύσματα  $[R_i], \forall i \in S_N$  και  $[f_{ij}], \forall (i, j) \in E$  ώστε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας.

## B. Μοντελοποίηση των συσχετισμένων δεδομένων (Data Correlation Model)

Εφόσον οι αισθητήρες μεταδίδουν συνεχόμενα και η πηγές από τις οποίες μετρούν δεδομένα δεν είναι ανεξάρτητες, το θεωρητικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση είναι η Rate Distortion Theory. Η θεωρία αυτή αποτελεί ένα κομμάτι της θεωρίας πληροφορίας και μας βοηθά να καθορίσουμε την ελάχιστη πληροφορία που θα μεταδοθεί σε ένα κανάλι έτσι ώστε η πηγή (το σήμα εισόδου) να μπορεί να ανακατασκευαστεί ικανοποιητικά στο δέκτη χωρίς να υπερβαίνει ένα κατώφλι παρεμβολής  $D$  (distortion threshold).

Ας θεωρήσουμε  $S$  ένα διάνυσμα  $n$  δειγμάτων της μετρούμενης πληροφορίας από  $n$  αισθητήρες. Θεωρούμε ως  $\hat{S}$  μια αναπαράσταση του  $S$ , οπότε η ποσότητα  $d(S, \hat{S}) = \|S - \hat{S}\|^2$  αποτελεί ένα μέτρο παρεμβολής (distortion measure)

εκφρασμένο ως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, με τον περιορισμό

$E\left(\|S - \hat{S}\|^2\right) \leq D$ , η Γκαουσιανή πηγή είναι η χειρότερη περίπτωση και απαιτεί τα περισσότερα bits σε σύγκριση με άλλες πηγές.

Αν θεωρήσουμε το  $S$  ένα συσχετισμένο τυχαίο Γκαουσιανό διάνυσμα τότε η συνάρτηση που δίνει το βαθμό παρεμβολής στο  $S$  (rate distortion function) είναι:

$$R(\Sigma, D) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \log\left(\frac{\lambda_n}{D_n}\right)$$

όπου  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$  είναι διατεταγμένες χαρακτηριστικές ρίζες του πίνακα συσχέτισης  $\Sigma$ .

$$D_n = \min(K, \lambda_n)$$

και το  $K$  είναι αυτό για το οποίο  $\sum_{n=1}^N D_n = D$ .

Στην ανάλυση αυτή εκφράζουμε το ποσό συσχέτισης των δεδομένων σαν μια συνάρτηση απόστασης μεταξύ των αισθητήρων. Δηλαδή,  $\Sigma_{ij} = W^{d_{ij}^2}$  όπου  $W$  μια παράμετρος που καθορίζει το ποσό συσχέτισης μεταξύ δύο δειγμάτων.

Έτσι, δοθέντων οποιουδήποτε συνόλου κόμβων και της παρεμβολής (distortion)  $d$  ανά κόμβο μπορούμε να υπολογίσουμε τον πίνακα  $\Sigma$  και την εντροπία μέσω του rate distortion matrix  $H(X) \approx R(\Sigma_X, d \cdot |X|)$ .

### Γ. Βέλτιστοι στόχοι

Από τη στιγμή που γνωρίζουμε τη δομή μετάδοσης, δηλαδή ποιος κόμβος μεταδίδει και πού, αλλά και τους ρυθμούς μετάδοσης των κόμβων του δικτύου, μπορούμε να υπολογίσουμε την ροή  $f_{ij}$  που υπάρχει σε κάθε link. Η ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε σύνδεσμο για να γίνει η μετάδοση είναι  $e_{ij} \cdot f_{ij}$  (όπου  $e_{ij} = d_{ij}^2$  και εκφράζει το ποσό ενέργειας που καταναλώνεται στο σύνδεσμο  $ij$  ανά μονάδα ροής). Ο στόχος που θέλουμε να επιτευχθεί είναι να ελαχιστοποιήσουμε τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο δίκτυό μας, δηλαδή

$$\min \sum_{(i,j) \in E} e_{ij} \cdot f_{ij}$$

### Δ. Περιορισμοί για τις ροές δεδομένων

Σε κάθε αισθητήρα η συνολική εξερχόμενη ροή θα πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα των εισερχόμενων ροών και του ρυθμού μετάδοσης  $R_i$  του κόμβου. Αυτοί οι περιορισμοί καθιστούν τη μετάδοση χωρίς λάθη καθώς εξασφαλίζουν ότι κανένα πακέτο δεδομένων δε θα παρακαμφθεί από κανένα ενδιάμεσο αισθητήρα. Για την κωδικοποίηση θα χρησιμοποιήσουμε την περιοχή Slepian-Wolf, προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την συσχέτιση των δεδομένων. Έτσι, όλα τα πακέτα που δημιουργεί ένας αισθητήρας περιέχουν ανεξάρτητη πληροφορία και πρέπει να φτάσουν στον κόμβο προορισμού.

$$\sum_{j:(i,j) \in E} f_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in E} f_{ji} = R_i, \forall i \in S_N$$

### Ε. Περιορισμοί για τον ανταγωνισμό στο κανάλι

Προκειμένου οι λύσεις που θα βρούμε να έχουν πρακτική εφαρμογή στο ασύρματο μέσο μετάδοσης, πρέπει να εξετάσουμε και τους περιορισμούς που τίθενται από την ανταγωνιστικότητα στο κανάλι. Πρέπει καταρχήν να προσδιορίσουμε πότε μια μετάδοση έχει γίνει επιτυχημένα στον παραλήπτη. Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν δύο μοντέλα για την μετάδοση πακέτων στα ασύρματα δίκτυα που αναφέρονται ως protocol model και physical model.

- The protocol model: Καθορίζει εάν η μετάδοση ενός πακέτου είναι επιτυχής με βάση τη θέση των κόμβων στο χώρο. Η μετάδοση ενός πακέτου από τον κόμβο  $i$  στον κόμβο  $j$  θεωρείται επιτυχής εάν όλοι οι κόμβοι  $k$  για τους οποίους ισχύει  $d_{kj} < (1 + \Delta) \cdot d_{ij}$  δε

μεταδίδουν. Η ποσότητα  $\Delta > 0$  καθορίζει μια «ζώνη ασφαλείας». Όμως στην περίπτωση που μελετάμε, εφόσον έχουμε καθορίσει ότι όλοι οι κόμβοι έχουν εύρος μετάδοσης ίδιο με το εύρος παρεμβολής,  $\Delta = 0$ . Με απλά λόγια, έχουμε 2 κόμβους του δικτύου που απέχουν απόσταση ίση με  $d_{ij}$ .

