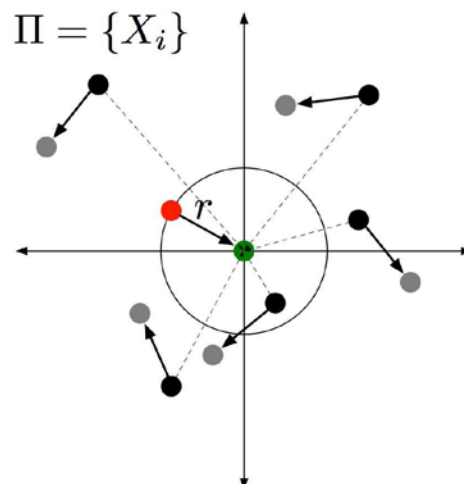




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
Π.Μ.Σ. «ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ»

ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ AD-HOC ΔΙΚΤΥΑ: ΒΑΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Χρήστος. Γ. Καρζής

Επιβλέπων Καθηγητής: Μαράς Ανδρέας

Τρίπολη, Σεπτέμβριος 2012

Πρόλογος

Πρόσφατα, μεγαλύτερη έμφαση έχει δοθεί, όπως αυτό άλλωστε φαίνεται σε πρόσφατες επιστημονικές δημοσιεύσεις, στον υπολογισμό μιας νέας μετρικής, η οποία ονομάζεται *χωρητικότητα μετάδοσης* για τα αδόμητα ασύρματα δίκτυα, και αυτό γίνεται λόγω του ότι, σε αντίθεση με την άλλη, πιο ευρύτερα διαδεδομένη και συμπληρωματική, μετρική γνωστή ως χωρητικότητα μεταφοράς, η χωρητικότητα μετάδοσης (**Transmission Capacity—TC**) παρέχει τη δυνατότητα να υπολογισθεί αναλυτικά η απόδοση ενός ασύρματου και μάλιστα αδόμητου (ad-hoc) δικτύου για επικοινωνία στα χαμηλότερα στρώματά του (lower network layers) καθώς επίσης και για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σε ότι αφορά τις διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με το σχεδιασμό ενός ad-hoc ασύρματου δικτύου. Με βάση τα προαναφερθέντα, σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να παρουσιάσει, κατά αρχήν μιν, το μαθηματικό (πιθανοτικό) μοντέλο ενός αδόμητου και ασύρματου δικτύου με την προϋπόθεση ότι οι κόμβοι του περιγράφονται στατιστικά από μια δυσδιάστατη σημειακή ανέλιξη **Poisson** (2D PPP) καθώς επίσης και τον ορισμό της μετρικής της χωρητικότητας μετάδοσης. Κατά δεύτερον και κυριότερο δε, την αναλυτική έκφραση της χωρητικότητας μετάδοσης στην περίπτωση όπου μόνον οι κόμβοι του ασύρματου ad-hoc δικτύου είναι στατιστικά κατανομημένοι, δηλαδή του βασικού μοντέλου με απώλειες λόγω των υπάρχοντων διαφόρων διαδρομών της επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών του. Επίσης, παρουσιάζονται κάτω και άνω όρια για την πιθανότητα αποκοπής (**Outage Probability—OP**), η οποία εμπεριέχεται στον ορισμό της βασικής παραμέτρου, δηλαδή της TC, και τελικά εξετάζεται η βελτιστοποίηση του κατωφλιού της παραμέτρου **SINR** (Signal to Interference plus Noise Ratio) καθώς επίσης και του περιορισμού της πιθανότητας αποκοπής, δύο σημαντικών παραμέτρων που αφορούν στο σχεδιασμό αδόμητων ασύρματων δικτύων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AD-HOC ΔΙΚΤΥΟΥ

1.1	Μαθηματικό μοντέλο.....	6
1.2	Βασικοί ορισμοί: Διακοπή Λειτουργίας και Χωρητικότητα Μετάδοσης.....	8
1.3	Θόρυβος βολής.....	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

2.1	Ακριβή Αποτελέσματα.....	12
2.2	Κάτω όριο διακοπής: Κυρίαρχοι κόμβοι.....	14
2.3	Άνω όριο διακοπής: Φράγματα <i>Markov</i> , <i>Chebyshev</i> και <i>Chernoff</i>	15
2.4	Μέθοδος βελτίωσης κάτω ορίου: Υπό-εκθετικές κατανομές.....	20
2.5	Βελτιστοποίηση κατωφλιού του λόγου <i>SINR</i> και του περιορισμού διακοπής λειτουργίας.....	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ

ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	24
-----------------	----

Ακρωνύμια.....	26
----------------	----

Πίνακας κυριότερων συμβόλων.....	26
----------------------------------	----

Βιβλιογραφία.....	27
-------------------	----

Περίληψη

Χωρητικότητα μετάδοσης (**TC**) είναι μια μετρική απόδοσης για τα ασύρματα δίκτυα, η οποία μετρά την ένταση της επιτυχημένης χωρικής μετάδοσης ανά μονάδα επιφάνειας, που υπόκεινται σε περιορισμούς όσον αφορά την επιτρεπτή πιθανότητα διακοπής, όπου διακοπή παρουσιάζεται όταν ο λόγος **SINR** σε ένα δέκτη είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την χωρητικότητα μετάδοσης που έχει αναπτυχθεί από τους καθηγητές **S. Weber** και **J. Andrews**, καθώς επίσης και από τους συνεργάτες τους κατά την τελευταία δεκαετία, αλλά μόνο με το βασικό μοντέλο απωλειών. Το μαθηματικό πλαίσιο που διέπει την παρούσα ανάλυση είναι η στοχαστική γεωμετρία: η στοχαστική διαδικασία **Poisson** μοντελοποιεί τις θέσεις των παρεμβολών, και οι διαδικασίες (σταθερού) θορύβου βολής αντιπροσωπεύουν το σύνολο των παρεμβολών σε έναν δέκτη. Τα αποτελέσματα για τη χωρητικότητας μετάδοσης (ακριβή, ασυμπτωτικά, και οριακά) στο απλό μοντέλο, δίνουν τη δυνατότητα να εστιάσουμε επάνω σε μια θεμελιώδη αρχή του μοντέλου: η αναλυτική μέθοδος δίνει αποτέλεσμα για την απόδοση, τα οποία εξαρτώνται από τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου.

Abstract

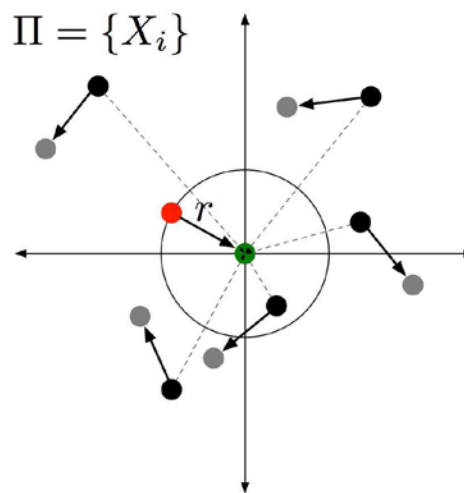
Transmission capacity (TC) is a performance metric for wireless networks that measures the spatial intensity of successful transmissions per unit area, subject to a constraint on the permissible outage probability where outage occurs when the **SINR** at a receiver is below a given threshold. This thesis gives a baseline treatment of the Transmission Capacity framework that has been developed by Professors S. Weber and J. Andrews and also their collaborators over the past decade. The mathematical framework underlying the analysis is stochastic geometry: Poisson point processes model the locations of interferers, and (stable) shot noise processes represent the aggregate interference seen at a receiver. Transmission Capacity results (exact, asymptotic, and bounds) on a simple model are provided in order to illustrate a key strength of the framework: analytical tractability yields explicit performance dependent upon key model parameters.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ AD-HOC ΔΙΚΤΥΟΥ