Μεταξύ τους υπάρχουν κι άλλοι κόμβοι, έστω  $k$  το πλήθος τους, οι οποίοι βρίσκονται πιο κοντά στον  $j$  από ότι ο  $i$ . Για να έχουμε επιτυχημένη μετάδοση του πακέτου από τον  $i$  στον  $j$ , δεν πρέπει κανείς από τους  $k$  κόμβους να μεταδίδει, ειδάλλως θα υπάρχει παρεμβολή και επομένως ανταγωνισμός (contention) στο ασύρματο μέσο μετάδοσης.

▪ The physical model: Το μοντέλο αυτό σχετίζεται με το protocol model και μελετά

την ισχύ του σήματος στον κόμβο- παραλήπτη. Μια μετάδοση από τον  $i$  στον  $j$  κόμβο θεωρείται επιτυχής εάν ισχύει  $SIR_{ij} \geq SIR_{thres}$ , δηλαδή εάν ο λόγος σήματος προς παρεμβολή ξεπερνά ένα κατώφλι.

Θα εστιάσουμε στο protocol model και χρησιμοποιώντας τα όσα είπαμε, μπορούμε για κάθε σύνδεσμο  $(i, j)$  του δικτύου να εντοπίσουμε το σύνολο των κόμβων, ας το ονομάσουμε  $\Psi_{ij}$ , που δε μπορούν να μεταδίδουν όσο ο σύνδεσμος είναι ενεργός. Στα ασύρματα δίκτυα, οι ροές των δεδομένων (data flows) ανταγωνίζονται για την χωρητικότητα του κάθε συνδέσμου. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των δικτύων αισθητήρων, η χωρητικότητα ενός ασύρματου συνδέσμου σχετίζεται και με όλους τους συνδέσμους που βρίσκονται στην ίδια «γειτονιά». Επομένως, οι ροές των δεδομένων ανταγωνίζονται για τη χωρητικότητα  $C$  του κοινού ασύρματου μέσου μετάδοσης. Δηλαδή, για ένα διάνυσμα ροών  $[f_{ij}]_{\forall (i,j) \in E}$  σύμφωνα με τους περιορισμούς που αναφέραμε θα πρέπει να ισχύει

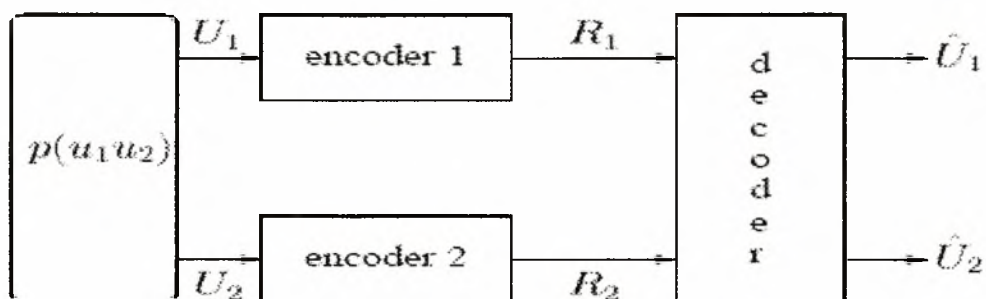
$$f_{ij} + \sum_{(p,q) \in \Psi_{ij}} f_{pq} \leq C, \forall (i, j) \in E$$

ΣΤ. Περιορισμοί στους ρυθμούς μετάδοσης

Επειδή στα δίκτυα που μελετάμε υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των δεδομένων, συχνά τα δεδομένα που συλλέγουν γειτονικοί αισθητήρες είναι πλεονάζοντα. Εφόσον η μετάδοση πλεονάζουσας πληροφορίας μέσα στο δίκτυο καταναλώνει πολύτιμη ενέργεια και μειώνει την αποδοτικότητα (throughput) του δικτύου, είναι επιθυμητή η εξάλειψη οποιουδήποτε πλεονασμού. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί τρόποι κωδικοποίησης της πληροφορίας που εκμεταλλεύονται την εξάρτηση των δεδομένων. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: κατανεμημένη κωδικοποίηση πηγής (distributed source coding) και η κωδικοποίηση με βάση τη

δεσμευμένη εντροπία (joint entropy coding with explicit communication). Στη δεύτερη περίπτωση, οι αισθητήρες συναθροίζουν τα δεδομένα τους με την παράπλευρη πληροφορία που λαμβάνουν από τους γειτονικούς κόμβους. Σ' αυτό το σενάριο, έχει αποδειχθεί ότι η βέλτιστη κατανομή των ρυθμών μετάδοσης μπορεί εύκολα να καθορισθεί αφού βασίζεται μόνο στην παράπλευρη πληροφορία, αλλά η κατασκευή της βέλτιστης δομής μετάδοσης είναι NP-hard. Αντίθετα, η κατανεμημένη κωδικοποίηση πηγής επιτρέπει σε κάθε αισθητήρα να παράγει ανεξάρτητα πακέτα δεδομένων, υποθέτοντας ότι κάθε αισθητήρας έχει γνώση για τη συνολική δομή συσχέτισης. Παρόλο που αυτός ο τρόπος κωδικοποίησης έχει αυξημένη πολυπλοκότητα, ωστόσο αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό σχήμα κωδικοποίησης καθώς μπορεί να επιτύχει μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας για μετάδοση χωρίς λάθη. Για την κωδικοποίηση, λοιπόν, θα κάνουμε χρήση της περιοχής Slepian\_Wolf.

Για παράδειγμα, έστω  $p(u_1u_2)$  η από κοινού κατανομή των τ.μ  $U_1, U_2$ . Ποιοι θα πρέπει να είναι οι ρυθμοί μετάδοσης  $R_1, R_2$  ώστε να έχουμε μετάδοση χωρίς λάθη; (zero-error distributed data compression)



Η θεωρία της Πληροφορίας απαντά σε δύο πολύ βασικά ερωτήματα στις τηλεπικοινωνίες:  
 Ποιος είναι ο μέγιστος ρυθμός σύμφωνα με τον οποίο μπορούμε να συμπίεσουμε την πληροφορία;  
 Η εντροπία  $H$  της πηγής.  
 Ποιος είναι ο μέγιστος ρυθμός σύμφωνα με τον οποίο μπορούμε να μεταδώσουμε την πληροφορία;  
 Η χωρητικότητα  $C$  του καναλιού.

Επομένως,

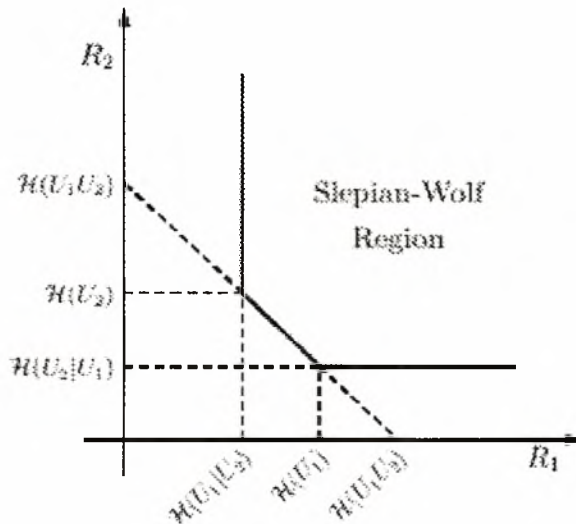


$$R_1 > H(U_1|U_2)$$

$$R_2 > H(U_2|U_1)$$

$$R_1 + R_2 > H(U_1U_2)$$

Η γραφική αναπαράσταση έχει ως εξής:



Έτσι, στη γενική περίπτωση η κωδικοποίηση Slepian-Wolf απαιτεί:

$$\sum_{i \in T} R_i \geq H(Y | Y^c), Y \subseteq S_N$$

Ο αλγόριθμος για τον καθορισμό της περιοχής Slepian-Wolf συνοψίζεται παρακάτω:

#### LOCALIZED SLEPIAN-WOLF CODING

- 1) Define a neighbourhood for each sensor node.
- 2) Find the nearest sink node for each sensor node using a distributed shortest path algorithm, such as the Bellman-Ford algorithm [16], [17]. Each sensor node refers to its nearest sink node as its destination sink node.
- 3) For each sensor node  $i$ :
  - a) Find within its neighbourhood, the set  $N_i$  of sensor nodes that have the same destination sink node as node  $i$ , and are closer to that destination sink node than node  $i$ .
  - b) The Slepian-Wolf region is satisfied when node  $i$  transmits at rate  $R_i = H(i|N_i)$ .

## Z. Μη γραμμική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Συνδυάζοντας τους στόχους που θέλουμε να πετύχουμε με τους περιορισμούς που μελέτησαμε, διατυπώνουμε το πρόβλημα των συσχετισμένων δεδομένων σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \sum_{(i,j) \in E} e_{ij} \cdot f_{ij} \\ & \text{subject to} && \\ & && \sum_{j:(i,j) \in E} f_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in E} f_{ji} = R_i, \quad \forall i \in S_N \\ & && f_{ij} + \sum_{(p,q) \in \Psi_{ij}} f_{pq} \leq C, \quad \forall (i,j) \in E \\ & && \sum_{i \in Y} R_i \geq H(Y | Y^c), \quad Y \subseteq S_N \\ & && f_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in E \\ & && R_i \geq 0, \quad \forall i \in S_N \end{aligned}$$

Οι περιορισμοί που τίθενται για τα αποδεκτά όρια των ρυθμών μετάδοσης αυξάνονται εκθετικά σε σχέση με τον αριθμό των κόμβων και αυτό καθιστά τη διατύπωση του προβλήματος μη-γραμμική. Στις επόμενες ενότητες, επαναπροσδιορίζουμε το πρόβλημα γραμμικά χρησιμοποιώντας την κωδικοποίηση Slepian-Wolf σε τοπικό επίπεδο (localized Slepian-Wolf coding).

### III. Τοπική κωδικοποίηση Slepian-Wolf

Μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης είναι συνήθως δύσκολο να επιλυθούν. Έτσι, είναι επιθυμητή η απομάκρυνση των μη-γραμμικών περιορισμών από την διατύπωση του προβλήματος. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι απαιτείται η γνώση της συνολικής δομής του δικτύου από κάθε αισθητήρα θέτει στο πρόβλημα περιορισμούς όσον αφορά την κλιμάκωση (scalability). Προκειμένου να χαλαρώσουμε λίγο τους περιορισμούς, θα χρησιμοποιήσουμε μια παραλλαγή της κωδικοποίησης στην περιοχή Slepian-Wolf, έτσι ώστε σε κάθε κόμβο να απαιτείται μόνο τοπική συσχέτιση δεδομένων. Όταν ένας κόμβος καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων του, λαμβάνει υπόψη τη