1.1 Μαθηματικό μοντέλο

Θεωρούμε ότι ένα *ad hoc* ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από ένα μεγάλο (άπειρο) αριθμό κόμβων απλώνεται σε μεγάλη (άπειρη) περιοχή. Το δίκτυο είναι ασυντόνιστο και αυτό σημαίνει ότι οι πομποί δεν συντονίζονται μεταξύ τους στη λήψη των αποφάσεων μετάδοσης. Δηλαδή, οι κόμβοι χρησιμοποιούν το **Aloha** πρωτόκολλο (σε κάθε θυρίδα, κάθε κόμβος αποφασίζει ανεξάρτητα εάν θα μεταδώσει ή θα λαμβάνει πακέτα) ως πρωτόκολλο ελέγχου μέσου πρόσβασης (**MAC**). Παρατηρούμε το δίκτυο σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (we take a snapshot), όπου οι θέσεις των κόμβων εκείνη τη στιγμή κατανέμονται ως μια σταθερά σημειακή ανέλιξη Poisson (**PPP**) στο δυοδιάστατο επίπεδο με ρυθμό ίσο με λ , και η οποία συμβολίζεται με $\Pi(\lambda) = \{X_i\}$, όπου κάθε $X_i \in \mathbb{R}^2$ είναι η θέση του παρεμβάλλοντα i -οστού πομπού. Η υπόθεση ότι η κατανομή των κόμβων είναι PPP ισχύει όταν οι ασυντόνιστοι κόμβοι μετάδοσης είναι ανεξάρτητοι και ομοιόμορφα κατανεμημένοι στον αντίστοιχο χώρο του δικτύου. Η παραπάνω υπόθεση είναι λογική για δίκτυα με άνευ διακρίσεως τοποθετήσεις κόμβων ή για τα δίκτυα με μεγάλο βαθμό κινητικότητας. Αν όμως γίνει ένας έξυπνος προγραμματισμός μετάδοσης, με αποτέλεσμα ότι οι προκύπτουσες θέσεις πομπών δεν θα κατανέμονται σύμφωνα με την κατανομή **PPP**, τότε είναι ξεκάθαρο ότι το αναλυτικό πλαίσιο αυτής της εργασίας ισχύει κατά κύριο λόγο για την περίπτωση όπου έχουμε ασυντόνιστους πομπούς. Αν και υποβέλτιστο, ένα τέτοιο μοντέλο ίσως να είναι επιλέξιμο σε περιπτώσεις όπου η επιβάρυνση που σχετίζεται με τον χρονοπρογραμματισμό είναι απαγορευτικά υψηλή, για παράδειγμα, λόγω των εξαιρετικά κινητών κόμβων, εκρηκτικής κίνησης, ή αυστηρών περιορισμών καθυστέρησης. Σημειώνουμε επίσης ότι το πλαίσιο αυτό έχει επεκταθεί σε **CSMA**, και τα κέρδη δεν είναι τόσο μεγάλα όσο του **Aloha**. Η προβολή του δικτύου σε μία μόνο συγκεκριμένη χρονική στιγμή, περιορίζει την δυνατότητά μας στο να υπολογίσουμε την απόδοση μίας απλής μεταπήδησης μετάδοσης με συγκεκριμένο προορισμό. Δηλαδή, η έρευνά μας είναι επάνω στο (ασυντόνιστο) **MAC** επίπεδο απόδοσης. Όμως το μοντέλο μας ούτε υποστηρίζει αλλά και ούτε αποκλείει οποιοδήποτε σύστημα δρομολόγησης πολλαπλής μεταπήδησης.

Επιπλέον, υποθέτουμε ότι σε κάθε πομπό αντιστοιχεί ένας δέκτης που βρίσκεται μακριά από αυτόν σε σταθερή απόσταση ίση με r (m). Το σύνολο των δεκτών είναι διαζευγμένο με το σύνολο των πομπών. Επειδή το δίκτυο είναι «απείρως» μεγάλο και χωρικά ομοιογενές, η στοχαστική ανέλιξη $\Pi(\lambda)$ δεν επηρεάζεται από την προσθήκη ενός ζεύγους πομπού—δέκτη. Και το πιο σημαντικό είναι ότι αυτό το ζεύγος είναι χαρακτηριστικό της παρούσας μοντελοποίησης με την έννοια του ότι οι επιδόσεις του ζεύγους αναφοράς ισοδυναμεί με τον μέσο όρο απόδοσης ανά κόμβο μέσα στο δίκτυο. Για ευνόητους λόγους, θέτουμε τον δέκτη αναφοράς στην αρχή των αξόνων αναφοράς (o), και τον πομπό αναφοράς σε απόσταση r μέτρων μακριά από την αρχή των αξόνων αναφοράς. Δείτε επίσης το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1. Οι θέσεις πομπών (οι μαύροι κύκλοι στο Σχήμα) κατανέμονται σύμφωνα με την ανέλιξη Poisson, Π . Σε κάθε πομπό έχει ανατεθεί ένας δέκτης (παρίστανται με γκρι κύκλους) που βρίσκεται σε απόσταση r από τους πομπούς. Η αναφορική ζεύξη επικοινωνίας διαθέτει δέκτη στην αρχή των αξόνων (παρίστανται με πράσινο) και έναν πομπό σε απόσταση r (παρίστανται με κόκκινο). Κάθε πομπός δημιουργεί παρεμβολές που εμφανίζονται στον δέκτη αναφοράς και συμβολίζονται με τις διακεκομμένες γραμμές.

Σημειώνουμε ότι οι θέσεις των άλλων δεκτών δεν είναι σημαντικές, επειδή η απόδοση του δέκτη αναφοράς εξαρτάται μόνο από τις θέσεις των πομπών. Κάθε πομπός υποτίθεται ότι μεταδίδει μία μοναδιαία ισχύ μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (με εξαίρεση την περίπτωση του ελέγχου ισχύος). Η στατιστική του καναλιού υποτίθεται ότι καθορίζεται αποκλειστικά από απώλεια διαδρομής και εξασθένιση, δηλαδή η λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση d είναι Hd^{-a} , όπου $a > 2$

είναι ο εκθέτης απώλειας διαδρομής και H είναι ο συντελεστής εξασθένησης. Όλοι οι συντελεστές εξασθένησης υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητοι και ομοιόμορφα κατανομημένοι (**iid**). Αυτό το απλοποιημένο μοντέλο έχει αποδειχθεί ότι είναι ικανό να συλλάβει την κεντρική ιδέα που σχετίζεται με εξάρτηση της απόστασης μεταξύ δεκτών και πομπών στα ad hoc δίκτυα καθώς επίσης και όποιες μικρές αλλαγές σε αυτό, όπως είναι, για παράδειγμα, η προσθήκη μίας σταθερής εξασθένησης ή η δέσμευση της ισχύος που λαμβάνεται να είναι μικρότερη της μονάδας, δεν επιφέρουν αισθητή βελτίωση της απόδοσης, δεδομένης της αύξησης της πολυπλοκότητας.

Οι παρεμβολές προσωμοιάζονται ως θόρυβος και υποθέτουμε ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (θερμικός θόρυβος) είναι αμελητέα. Επίσης, υποθέτουμε ότι η επιτυχία μετάδοσης καθορίζεται από το λόγο σήματος προς παρεμβολές συν το θόρυβο (**SINR**) εφόσον ο τελευταίος βρίσκεται πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο. Η υπόθεση του αμελητέου θερμικού θορύβου μπορεί εύκολα να αρθεί, αλλά με κόστος να καθιστά τις παραγόμενες μαθηματικές εκφράσεις πιο σύνθετες, χωρίς όμως τη βελτίωση της κατανόησης της όλης διαδικασίας.