συσχέτιση των δεδομένων του μόνο με τους κόμβους που υπάρχουν στη γειτονιά του αντί για ολόκληρο το δίκτυο. Εφόσον το μοντέλο του δικτύου που μελετάμε λαμβάνει υπόψη την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων, είναι φυσικό οι αισθητήρες που δεν ανήκουν στη γειτονιά αυτού που μεταδίδει, να συμβάλλουν πολύ λίγο ή καθόλου στη μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Ορίζοντας ως γειτονιά έναν αρκετό αριθμό κόμβων, τα αποτελέσματα που θα έχουμε θα είναι πολύ κοντά σε αυτά που θα είχαμε αν εφαρμόζαμε global κωδικοποίηση Slepian-Wolf. Για τη συνέχεια, θεωρούμε ότι ένας κόμβος ανήκει στη γειτονιά ενός άλλου αν απέχει έναν σύνδεσμο μακριά (one-hop neighborhood). Κάθε κόμβος  $i$  πρέπει να κωδικοποιεί τα δεδομένα του με ρυθμό ίσο με την υπό συνθήκη εντροπία. Η συνθήκη αφορά μόνο το  $N_i$ , ένα υποσύνολο κόμβων του δικτύου που αποτελεί τη γειτονιά του  $i$ , οι οποίοι βρίσκονται πιο κοντά στο κόμβο προορισμού (sink node) από ότι ο ίδιος ο  $i$ . Αντί, λοιπόν, να απαιτείται σφαιρική γνώση της συσχέτισης, απαιτείται μόνο στα όρια της γειτονιάς του κόμβου που μεταδίδει γεγονός που μας επιτρέπει να ξεπεράσουμε τους περιορισμούς στην κλιμάκωση του που θα αντιμετωπίζαμε αν εφαρμόζαμε global Slepian-Wolf coding. Οι αισθητήρες θα πρέπει να γνωρίζουν τους κόμβους προορισμού τους προτού εφαρμόσουν τους επιτρεπτούς ρυθμούς μετάδοσής τους. Εφόσον υπάρχουν περιορισμοί στη χωρητικότητα, υπάρχει περίπτωση ένας αισθητήρας να μην είναι δυνατό να μεταδώσει τα δεδομένα που συνέλεξε στον πλησιέστερο κόμβο προορισμού λόγω συμφόρησης δεδομένων (data congestion). Προκειμένου να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, η λύση που εξετάζουμε επιτρέπει στους αισθητήρες να αλλάζουν τους sink nodes προορισμού τους σε χρόνο εκτέλεσης. Έτσι, η δομή μετάδοσης γίνεται δυναμικά καθώς ρυθμίζεται με βάση την κατανομή των ρυθμών μετάδοσης και τη συμφόρηση των δεδομένων στα διάφορα links. Από την άλλη μεριά, προκειμένου να εξυπηρετηθεί η δυναμική δομή μετάδοσης, το τοπικό σχήμα κωδικοποίησης Slepian-Wolf που εφαρμόζουμε δυναμικά καθορίζει ποιοι είναι οι ρυθμοί μετάδοσης σε χρόνο εκτέλεσης. Επομένως, η λύση βελτιστοποιεί και τη δομή μετάδοσης στο δίκτυο αλλά και τους ρυθμούς μετάδοσης των κόμβων, μεταξύ των οποίων υπάρχει εξάρτηση. Τώρα μπορούμε να εκφράσουμε το πρόβλημα σαν ένα γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθώς χαλαρώσαμε τους μη γραμμικούς περιορισμούς που αφορούν τους ρυθμούς μετάδοσης, αλλά περιοχή Slepian-Wolf ικανοποιείται ακόμη.



$$\text{minimize } \sum_{(i,j) \in E} e_{ij} \cdot f_{ij}$$

subject to

$$\sum_{j:(i,j) \in E} f_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in E} f_{ji} = H(i | N_i), \quad \forall i \in S_N$$

$$f_{ij} + \sum_{(p,q) \in \Psi_{ij}} f_{pq} \leq C, \quad \forall (i,j) \in E$$

$$f_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in E$$

## VI. Λύση

### A. Lagrangian Dualization

$$\text{minimize } \sum_{(i,j) \in E} e_{ij} \cdot f_{ij} + \beta_{ij} \cdot (f_{ij} + \sum_{(p,q) \in \Psi_{ij}} f_{pq} - C)$$

subject to

$$\sum_{j:(i,j) \in E} f_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in E} f_{ji} = H(i | N_i), \quad \forall i \in S_N$$

$$f_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in E$$

Θυμίζουμε ότι το  $\Psi_{ij}$  είναι το σύνολο των συνδέσμων που δε μπορούν να μεταδώσουν όταν ο σύνδεσμος  $(i, j)$  είναι ενεργός. Ορίζουμε ένα νέο μέγεθος  $\Phi_{ij}$  ως το σύνολο των συνόλων όπου ανήκει ο σύνδεσμος  $(i, j)$ . Για κάθε σύνδεσμο  $(i, j)$  που παρεμβάλλεται στον  $(p, q)$ , ο  $(i, j)$  ανήκει στο σύνολο του  $(p, q)$ . Επομένως, για δύο συνδέσμους  $(i, j)$  και  $(p, q)$ ,  $(p, q) \in \Phi_{ij}$  iff  $(i, j) \in \Psi_{pq}$ . Έτσι, το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{minimize } \sum_{(i,j) \in E} f_{ij} \cdot (e_{ij} + \beta_{ij} + \sum_{(p,q) \in \Phi_{ij}} \beta_{pq}) - \beta_{ij} \cdot C$$

subject to

$$\sum_{j:(i,j) \in E} f_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in E} f_{ji} = H(i | N_i), \quad \forall i \in S_N$$

$$f_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in E$$

Η συνάρτηση-στόχος του προβλήματος καθορίζει ότι το βάρος κάθε συνδέσμου ισούται με το άθροισμα του κόστους ενέργειας και χωρητικότητας. Και το κόστος χωρητικότητας είναι ίσο με τον πολλαπλασιαστή Lagrange του συνδέσμου συν το άθροισμα των πολλαπλασιαστών στο  $\Phi_{ij}$ . Αυτό το διαισθάνεται κανείς αφού όταν ο σύνδεσμος  $(i, j)$  είναι ενεργός κανείς από τους συνδέσμους στο  $\Phi_{ij}$  δε μπορεί να μεταδώσει εξαιτίας της παρεμβολής. Παρατηρούμε ότι η λύση αυτή απαιτεί κάθε αισθητήρα να μεταδίδει στον κοντινότερο κόμβο-προορισμό του μέσω του κοντινότερου μονοπατιού. Ως αποτέλεσμα, το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με οποιονδήποτε αλγόριθμο συντομότερου μονοπατιού όπως πχ ο αλγόριθμος Bellman-Ford. Επίσης, σύμφωνα με το σχήμα τοπικής κωδικοποίησης Slepian-Wolf, κάθε κόμβος θα κωδικοποιήσει σε συνεργασία με κάποιον άλλο γείτονα μόνο εάν έχουν και οι δύο τον ίδιο κόμβο για προορισμό.