1.2 Βασικοί ορισμοί: Διακοπή Λειτουργίας και Χωρητικότητα Μετάδοσης

Η πιθανότητα διακοπής (**OP**), η οποία συμβολίζεται με q , είναι η πιθανότητα ότι ο λόγος σήματος προς την παρεμβολή (**SIR**) στο δέκτη αναφοράς, είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο που απαιτείται για την επιτυχή λήψη:

$$q(\lambda) \equiv P(SIR < \beta) = P\left(\frac{Sr^{-a}}{\sum_{i \in \Pi(\lambda)} I_i |X_i|^{-a}}\right) = P\left(Y > \frac{1}{\beta}\right) \quad (1)$$

όπου $Y \equiv \frac{1}{Sr^{-a}} \sum_{i \in \Pi(\lambda)} I_i |X_i|^{-a}$ ορίζεται ως το σύνολο της παρεμβολής ισχύος στον δέκτη αναφοράς, κανονικοποιημένο με την ισχύ του σήματος, Sr^{-a} . Η τελευταία έκφραση στην (1) υπογραμμίζει το γεγονός ότι, υπό τη συνθήκη ότι ο συντελεστής ε , εξασθένησης είναι ίσος με S , η πιθανότητα διακοπής (**OP**) είναι η πιθανότητα

ουράς της συνολικής στάθμης παρεμβολής, που εκφράζεται ως ανέλιξη θορύβου βολής. Η τυχαιότητα εμφανίζεται στις θέσεις των παρεμβολών, $\{X_i\}$, και στους συντελεστές εξασθένισης, S και $\{I_i\}$. Η πιθανότητα διακοπής είναι μια συνάρτηση των $\alpha, \beta, \lambda, r$ και των στατιστικών που εμπλέκονται με την εξασθένιση του σήματος. Σημειώστε ότι q είναι η συνεχής και μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση της λ και ορίζεται μέσα στο διάστημα $[0, 1]$.

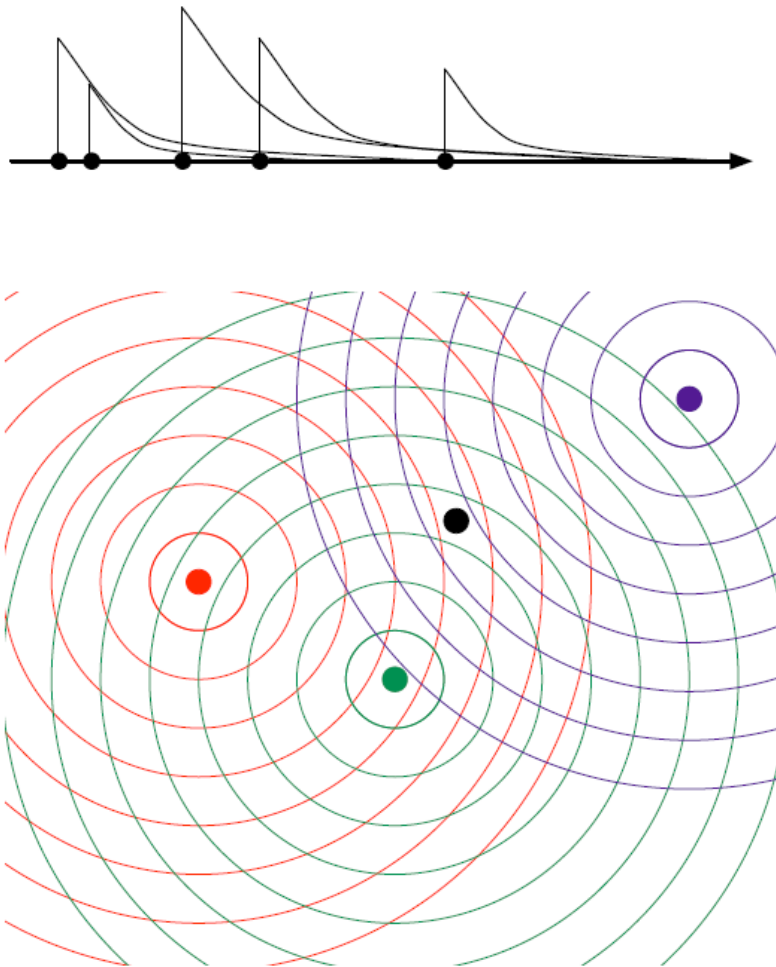
Χωρητικότητα μετάδοσης (**TC**). Είναι η πρωτογενής μετρική επίδοσης η οποία παίρνει την πιθανότητα διακοπής **OP** με επιδιωκόμενη τιμή ε ως παράμετρο, δηλαδή η TC δίνεται από:

$$c(\varepsilon) \equiv q^{-1}(\varepsilon)(1-\varepsilon), \quad \varepsilon \in (0,1). \quad (2)$$

Με άλλα λόγια, είναι ο ρυθμός μετάδοσης $q^{-1}(\varepsilon)$ που σχετίζεται με την πιθανότητα διακοπής (ίση με ε), μετασχηματισμένος με την πιθανότητα επιτυχίας, $1-\varepsilon$. Η ποσότητα ε είναι μετρική ποιότητας προσφερόμενων υπηρεσιών σε όλο το δίκτυο, εξασφαλίζοντας τυπικά την μετάδοση με πιθανότητα επιτυχίας ίση $1-\varepsilon$. Η χωρητικότητα μετάδοσης έχει μονάδες μέτρησης το πλήθος προσπαθειών μετάδοσης ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή, είναι μια μετρική του ρυθμού μετάδοσης στο δυσδιάστατο χώρο. Σημειώνουμε ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας $q(\lambda)$ ορίζεται για μία αυθαίρετη τιμή του ρυθμού μετάδοσης, και $c(\varepsilon)$ είναι απλά η τιμή του ρυθμού λ όταν $q(c(\varepsilon)/(1-\varepsilon)) = \varepsilon$. Ο ορισμός της χωρητικότητας μετάδοσης χαρακτηρίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως, i) η τιμή της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας στο σημείο $q = \varepsilon$, που παρέχει ένα χρήσιμο και απλό, αν και χονδροειδή, χαρακτηρισμό της απόδοσης του δικτύου, και ii) η χωρητικότητα μετάδοσης είναι εφαρμόσιμη ποσότητα και μπορεί να υπολογιστεί, ή τουλάχιστον να υπολογίζονται τα άνω και κάτω όριά της, για πολλές χρήσιμες παραμέτρους που αφορούν στο σχεδιασμό ενός ασύρματου αδόμητου δικτύου.

1.3 Θόρυβος βολής

Ο θόρυβος βολής (SN) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον **Schottky** το **1918** και είναι ουσιαστικά θόρυβος ο οποίος έχει φιλτραριστεί από ένα γραμμικό και χρονικά αναλλοίωτο σύστημα με κρουστική απόκριση $h(\cdot)$.



Σχήμα 2. (α) Χρονική ανέλιξη SN με $d = 1$. (β) Μια χωρική ανέλιξη SN με $d = 2$ στο πλαίσιο ενός ασύρματου αδόμητου δικτύου, είναι η υπέρθεση των παρεμβολών, όπου κάθε παρεμβολή είναι κατάλληλα εξασθενημένη από το αντίστοιχο κανάλι.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η διαδικασία ενός απλού θορύβου βολής. Παρακάτω ακολουθεί ένας γενικός ορισμός μιας διαδικασίας θορύβου βολής για διάσταση d .

Μια διαδικασία **SN** είναι μία πραγματική τυχαία διαδικασία $\sum(x)$, που συναρτάται με μια συνεχή παράμετρο $x \in \mathbb{R}^d$, δηλαδή είναι συναρτησιοειδής μιας (σταθερής στο χρόνο) σημειακής διαδικασίας $\Pi = \{x_i\} \subset \mathbb{R}^d$ όπου τώρα έχουμε:

$$\sum_{\Pi}^l(x) \equiv \sum_{i \in \Pi} h_i l(|x_i - x|), \quad x \in \mathbb{R}^d. \quad (3)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε το βασικό μοντέλο για τον υπολογισμό της διακοπής λειτουργίας και της χωρητικότητας μετάδοσης. Το ασύρματο κανάλι μεταξύ δύο κόμβων είναι μια ζεύξη με εξασθένηση χωρίς διαλείψεις. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η σημαντική ποσότητα για τον υπολογισμό της επίδοσης είναι ο λόγος **SINR**.

2.1 Ακριβή Αποτελέσματα

Τα σημεία της δυσδιάστατης ανέλιξης **2-D PPP** ρυθμού λ , δηλαδή, $\Pi(\lambda) = \{X_i\} \subset \mathbb{R}^2$, μπορούν να αντιστοιχηθούν σε μονοδιάστατη ανέλιξη **1-D PPP** μοναδιαίου ρυθμού. Ειδικότερα όταν έχουμε, $\pi\lambda|X_i|^2 \stackrel{\text{d}}{=} T_i$, όπου $|X_i|^2$ είναι το τετράγωνο της απόστασης από την αφετηρία του i -οστού πλησιέστερου πομπού, και T_i είναι η απόσταση από την αφετηρία του i -οστού πλησιέστερου σημείου μονοδιάστατης ανέλιξης **1-D PPP** με μοναδιαίο ρυθμό. Εφαρμόζοντας αυτή την κανονικοποιημένη ισχύ παρεμβολής Y στην (1), παίρνουμε:

$$Y = r^a \sum_{i \in \Pi(\lambda)} |X_i|^{-a} = (\pi\lambda)^{\frac{a}{2}} r^a \sum_{i \in \Pi(\lambda)} (\pi\lambda|X_i|^2)^{-\frac{a}{2}} = (\pi r^2 \lambda)^{\frac{a}{2}} \sum_{i \in \Pi_1(1)} T_i^{-\frac{a}{2}}, \quad (4)$$

όπου ο συμβολισμός $\Pi_1(1)$ δείχνει μια **1-D PPP** ρυθμού ίσο με 1. Η αντίστοιχη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας στην (1) γίνεται:

$$q(\lambda) = P\left(\left(\pi r^2 \lambda\right)^{\frac{a}{2}} \sum_{i \in \Pi_1(1)} T_i^{-\frac{a}{2}} > \frac{1}{\beta}\right) = P\left(Z_a > \frac{1}{\left(\pi r^2 \lambda\right)^{\frac{a}{2}} \beta}\right) = F_{Z_a}\left(\left(\left(\pi r^2 \lambda\right)^{\frac{a}{2}} \beta\right)^{-1}\right), \quad (5)$$

όπου $Z_a \equiv \sum_{i \in \Pi_1(1)} T_i^{-\frac{a}{2}}$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με κατανομή η οποία εξαρτάται μόνο από το a και $F_{Z_a}(\cdot)$ είναι η συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής (**CCDF**) του Z_a . Χρησιμοποιώντας την αντίστροφη συνάρτηση $F_{Z_a}^{-1}(\cdot)$ και επιλύοντας την $F_{Z_a} \left(\left((\pi r^2 \lambda)^{\frac{a}{2}} \beta \right)^{-1} \right) = \varepsilon$ ως προς λ , η χωρητικότητα μετάδοσης γράφεται ως:

$$C(\varepsilon) = \frac{\left(F_{Z_a}^{-1}(\varepsilon) \right)^{-\frac{a}{2}} (1-\varepsilon)}{\pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}}. \quad (6)$$

Αυτοί οι μετασχηματισμοί τονίζουν ότι η σημαντικότερη δυσκολία στον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και της χωρητικότητας μετάδοσης βρίσκεται στον υπολογισμό της κατανομής των σταθερών τυχαίων μεταβλητών Z_a . Τονίζεται εδώ ότι οι τιμές της $a (> 2)$ για τις οποίες η Z_a έχει κατανομή που δίνεται από κλειστού τύπου εκφράσεις είναι όταν $a = 4$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η αντίστροφη **Gaussian** κατανομή. Τα πρώτα σημαντικά αποτελέσματα για αυτή την ειδική περίπτωση, οφείλονται στους **Sousa** και **Silvester**. Ειδικότερα, δίνουν μια ακριβή έκφραση για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας, όσον αφορά την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της κανονικοποιημένης κανονικής τυχαίας μεταβλητής, $Q(z) = P(Z \leq z)$, με $Z \sim N(0,1)$:

$$q(\lambda) = 2Q \left(\sqrt{\pi/2} \lambda \pi r^2 \sqrt{\beta} \right) - 1. \quad (7)$$

Η αντίστοιχη ακριβής έκφραση για την χωρητικότητα μετάδοσης είναι η παρακάτω:

$$c(\varepsilon) = \frac{\sqrt{2/\pi} (1-\varepsilon) Q^{-1}((1+\varepsilon)/2)}{\pi r^2 \sqrt{\beta}}. \quad (8)$$

2.2 Κάτω όριο διακοπής: Κυρίαρχοι κόμβοι

Ένα κατώτερο όριο για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας επιτυγχάνεται, μέσω της κατανομής του συνόλου των παρεμβολών Π σε κυρίαρχους και μη-κυρίαρχους κόμβους. Ένας κόμβος i κυριαρχεί αν η συμβολή του στην συνολική παρεμβολή είναι από μόνη της ικανή για να προκαλέσει διακοπή λειτουργίας στο δέκτη. Ονομάζουμε κυρίαρχους κόμβους τους κοντινούς (n) κόμβους και μη κυρίαρχους κόμβους τους μακρινούς (f), επειδή οι κυρίαρχοι κόμβοι πρέπει να είναι σε κάποια κοντινή απόσταση από την αφετηρία, και οι μη κυρίαρχοι κόμβοι πρέπει να είναι αρκετά μακριά από την αφετηρία. Οι κυρίαρχοι κόμβοι μπορούν να οριστούν γεωμετρικά καθώς οι παρεμβολές βρίσκονται μέσα στη διατομή μιας σφαίρας με κέντρο την αφετηρία και ακτίνα ίση με $\beta^{\frac{1}{a}}r$:

$$\Pi^n(\lambda) \equiv \left\{ X_i : \frac{r^{-a}}{|X_i|^{-a}} < \beta \right\} = \left\{ X_i : |X_i| < \beta^{\frac{1}{a}}r \right\} = \Pi(\lambda) \cap b\left(o, \beta^{\frac{1}{a}}r\right). \quad (9)$$

Εδώ το σύνολο $b(o, d) = \{x \in \mathbb{R}^2 : \|x\| \leq d\}$ υποδηλώνει την σφαίρα με κέντρο το σημείο o και ακτίνα ίση με d . Η συνολική παρεμβολή, κανονικοποιημένη με τη λαμβανόμενη r^{-a} ισχύ του σήματος, μπορεί να χωριστεί σε δυο σύνολα, ένα των κυρίαρχων και άλλο ένα των μη-κυρίαρχων παρεμβολών:

$$Y \equiv \frac{1}{r^{-a}} \sum_{i \in \Pi(\lambda)} |X_i|^{-a}, \quad Y^n \equiv \frac{1}{r^{-a}} \sum_{i \in \Pi^n(\lambda)} |X_i|^{-a}, \quad Y^f \equiv \frac{1}{r^{-a}} \sum_{i \notin \Pi^n(\lambda)} |X_i|^{-a}, \quad (10)$$

όπου $Y = Y^n + Y^f$. Το κάτω όριο επιτυγχάνεται αγνοώντας την μη κυρίαρχη παρεμβολή:

$$q(\lambda) = P\left(Y^n + Y^f > \frac{1}{\beta}\right) > P\left(Y^n > \frac{1}{\beta}\right) \equiv q^i(\lambda). \quad (11)$$

Σημειώνουμε ότι, σύμφωνα με τις υποθέσεις που έχουμε κάνει, το γεγονός $\left\{Y^n > \frac{1}{\beta}\right\}$ είναι ίδιο με το γεγονός $\{\Pi^n(\lambda) \neq \emptyset\}$, το οποίο είναι απλά το

συμπλήρωμα του γεγονότος που συνδέεται με την πιθανότητα αποκοπής για ανέλιξη **Poisson**:

$$q'(\lambda) = 1 - P(\Pi^n(\lambda) = \emptyset) = 1 - e^{-\lambda b \left(\frac{1}{\beta^a r} \right)} = 1 - e^{-\lambda \pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}}. \quad (12)$$

Με την επίλυση της $q'(\lambda) = \varepsilon$ για λ , παίρνουμε ένα άνω όριο για την $q^{-1}(\varepsilon)$, το οποίο με τη σειρά του παράγει ένα άνω όριο για την τιμή της χωρητικότητας μετάδοσης:

$$c^n(\varepsilon) = \frac{(1-\varepsilon)\log(1-\varepsilon)^{-1}}{\pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}} = \frac{1}{\pi \left(\frac{r \beta^{\frac{1}{a}}}{\sqrt{\varepsilon}} \right)^2} + O(\varepsilon^2) \text{ όπου } \varepsilon \rightarrow 0. \quad (13)$$

Η δεξιά πλευρά της (13) λαμβάνεται με την παρατήρηση ότι ο πρώτος όρος αναπτύγματος του **Taylor** του $(1-\varepsilon)\log(1-\varepsilon)^{-1}$ γύρω από το $\varepsilon=0$ ισούται με $\varepsilon + O(\varepsilon^2)$, όπου το $O(\cdot)$ είναι ο τυπικός συμβολισμός για το «μεγάλο» O . Αγνοώντας τον όρο $O(\varepsilon^2)$ ο απομείναντας όρος δίνει σφάλμα $\varepsilon - (1-\varepsilon)\log(1-\varepsilon)^{-1} \approx 0.005$ για $\varepsilon=0.1$.