## B. Αλγόριθμος

Παρουσιάζουμε τώρα τον θεμελιώδη αλγόριθμο για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος. Ο αλγόριθμος ξεκινά με ένα μη-αρνητικό σύνολο πολλαπλασιαστών Lagrange,  $\beta_{ij}[0]$ . Εφόσον οι πολλαπλασιαστές Lagrange είναι τιμές που αντιπροσωπεύουν το στάδιο της συμφόρισης σε ένα σύνδεσμο, μια πιθανή τιμή για αρχικοποίηση των πολλαπλασιαστών είναι το 0, υποθέτοντας ότι αρχικά στο δίκτυο δεν υπάρχει συνωστισμός δεδομένων. Σ' αυτήν την περίπτωση τα αρχικά κοντινότερα μονοπάτια που θα επιλέξουν οι αισθητήρες θα είναι εκείνα που καταναλώνουν τη λιγότερη ενέργεια.

Σε κάθε επανάληψη  $k$  του αλγόριθμου, δοθέντων των τιμών των πολλαπλασιαστών  $\beta_{ij}[k]$ , επιλύουμε το πρόβλημα εντοπίζοντας το συντομότερο μονοπάτι από κάθε έναν αισθητήρα προς τον κόμβο-προορισμό του, (όπου το βάρος κάθε link ισούται με το άθροισμα του ενεργειακού του κόστους το οποίο όπως έχουμε αναφέρει είναι συνάρτηση της απόστασης), έπειτα βρίσκουμε τον πολλαπλασιαστή του μονοπατιού ( του ασύρματου συνδέσμου δηλαδή) αλλά και τους πολλαπλασιαστές των συνόλων όπου το μονοπάτι ανήκει. Ενημερώνουμε τις τιμές των πολλαπλασιαστών σύμφωνα με τον τύπο:

$$\beta_{ij}[k+1] = \max \left( 0, \beta_{ij}[k] + \theta[k] \left( f_{ij}[k] + \sum_{(p,q) \in \Psi_{ij}} f_{pq}[k] - C \right) \right)$$

Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει ότι οι πολλαπλασιαστές ρυθμίζονται με βάση την ποσότητα  $\left( f_{ij}[k] + \sum_{(p,q) \in \Psi_{ij}} f_{pq}[k] - C \right)$  η οποία αντιπροσωπεύει το ποσοστό παραβίασης χωρητικότητας σε ένα σύνολο συνδέσμων του δικτύου. Όταν η

παραβίαση είναι θετική, τότε υπάρχουν ροές δεδομένων που ταξιδεύουν στο δίκτυο ενώ δεν υποστηρίζονται από το ασύρματο μέσο μετάδοσης. Τότε η τιμή του πολλαπλασιαστή που αναφέρεται σε αυτό αυξάνεται σύμφωνα με το ποσοστό της παραβίασης ώστε ανατραπεί η συμφύρση. Αντίθετα, όταν η παραβίαση είναι αρνητική τότε υπάρχει ελεύθερο εύρος ζώνης στο δίκτυο το οποίο παραμένει ανεκμετάλλευτο από τις ροές των δεδομένων. Έτσι, οι πολλαπλασιαστές μειώνονται, προκειμένου να προσελκύσουν ροές δεδομένων που θα απασχολήσουν το bandwidth.

Η επιλογή του  $\theta$  (step size) παίζει μεγάλο ρόλο στον αλγόριθμο. Εάν είναι πολύ μικρό τότε ο αλγόριθμος συγκλίνει πολύ αργά. Αν είναι πολύ μεγάλο, υπάρχει ταλάντωση γύρω από τη βέλτιστη λύση και ο αλγόριθμος δε συγκλίνει. Η σύγκλιση είναι εγγυημένη όταν τηρούνται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$\theta[k] \geq 0, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \theta[k] = 0, \quad \sum_{k=1}^{\infty} \theta[k] = \infty$$

Ο αλγόριθμος συνοψίζεται παρακάτω:

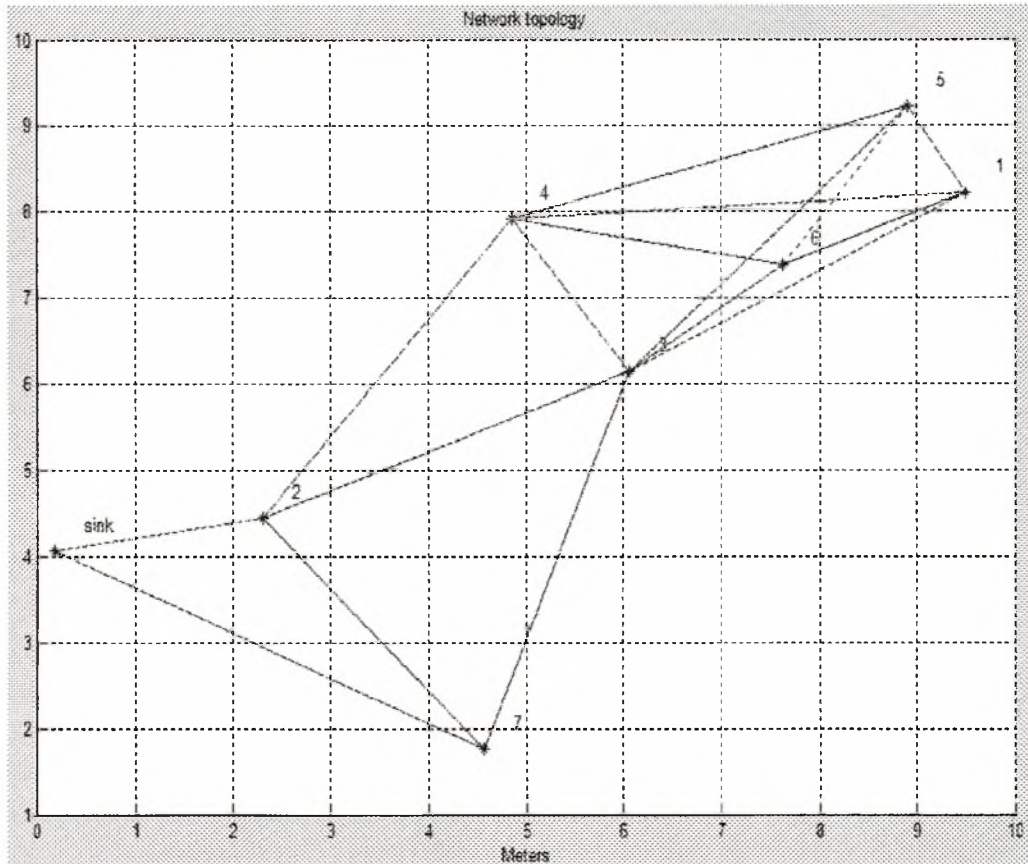
#### THE OPTIMIZATION PHASE

<p>1) Choose initial Lagrangian multiplier values <math>\beta_{ij}[0]</math>, <math>\forall (i, j) \in E</math>.</p> <p>2) For each cluster and link <math>(i, j)</math>, repeat the following iteration until convergence (at times <math>t = 1, 2, \dots</math>):</p> <p><b>Cluster Price Update by cluster <math>(i, j)</math>:</b></p> <p>1) Receive flow rates <math>f_{pq}[t]</math> from all links <math>(p, q)</math> in <math>\Phi_{ij}</math>.</p> <p>2) Update Lagrangian multiplier <math>\beta_{ij}[t+1] = \max(0, \beta_{ij}[t] + \theta[t](f_{ij}[t] + \sum_{(p,q) \in \Phi_{ij}} f_{pq}[t] - C))</math>, where <math>\theta[t] = \frac{\theta}{(t+\theta)}</math>.</p> <p>3) Send <math>\beta_{ij}[t+1]</math> to all links in <math>\Psi_{ij}</math>.</p> <p><b>Link Rate Update by link <math>(i, j)</math>:</b></p> <p>1) Receive cluster prices <math>\beta_{pq}[t]</math> from all clusters <math>(p, q)</math> in <math>\Phi_{ij}</math>.</p> <p>2) Determine the weight of link <math>(i, j)</math> as <math>(c_{ij} + \beta_{ij}[t] + \sum_{(p,q) \in \Phi_{ij}} \beta_{pq}[t])</math>.</p> <p>3) If node <math>i</math> is a sensor node:</p> <p>a) Compute its nearest sink node using a distributed shortest path algorithm, such as the Bellman-Ford algorithm. Sensor <math>i</math> refers to its nearest sink node as its destination sink node.</p> <p>b) If modified, sensor <math>i</math> notifies other sensors in its neighbourhood about the identity and its distance to its new destination sink node.</p> <p>c) Based on the information received, sensor <math>i</math> finds within its neighbourhood the set <math>N_i</math>. <math>N_i</math> consists of sensor nodes that have the same destination sink node as sensor <math>i</math>, and are closer to that destination sink node than sensor <math>i</math>.</p> <p>d) Sensor <math>i</math> encodes its collected data at rate <math>R_i = H(N_i)</math>, and transmits the encoded data to its destination sink node via the shortest path.</p> <p>4) Measure and record the current rate on the link, denoted as <math>f_{ij}[t+1]</math>.</p> <p>5) Send <math>f_{ij}[t+1]</math> to all clusters in <math>\Phi_{ij}</math>.</p>
--

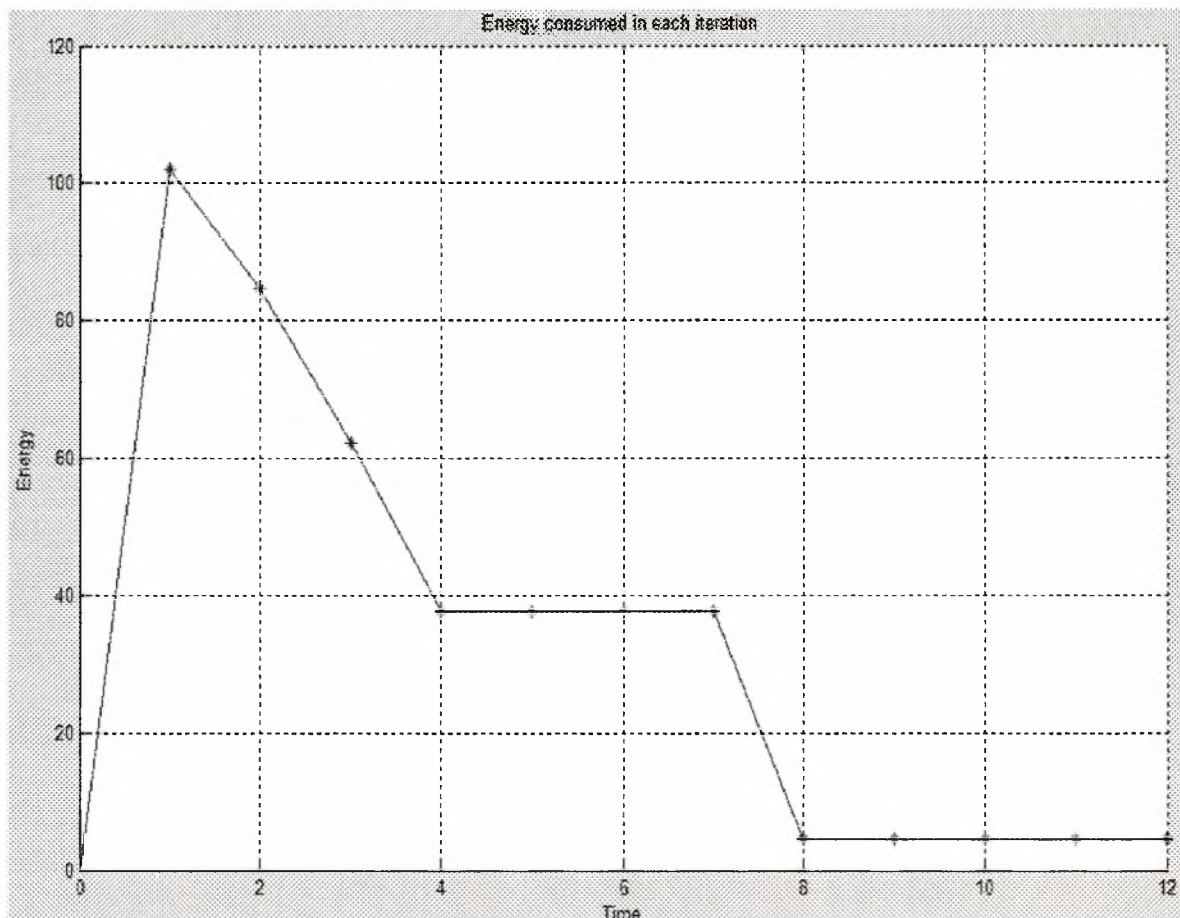
Ο αλγόριθμος εξασφαλίζει ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται στο δίκτυο κάνοντας χρήση της συσχέτισης των δεδομένων. Σε αισθητήρες που είναι απομακρυσμένοι από τον κόμβο-προορισμό τους, ο αλγόριθμος αναθέτει

χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης ενώ το αντίθετο συμβαίνει με κόμβους που είναι κοντά στους κόμβους-προορισμούς.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων με 8 αισθητήρες και 1 κόμβο προορισμού.



Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε επαναληπτικά 12 φορές. Σε κάθε βήμα επιλέγονται για μετάδοση εκείνοι οι σύνδεσμοι που έχουν λιγότερη κίνηση και καταναλώνουν τη λιγότερη δυνατή ενέργεια. Οι κόμβοι μεταδίδουν σύμφωνα με τους ρυθμούς που έχουν καθοριστεί από τον αλγόριθμο. Για τη διάρκεια του πειράματος ο αλγόριθμος παράγει μια ακολουθία λύσεων. Η συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε από τις λύσεις αυτές φαίνεται στο παρακάτω figure.



Παρατηρούμε τις τιμές των πολλαπλασιαστών Lagrange όταν η χωρητικότητα καναλιού είναι επαρκής για τις ροές δεδομένων της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, όταν ορίζουμε χωρητικότητα καναλιού 20Mbps τότε όλοι οι πολλαπλασιαστές παραμένουν μηδέν καθώς δεν παρατηρείται συμφόρηση στους συνδέσμους του δικτύου. Όταν, όμως περιορίζουμε την χωρητικότητα ο αλγόριθμος αυξάνει τις τιμές των πολλαπλασιαστών για τους συνδέσμους που επιβαρύνονται. Μάλιστα, εστιάζουμε στο γεγονός ότι μεγαλύτερη τιμή αποδίδει ο αλγόριθμος στον σύνδεσμο (7,8) ο οποίος οδηγεί στον κόμβο προορισμού. Αυτό είναι λογικό εφόσον η περισσότερη κίνηση δεδομένων θα περάσει από αυτό το σύνδεσμο προκειμένου να καταλήξει στον κόμβο προορισμού. Επίσης, μεγάλη τιμή αποδίδεται στο σύνδεσμο (1,4) επειδή ο κόμβος 1 έχει τη μεγαλύτερη ροή δεδομένων και την προωθεί μέσω του συνδέσμου αυτού.





## D. Προεκτάσεις - Μοντέλο ασύγχρονης μετάδοσης στο δίκτυο

Μέχρι τώρα, συζητήσαμε ότι μια συγχρονισμένη υλοποίηση του αλγορίθμου. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ρολόγια των κόμβων συγχρονίζονται έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι να εκτελέσουν ταυτόχρονα τους υπολογισμούς σε διακριτές χρονικές στιγμές  $t=1,2,3,\dots$ . Έτσι, κάθε κόμβος εκτελεί τους υπολογισμούς του παραπάνω αλγορίθμου βασισμένος στην πιο πρόσφατη πληροφορία που έχει λάβει για την κατάσταση του δικτύου. Ωστόσο, στην πράξη κοστίζει πολύ ένας τέτοιος συγχρονισμός σε περιβάλλοντα ad hoc δικτύων καθώς επιφέρει τεράστιο overhead.

Σε ασύγχρονα περιβάλλοντα δικτύων, κάθε κόμβος έχει διαφορετική ταχύτητα στους υπολογισμούς και επομένως ο αλγόριθμος θα εκτελείται από τον καθένα με διαφορετικούς ρυθμούς. Κατά συνέπεια, οι κόμβοι δε θα είναι πάντα ενημερωμένοι με τους πιο πρόσφατους ρυθμούς μετάδοσης ή τις πιο πρόσφατες τιμές των links λόγω εκπρόθεσμων ενημερώσεων. Για να διευθετήσουμε τις ασύγχρονες ενημερώσεις, εισάγουμε το partial asynchronism model, για το οποίο κάνουμε τις εξής υποθέσεις:

- Υπάρχει ένας θετικός ακέραιος  $B$  τέτοιος ώστε:

Για κάθε συστάδα (cluster) και κάθε link  $(i, j)$ , ο χρόνος μεταξύ δύο συνεχόμενων ενημερώσεων είναι φραγμένος από το  $B$  και για τις τιμές των συνδέσμων και για τους ρυθμούς μετάδοσης.

Η καθυστέρηση στην one-way επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων είναι το πολύ  $B$  χρονικές στιγμές.

## Capacity Reservation

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει, παράγει μια σειρά από ρυθμούς μετάδοσης αλλά και δομές μετάδοσης στο δίκτυο ως λύσεις στο Lagrangian dual problem. Ωστόσο, συχνά κάποιες από αυτές τις λύσεις παραβιάζουν τους περιορισμούς που τέθηκαν στο αρχικό πρόβλημα και «χαλάρωσαν» στο δυαδικό που αφορούν την ανταγωνιστικότητα στο κανάλι.

Η παραβίαση αυτή όμως σύμφωνα με τους [1], δεν είναι παρά ένα μικρό κλάσμα της διαθέσιμης χωρητικότητας, παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος με μεγάλη πιθανότητα παράγει εφικτές λύσεις. Για να διαφυλάξει ο αλγόριθμος τη διαθέσιμη χωρητικότητα μπορεί να εκτελεστεί με τη γνώση ότι το ασύρματο μέσο μετάδοσης μπορεί να υποστηρίξει ένα ποσοστό (πχ 90%) της πραγματικά διαθέσιμης χωρητικότητας. Κάτι τέτοιο βέβαια πάλι δεν εγγυάται ότι ο

αλγόριθμος θα παράγει εφικτές πρωταρχικές λύσεις, ωστόσο δεν εισάγει καμιά επιπρόσθετη πολυπλοκότητα στον αλγόριθμο.