2.3 Άνω όριο διακοπής: Φράγματα Markov, Chebyshev και Chernoff

Το γεγονός της διακοπής λειτουργίας στην (11) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$q(\lambda) = P\left(\left\{ Y^n > \frac{1}{\beta} \right\} \cup \left\{ Y^f > \frac{1}{\beta} \right\} \cup \left\{ Y^n \leq \frac{1}{\beta}, Y^f \leq \frac{1}{\beta}, Y^n + Y^f > \frac{1}{\beta} \right\} \right). \quad (14)$$

Με άλλα λόγια, το γεγονός $\{Y^n + Y^f > 1/\beta\}$ σημαίνει ότι είτε η Y^n είτε η Y^f ξεχωριστά η καθεμία υπερβαίνει το όριο $1/\beta$, ή και οι δύο μαζί είναι κάτω από το $1/\beta$, αλλά το άθροισμά τους όμως υπερβαίνει το $1/\beta$. Σύμφωνα με τις υποθέσεις που έχουμε κάνει, ωστόσο, το γεγονός $\{Y^n \leq 1/\beta\}$ είναι ίδιο με το γεγονός

$\{Y^n = 0\}$, το οποίο σημαίνει ότι η τρίτη περίπτωση στην (14) είναι ανέφικτη. Η πιθανότητα των υπολοίπων δύο πρώτων γεγονότων μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$q(\lambda) = P\left(Y^n > \frac{1}{\beta}\right) + P\left(Y^f > \frac{1}{\beta}\right) - P\left(Y^n > \frac{1}{\beta}\right)P\left(Y^f > \frac{1}{\beta}\right) = q'(\lambda) + (1 - q'(\lambda))P\left(Y^f > \frac{1}{\beta}\right), \quad (15)$$

όπου έχουμε λάβει υπόψη την ανεξαρτησία των Y^n, Y^f και εφαρμόσει τον ορισμό της $q'(\lambda)$ στην (11). Αντικαθιστώντας την (12) για την $q'(\lambda)$ στην (15), παίρνουμε ένα άνω όριο για την $q(\lambda)$ μέσα από ένα ανώτατο όριο για την $P\left(Y^f > 1/\beta\right)$.

Προς το παρόν δίνουμε τρία τέτοια όρια, χρησιμοποιώντας τις **Markov** και **Chebychev** ανισότητες καθώς επίσης και το όριο **Chernoff**. Αν και οι λεπτομέρειες της ανάλυσης που ακολουθεί διαφέρει για καθένα από τα τρία όρια, οι γενικές τεχνικές είναι οι ίδιες: βρίσκουμε το άνω όριο της $P\left(Y^f > 1/\beta\right)$ μέσα από την κατάλληλη ανισότητα, και κατόπιν το αντικαθιστούμε στην (15), και στη συνέχεια αναζητούμε μια απλή έκφραση που δίνει το άνω όριο της προκύπτουσας έκφρασης.

Η ανισότητα **Markov** μας δίνει την $P\left(Y^f > 1/\beta\right) \leq \beta E[Y^f]$. Το θεώρημα του **Campbell** ορίζει ότι, εφόσον τα $\{X_i\}$ είναι τα σημεία που προέρχονται από μια ανέλιξη **Poisson** με πιθανώς μεταβαλλόμενο ρυθμό $\lambda(x)$, τότε έχουμε ότι:

$$E\left[\sum_{i \in \Pi} f(X_i)\right] = \int_{\mathbb{R}^2} f(x) \lambda(dx). \quad (16)$$

Εφαρμόζοντας την (16) για να υπολογίσουμε την $E[Y^f]$ και κάνοντας αλλαγή συντεταγμένων σε πολικές συντεταγμένες, τελικά παίρνουμε:

$$E[Y^f] = E\left[\frac{1}{r^{-a}} \sum_{i \in \Pi \cap \bar{b}(0,s)} |X_i|^{-a}\right] = r^a \int_s^\infty t^{-a} \lambda 2\pi t dt = \frac{2\pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}-1}}{a-2} \lambda \equiv \mu \lambda, \quad (17)$$

όπου $s = \beta^{\frac{1}{a}} r$. Πολλαπλασιάζοντας την (17) με την β και σε συνδυασμό με την (15), βρίσκουμε ότι ένα άνω όριο διακοπής είναι το παρακάτω:

$$q(\lambda) \leq q^{u, Markov}(\lambda) = \left(1 - e^{-\lambda \pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}}\right) + e^{-\lambda \pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}} \frac{2\pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}}{a-2} \lambda. \quad (18)$$

Χρησιμοποιώντας τα όρια $1 - e^{-A} \leq A$ και $e^{-A} \leq 1$ για $A > 0$ και κάνοντας απλούστευση, μας δίνει ένα άνω όριο σύμφωνα με την ανισότητα **Markov**:

$$q^{u,Markov}(\lambda) \leq \pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}} \lambda + \frac{2\pi r^2 \beta}{a-2} \lambda = \frac{a}{a-2} \pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}} \lambda. \quad (19)$$

Θέτοντας την (19) είναι ίση με το ε και επιλύοντας για λ , παίρνουμε ένα απλοποιημένο κάτω όριο σύμφωνα με την ανισότητα **Markov** για τη χωρητικότητα μετάδοσης:

$$c^{l,Markov}(\varepsilon) = \frac{a-2}{a} \frac{\varepsilon}{\pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}} + O(\varepsilon^2) \quad \text{ενώ το } \varepsilon \rightarrow 0, \quad (20)$$

το οποίο είναι σαφώς μικρότερο από τη χωρητικότητα μετάδοσης του άνω ορίου κατά ένα συντελεστή ίσο με $(a-2)/a$. Η δεξιά πλευρά της (20) υπολογίζεται με την παρατήρηση, ότι το ανάπτυγμα κατά **Taylor** του $\varepsilon(1-\varepsilon)$ γύρω από το $\varepsilon=0$ ισούται με $\varepsilon + O(\varepsilon^2)$. Αγνοώντας τον όρο $O(\varepsilon^2)$, έχουμε ένα σφάλμα $\varepsilon - \varepsilon(1-\varepsilon) = \varepsilon^2 = 0.01$ για $\varepsilon = 0.1$. Το θεώρημα του **Campbell** μας δίνει επίσης τη διασπορά (με προσέγγιση μακρινού πεδίου) για την συνολική παρεμβολή:

$$Var(Y^f) = E \left[\frac{1}{r^{-2a}} \sum_{i \in \Pi \cap \bar{b}(0,s)} (|X_i|^{-a})^2 \right] = \lambda r^{2a} \int_s^\infty t^{-2a} 2\pi t dt = \frac{\pi r^2 \beta^{a-2}}{a-1} \lambda \equiv \sigma^2 \lambda. \quad (21)$$

Αντικαθιστούμε την (17) στην (21) και ταυτόχρονα χρησιμοποιούμε την ανισότητα του **Chebyshev** υποθέτοντας ότι $E[Y^f] < \frac{1}{b}$, για να πάρουμε το παρακάτω αποτέλεσμα:

$$P \left(Y^f > \frac{1}{\beta} \right) \leq P \left(\left| Y^f - E[Y^f] \right| > \frac{1}{\beta} - E[Y^f] \right) \leq \frac{\sigma^2 \lambda}{\left(\frac{1}{\beta} - \mu \lambda \right)^2}. \quad (22)$$

Αντικαθιστώντας την (22) στην (15) και χρησιμοποιώντας τα όρια $1 - e^{-A} \leq A$ και $e^{-A} \leq 1$ για $A > 0$ και απλουστεύοντας, έχουμε ένα απλουστευμένο άνω όριο **Chebychev**:

$$q^{u, Chebychev}(\lambda) \leq \pi r^2 \beta^{\frac{2}{\alpha}} \lambda + \frac{\pi r^2 \beta^{\frac{2}{\alpha}-2} \lambda}{\alpha - 1} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{2\pi r^2 \beta^{\frac{2}{\alpha}-1} \lambda}{\alpha - 2} \right)^2 \quad (23)$$

Αυτή η έκφραση είναι τετραγωνική ως προς λ . Θέτοντάς την ίση με το ε και επιλύοντας ως προς λ μας δίνει το απλουστευμένο κατώτερο όριο **Chebychev** της χωρητικότητας μετάδοσης. Το όριο **Chernoff** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη ενός άνω ορίου για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας:

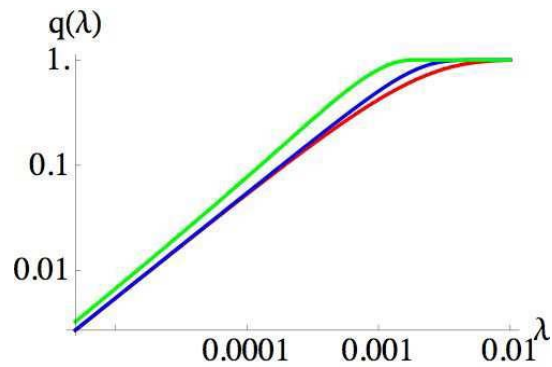
$$P\left(Y^f > \frac{1}{\beta}\right) \leq \inf_{\theta \geq 0} E\left[e^{\theta Y^f}\right] e^{-\theta \frac{1}{\beta}} = \exp\left\{-\sup_{\theta \geq 0} \left(\theta \frac{1}{\beta} - 2\pi\lambda \int_{\frac{1}{\beta^a}}^{\infty} (e^{\theta r^a x^{-a}} - 1) x dx\right)\right\}. \quad (24)$$

Η έκφραση της (24) μπορεί να επιτευχθεί με τον υπολογισμό της ροπογεννήτριας της Y^f η οποία περιορίζεται από πάνω με την $b(o, u)$ και στη συνέχεια θέτουμε $u \rightarrow \infty$, όπως στις εργασίες [10] και [36]. Τελικά, το ανώτατο όριο για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας είναι:

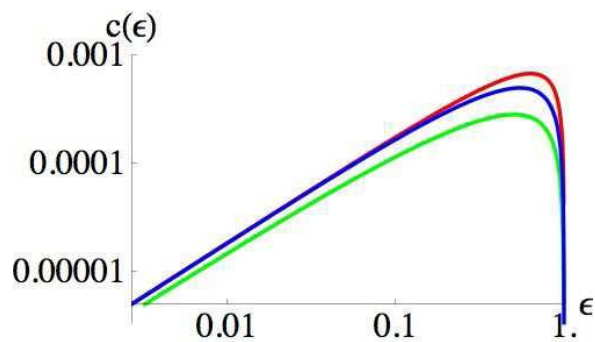
$$q^{u, Chernoff}(\lambda) \equiv 1 - \left(1 - \exp\left\{-\sup_{\theta \geq 0} \left(\frac{\theta}{\beta} - 2\pi\lambda \int_{\frac{1}{\beta^a}}^{\infty} (e^{\theta r^a x^{-a}} - 1) x dx\right)\right\}\right) e^{-\lambda \pi r^2 \beta^{\frac{2}{a}}}. \quad (25)$$

Αν και η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας άνω ορίου **Chernoff** είναι σε ορισμένες περιπτώσεις ακριβέστερη από τα αντίστοιχα μέσω των ανισοτήτων **Markov** ή **Chebychev**, επειδή η εύρεσή της εξαρτάται από την λ με ένα περίπλοκο τρόπο, είναι αδύνατο να υπολογισθεί μια κλειστής μορφής έκφραση για το αντίστοιχο κατώτατο όριο της χωρητικότητας μετάδοσης. Στην περίπτωση αυτή, ανάστροφες αριθμητικές μέθοδοι πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Τα κάτω και άνω όρια καθώς

επίσης και οι ακριβείς εκφράσεις τόσο για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας όσο και για τη χωρητικότητα μετάδοσης φαίνονται στο Σχήμα. 3.



Σχήμα 3. (α): Πιθανότητα διακοπής $q(\lambda)$ έναντι ρυθμού μετάδοσης λ για το βασικό μοντέλο με $\alpha = 4$, $\beta = 3$ και $r = 10$ μέτρα. Οι τρεις γραμμές είναι το κατώτερο όριο, η ακριβής πιθανότητα διακοπής και το ανώτερο όριο (Chernoff).



Σχήμα 3. (β): Χωρητικότητα μετάδοσης $c(\varepsilon)$ έναντι της απαίτησης διακοπής που υπολογίσθηκε αντιστρέφοντας την έκφραση για την πιθανότητα διακοπής καθώς επίσης και τα άνω και κάτω όρια διακοπής.

2.4 Μέθοδος βελτίωσης κάτω ορίου: Υπό-εκθετικές κατανομές

Συγκρίνοντας την τιμή του κατώτερου ορίου της (12) με αυτήν του ανώτερου ορίου (25), και ρίχνοντας μια ματιά στο σχήμα. 3, είναι προφανές ότι το (απλό) κατώτερο όριο διακοπής είναι πιο ακριβές από το (πολυπλοκότερο) ανώτερο όριο. Μια εξήγηση για αυτό το φαινόμενο προέρχεται από το γεγονός ότι η τυχαία παρεμβολή του κάθε κόμβου κατανέμεται σύμφωνα με κάποια υπό-εκθετική κατανομή. Υποθέτουμε ότι έχουμε n σημεία που είναι κατανεμημένα ανεξάρτητα και ομοιόμορφα πάνω σε ένα κύκλο ακτίνας d με κέντρο την αρχή εκκίνησης, και τα οποία συμβολίζονται με $\{X_1, \dots, X_n\}$. Είναι απλό να προσδιορισθεί η συμπληρωματική συνάρτηση αθροιστικής κατανομής των τυχαίων παρεμβολών,

$V = |X|^{-a}$, και η οποία είναι η $\bar{F}_V(u) = \left(u^{\frac{1}{a}} d\right)^{-2}$ για $u \geq d^{-a}$. Μια επαρκής

προϋπόθεση για μια κατανομή να είναι υπό-εκθετική είναι να ικανοποιείται η

$\limsup_{u \rightarrow \infty} uhv(u) < \infty$, όπου $hv(u) \equiv \frac{d}{du}(-\log \bar{F}_V(u))$ είναι η συνάρτηση hazard rate.

Στην περίπτωση μας, θέτουμε $uhv(u) = \frac{2}{a}$ εξασφαλίζοντας έτσι την \bar{F}_V να είναι

υπό-εκθετική. Ένα καθοριστικό χαρακτηριστικό των υπό-εκθετικών κατανομών, είναι το γεγονός ότι τα αθροίσματα των ανεξάρτητων και ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών $\{V_1, \dots, V_n\}$ τυπικά επιτυγχάνουν συνήθως μεγάλες τιμές για την u , με το να έχουν ένα ή και περισσότερα μεγάλα ορίσματα αθροίσματος (σε αντιδιαστολή με την περίπτωση ενός μεγάλου αριθμού από μεσαίου μεγέθους ορισμάτων αθροίσματος):

$$\lim_{u \rightarrow \infty} \frac{P(V_1 + \dots + V_n > u)}{P(\max\{V_1, \dots, V_n\} > u)} = 1, \quad n \geq 2 \quad (26)$$

Επειδή οι παρεμβολές από κάθε κόμβο είναι υπό-εκθετικές, προκύπτει ότι η πιθανότητα ενός γεγονότος διακοπής $\{V_1 + \dots + V_n > u\}$ (για μεγάλες τιμές του u) ισούται περίπου με την πιθανότητα να υπάρχουν ένας ή περισσότεροι κυρίαρχοι κόμβοι με $V_i > u$. Κάνοντας αντικατάσταση του αθροίσματος $\sum_{i \in \pi(\lambda)} |X_i|^{-a}$ στην (1)

με το άθροισμα $\sum_{i=1}^n |X_i|^{-a}$ παίρνουμε $u = r^{-a} \frac{1}{\beta}$. Άρα, το u έχει μεγάλες τιμές εάν,

είτε το β είναι μικρό (ο δέκτης μπορεί να αποκωδικοποιήσει τις μικρές τιμές του **SIR**) είτε το r είναι μικρό (δηλαδή, ο πομπός και ο αντίστοιχος δέκτης βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους). Όταν η τιμή της u είναι μικρή (πράγμα που σημαίνει ότι και τη β αλλά και η r παίρνουν σχετικά μεγάλες τιμές), η διακοπή συμβαίνει πιο εύκολα, και συγκεκριμένα η διακοπή μπορεί να συμβεί λόγω της μεγάλης συνολικής παρεμβολής, παρόλο που ίσως να μην υπάρχουν καθόλου κυρίαρχοι κόμβοι. Αυτό το επιχείρημα ισχύει για σταθερές τιμές των d και n , αλλά δίνει τη διαίσθηση ως προς το γιατί το κατώτερο όριο της κυρίαρχης παρεμβολής είναι σαφώς βελτιωμένο.