#### Ε. Προεκτάσεις- Δυναμικότητα του δικτύου

Στα περισσότερα δίκτυα αισθητήρων οι κόμβοι προορισμού είναι κινητοί, επομένως η τοπολογία του δικτύου είναι δυναμική. Ασύρματοι σύνδεσμοι μπορούν να προστίθενται ή να αφαιρούνται οποιαδήποτε χρονική στιγμή από την τοπολογία. Επιπλέον, εφόσον το κόστος ενέργειας ενός συνδέσμου είναι συνάρτηση της απόστασης, μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την κίνηση των κόμβων. Επομένως, κατά τη σχεδίαση του αλγορίθμου θα πρέπει να λάβουμε υπόψη αυτούς τους μηχανισμούς ώστε να πετύχουμε περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας. Έτσι, υπάρχει μια επέκταση του αλγορίθμου που αναφέραμε ώστε να χειρίζεται τη δυναμικότητα του δικτύου.

Μέχρι τώρα, λοιπόν, για κάθε ασύρματο σύνδεσμο  $(i, j)$ , ο κόμβος- αποστολέας διατηρούσε δύο λίστες,  $\Psi_{ij}$  και  $\Phi_{ij}$ . Για να χειριστούμε τη δυναμικότητα του δικτύου, αυτές οι λίστες πρέπει να ενημερώνονται κάθε φορά που η τοπολογία αλλάζει.

Υποθέτουμε ότι οι κόμβοι είναι ικανοί να γνωρίζουν την τοπολογία του δικτύου μέσα στο εύρος την μετάδοσής τους. Στην αρχή κάθε επανάληψης του αλγορίθμου, κάθε κόμβος ενημερώνει για το αν έχει αντιληφθεί νέους συνδέσμους που ξεκινούν από αυτόν, αν έχει χάσει συνδέσμους ή αν έχουν διαφοροποιηθεί ήδη υπάρχοντα links. Μετά από αυτό το στάδιο, ο αλγόριθμος εκτελείται κανονικά όπως περιγράφηκε πιο πάνω.

Ο αλγόριθμος που προτείνουν οι [1] δίνεται πιο κάτω:

- 1) For each wireless link  $(i, j)$  delegated to node  $i$ :
  - If wireless link  $(i, j)$  is new or modified, node  $i$  sends a NOTIFY packet to node  $j$ . The NOTIFY packet contains the current price for cluster  $(i, j)$ .
  - If wireless link  $(i, j)$  is obsolete, node  $i$  sends a DELLINK packet to all nodes  $p$  for the clusters  $(p, q) \in \Phi_{ij}$ . In addition, node  $i$  sends a DELCLUSTER packet to all nodes  $p$  for the links  $(p, q) \in \Psi_{ij}$ .
- 2) Upon receiving the following packets:
  - **NOTIFY:** Node  $j$  sends a CHECK packet to all potential nodes  $k$  that can be interfering with wireless link  $(i, j)$ . Since the interference range is assumed to be equivalent to the transmission range in this paper, the potential nodes are limited to the nodes that are within node  $j$ 's transmission range. The CHECK packet contains the price for cluster  $(i, j)$  extracted from the NOTIFY packet.
  - **CHECK:** Based on local information exchanged between the nodes, node  $k$  determines if its outgoing wireless links  $(k, l)$  are interfering with wireless link  $(i, j)$  according to the protocol model of packet transmission.
    - If wireless link  $(k, l)$  is interfering with wireless link  $(i, j)$ . Check if cluster  $(i, j) \in \Phi_{kl}$ . If NO, add the identity and the price of cluster  $(i, j)$  to  $\Phi_{kl}$ . Then, node  $k$  sends a ADDLINK packet to node  $i$  with the identity and rate of link  $(k, l)$ .
    - If wireless link  $(k, l)$  is NOT interfering with wireless link  $(i, j)$ . Check if cluster  $(i, j) \in \Phi_{kl}$ . If YES, remove cluster  $(i, j)$  from  $\Phi_{kl}$ . Then, node  $k$  sends a DELLINK packet to node  $i$  with the identity of link  $(k, l)$ .
  - **ADDLINK:** Cluster  $(i, j)$  adds the identity and the rate of link  $(k, l)$  to  $\Psi_{ij}$ .
  - **DELLINK:** If DELLINK packet is generated by node  $i$ , cluster  $(p, q)$  removes link  $(i, j)$  from  $\Psi_{pq}$ . If DELLINK packet is generated by node  $k$ , cluster  $(i, j)$  removes link  $(k, l)$  from  $\Psi_{ij}$ .
  - **DELCLUSTER:** Link  $(p, q)$  removes cluster  $(i, j)$  from  $\Phi_{pq}$ .

Συνοψίζοντας...

Τα δίκτυα αισθητήρων βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλές περιπτώσεις. Όμως, προτού αναγνωρίσουμε την πλήρη δυναμική των δικτύων αισθητήρων, είναι απαραίτητο να επιλύσουμε το πρόβλημα των συσχετισμένων δεδομένων κάτω από «πραγματικές» υποθέσεις. Σε αυτή την εργασία δείξαμε ότι με τους περιορισμούς της χωρητικότητας, η εύρεση των βέλτιστων ρυθμών μετάδοσης και η εύρεση της βέλτιστης δομής μετάδοσης είναι δύο ανεξάρτητα προβλήματα. Με την από κοινού βελτιστοποίηση αυτών των προβλημάτων, ελαχιστοποιούμε τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στο δίκτυο. Επιπλέον, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τη συσχέτιση των δεδομένων που μεταδίδονται ώστε να περισώσουμε ενέργεια αλλά πρέπει να λάβουμε υπόψη και τον ανταγωνισμό που δημιουργείται στο ασύρματο μέσο μετάδοσης. Ο αλγόριθμος που συζητήθηκε είναι επεκτάσιμος ώστε να αποδίδει ικανοποιητικά και σε ασύγχρονα περιβάλλοντα δικτύων αλλά και σε multi-sink δίκτυα αισθητήρων.

## Βιβλιογραφία

- [1] A distributed framework for correlated data gathering in sensor networks  
Kevin Yuen, Ben Liang, Baochun Li.
- [2] Sergio D. Servetto Tutorial
- [3] Mobile, wireless and sensor networks  
Rajeev Shorey, A. Ananda, Mun Choon Chan, Wei Tsang Ooi
- [4] <http://www.mathworks.com/>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091075