2.5 Βελτιστοποίηση κατώφλιού του λόγου SINR και του περιορισμού διακοπής

Το κατώφλι β του λόγου **SINR** και ο περιορισμός διακοπής ε , μεταβλητές που αντιμετωπίζονται ως σταθερές στο πλαίσιο της χωρητικότητας μετάδοσης, είναι γενικά υπό τον έλεγχο του σχεδιαστή του συστήματος και θα πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του συστήματος. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η μεγιστοποίηση της περιοχής της φασματικής απόδοσης $c(\varepsilon)\log_2(1+\beta)$, δηλαδή το γινόμενο της χωρικής πυκνότητας και της φασματικής επάρκειας. Χρησιμοποιώντας την (6), η κοινή μεγιστοποίηση των δύο παραμέτρων (β, ε) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\max_{\beta, \varepsilon} c(\varepsilon)\log_2(1+\beta) = \max_{\beta, \varepsilon} \frac{\left(\bar{F}_{Za}^{-1}(\varepsilon)\right)^{\frac{2}{a}}(1-\varepsilon)}{\pi r^2 \beta^a} \log_2(1+\beta). \quad (27)$$

Η έκφραση της (27) επιτρέπει σαφώς ξεχωριστές μεγιστοποιήσεις των β και ε :

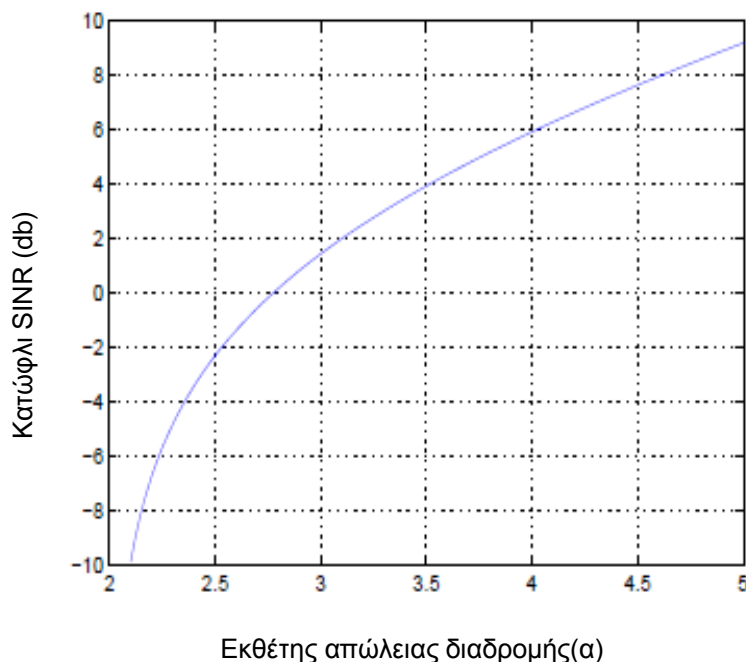
$$\beta^* = \arg \max_{\beta} \frac{\log_2(1+\beta)}{\beta^a}, \varepsilon^* = \arg \max_{\varepsilon} \left(\bar{F}_{Za}^{-1}(\varepsilon)\right)^{\frac{2}{a}}(1-\varepsilon), \quad (28)$$

όπου οι βέλτιστες τιμές β^* και ε^* εξαρτώνται μόνο από την εκάστοτε ή επιλεγείσα τιμή του συντελεστή απώλειας a . Στην αναφορά [11, Section IV], όπου μελετάται

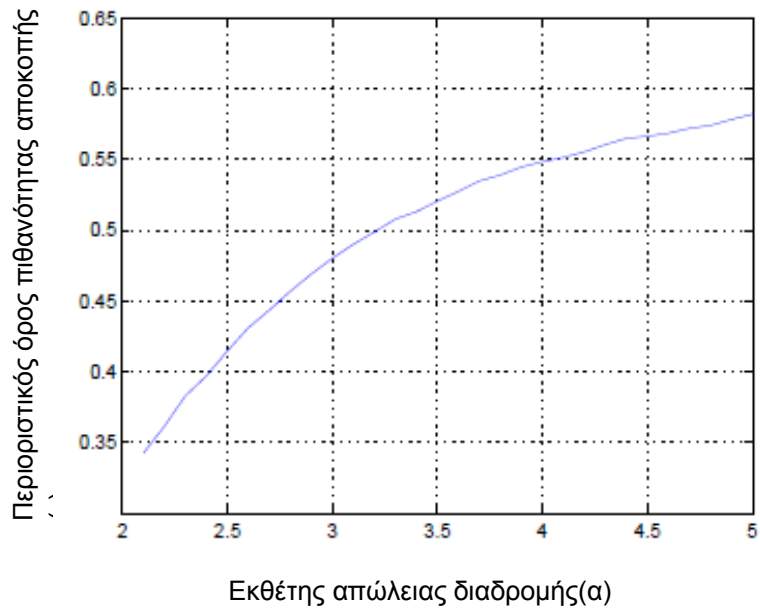
ένα σχετικό αλλά ελαφρώς διαφορετικό πρόβλημα, βρέθηκε μια λύση κλειστής μορφής για την β^* :

$$\beta^* = e^{\frac{a}{2} + W\left(\frac{a}{2}e^{\frac{a}{2}}\right)} - 1 \quad (29)$$

όπου $W(z)$ είναι ο κύριος κλάδος της συνάρτησης W του **Lambert**. Δυστυχώς, η $\bar{F}_{Za}(\cdot)$ δεν έχει κλειστή μορφή, και ως εκ τούτου η ε πρέπει να προσδιοριστεί αριθμητικά. Στο Σχήμα. 4 οι β^* και ε^* παριστάνονται γραφικώς ως συνάρτηση του a , και είναι εμφανές ότι είναι αύξουσες συναρτήσεις της a . Η β^* είναι σύμφωνη με τις συνήθεις λειτουργικές φασματικές αποδοτικότητες, ενώ η ε^* υποδεικνύει ότι η βέλτιστη τιμή της ε , που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα μετάδοσης, μπορεί να είναι απρόσμενα μεγάλη. Παρά το γεγονός ότι μια τόσο μεγάλη διακοπή διαθέτει μεγάλη φασματική επάρκεια, αυτό επίσης μεταφράζεται σε απευθείας μεγάλες καθυστερήσεις μεταδόσεων και ανεπάρκεια ενέργειας. Η ανάλυση αυτή αναδεικνύει ένα βασικό μειονέκτημα στην απεριόριστη (χωρική) μεγιστοποίηση απόδοσης: το μέγιστο σημείο απόδοσης λειτουργίας μπορεί να δώσει απρόσμενα μεγάλη τιμή για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας. Στο πλαίσιο της χωρητικότητας μετάδοσης αποτυπώνεται η παραπάνω σχέση ως εξής. Η TC μας παρέχει τη μέγιστη χωρική απόδοση που υπόκεινται σε έναν συγκεκριμένο περιορισμό της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας.



Σχήμα 4α. Βελτιστοποιημένο όριο του κατωφλιού β έναντι του εκθέτη απώλειας διαδρομής a .



Σχήμα 4β. Βέλτιστη τιμή του περιοριστικού όρου της πιθανότητας αποκοπής, ε , έναντι του εκθέτη απώλειας διαδρομής α .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Αν και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία έχουν δείξει σε μεγάλο βαθμό την σημασία της χωρητικότητας μετάδοσης, όμως η συγκεκριμένη ανάλυση δεν παρέχει αποτελέσματα για δύο σημαντικές πτυχές των *ad hoc* δικτύων. Η πρώτη πτυχή είναι η υπόθεση της απλής μεταπήδησης. Η συγκεκριμένη υπόθεση μπορεί να είναι αποδεκτή για δίκτυα με μη αδειοδοτημένη παροχή φάσματος ή για άλλα αποκεντρωμένα δίκτυα, αλλά σημειώνεται ότι τα δίκτυα *ad hoc* πρέπει να δρομολογούνται από την πηγή μέχρι τον προορισμό, χρησιμοποιώντας συχνά πολλαπλές μεταπηδήσεις μέσω ενδιάμεσων κόμβων. Ένα δίκτυο με μεγάλη τιμή για την απλή μεταπήδηση μεταξύ των κόμβων του, θα πρέπει να είναι σε θέση να επιτύχει υψηλότερη από άκρο σε άκρο χωρητικότητα μετάδοσης από ένα δίκτυο με μικρότερη χωρητικότητα μετάδοσης επειδή περισσότερη ταυτόχρονη μετάδοση είναι δυνατή. Ωστόσο, σημαντικά ζητήματα όπως το επιθυμητό μήκος μεταπήδησης, ο αριθμός των μεταπηδήσεων, οι διαδρομές πολλαπλής μεταπήδησης, και η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση στην παρούσα εργασία δεν εξετάζονται. Επιπλέον, ο θόρυβος δεν πρέπει να αγνοηθεί, δεδομένου ότι η λειτουργία της αρχής της πολλαπλής μεταπήδησης είναι η αύξηση του λόγου **SNR** για κάθε μεταπήδηση.

Η δεύτερη πτυχή που λείπει από την παρούσα εργασία είναι η μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας ανελίξεις που δεν είναι **Poisson**. Η κατανομή των κόμβων υποτίθεται ότι ακολουθεί το κλασικό μοντέλο **PPP** για λόγους καθαρά απλούστευσης ως προς την εύρεση χρήσιμων μετρικών. Όπως είναι γνωστό, η ανελίξη **Poisson** μοντελοποιεί μόνο ασυντόνιστες μεταδόσεις (βλέπε, πρωτόκολλο **Aloha**). Μια γνωστή εναλλακτική λύση είναι να προγραμματίσουμε την ταυτόχρονη μετάδοση με στόχο τον έλεγχο των σταθμών της παρεμβολής. Οι τοπικοί μηχανισμοί προγραμματισμού γενικά διαφέρουν από τον ιδανικό μηχανισμό ταυτόχρονης μετάδοσης όπου οι πομποί-παρεμβολείς κατανέμονται σύμφωνα με τη δυσδιάστατη ανελίξη **Poisson**, αλλάζοντας έτσι σημαντικά την στατιστική κατανομή της παρεμβολής.

Συνεπώς, παραμένουν αναπάντητα πολλά ζητήματα που αφορούν στην κατανόηση των αντικρουόμενων κριτηρίων σχεδιασμού όπως, για παράδειγμα, της ανταλλαγής μεταξύ των διαφόρων πλεονεκτημάτων με το κόστος των διαφόρων μηχανισμών προγραμματισμού δρομολόγησης/προσδιορισμού των κατάλληλων τεχνικών για διάφορες ρυθμίσεις δικτύου. Επιπλέον, μια θεμελιώδης ιδιότητα που ισχύει ακόμη και για προγραμματισμένα συστήματα, είναι ότι οι μεταδόσεις καταλαμβάνουν χώρο και οι παρεμβολές πως αντιμετωπίζονται ως θόρυβος. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι η χωρητικότητα μετάδοσης έχει ένα πλεονέκτημα στο συγκεκριμένο θέμα και ότι πολλές από τις έννοιες που συνδέονται με αυτήν εφαρμόζονται σε χρονικά προγραμματισμένα συστήματα επίσης.

Γενικότερα, όπως ισχύει για κάθε περίπλοκο ερευνητικό θέμα, κάθε προτεινόμενο μοντέλο έχει τα πλεονεκτήματά του και τα μειονεκτήματά του, που συνήθως έχουν να κάνουν με την επιλογή μεταξύ εξιδανίκευσης η οποία απλουστεύει την επίλυση συγκεκριμένων υπαρκτών ζητημάτων, αποτελέσματα που όμως είναι χρήσιμα, και της γενικότητας, η οποία επιδιώκει τη γενίκευση των απλουστευμένων αποτελεσμάτων και ουσιαστικά την αναγωγή τους σε ένα πραγματικό πλαίσιο λειτουργικότητας. Το παρόν πλαίσιο της χωρητικότητας μετάδοσης σαφώς ανήκει στο απλουστευμένο μοντέλο, αλλά παρόλα αυτά παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τον σχεδιασμό κινητών και ασύρματων δικτύων και αποτελεί την αφετηρία για την αναζήτηση γενικευμένων τεχνικών χρήσιμων για την ανάλυση υπαρκτών *ad hoc* δικτύων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Ακρωνύμια.

CCDF	Συμπληρωματική συνάρτηση αθροιστικής κατανομής
CDF	Συνάρτηση αθροιστικής κατανομής
iid	Ανεξάρτητα και Ομοιόμορφα Κατανεμημένα
OP	Πιθανότητα Διακοπής Λειτουργίας
PPP	Σημειακή διαδικασία Poisson
RV	Τυχαία μεταβλητή
Rx	Δέκτης
SINR	Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο
SIR	Λόγος σήματος προς παρεμβολή
SN	Θόρυβος βολής
TC	Χωρητικότητα Μετάδοσης
Tx	Πομπός

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Συμβολισμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία.

$a \equiv b$	Το a ορίζεται να είναι ίσο με το b
λ	Ρυθμός μετάδοσης (ανά m^2)
$\Pi = \{X_i\}$	Σημειακή διαδικασία Poisson (PPP) όπου ο ρυθμός μετάδοσης των δεκτών είναι ίσος με λ
a	Εκθέτης απωλειών διαδρομής ($a > 2$)
β	Προκαθορισμένη τιμή του SIR/SINR για επιτυχή λήψη
r	Απόσταση που χωρίζει κάθε $Tx - Rx$ ζεύγος
$q(\lambda)$	Πιθανότητα Διακοπής (OP)
ε	Περιορισμός στην πιθανότητα διακοπής (OP)
$c(\varepsilon)$	Χωρητικότητα Μετάδοσης (TC)
ρ	Ισχύς μετάδοσης

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Weber, X. Yang, J. Andrews, and G. de Veciana, "Transmission capacity of wireless ad hoc networks with outage constraints," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 12, pp. 4091–4102, December 2005.
- [2] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic Geometry and Its Applications, 2nd Edition*. John Wiley and Sons, 1996.
- [3] J. F. C. Kingman, *Poisson Processes*. Oxford University Press, 1993.
- [4] K. Stamatiou, J. Proakis, and J. Zeidler, "Information efficiency of ad hoc networks with FH-MIMO transceivers," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Glasgow, Scotland, June 2007.
- [5] J. Blomer and N. Jindal, "Transmission capacity of wireless ad hoc networks: successive interference cancellation vs. joint detection," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany, June 2009.
- [6] K. Huang, V. K. N. Lau, and Y. Chen, "Spectrum sharing between cellular and mobile ad hoc networks: transmission-capacity trade-off," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, September 2009.
- [7] C. Yin, L. Gao, T. Liu, and S. Cui, "Transmission capacities for overlaid wireless ad hoc networks with outage constraints," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany, June 2009.
- [8] R. Louie, M. McKay, and I. Collings, "Spatial multiplexing with MRC and ZF receivers in ad hoc networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany, June 2009.
- [9] J. Andrews, S. Weber, and M. Haenggi, "Ad hoc networks: to spread or not to spread?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 12, pp. 84–91, December 2007.
- [10] S. Weber, J. Andrews, X. Yang, and G. de Veciana, "Transmission capacity of wireless ad hoc networks with successive interference cancellation," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 8, pp. 2799–2814, August 2007.
- [11] N. Jindal, J. G. Andrews, and S. Weber, "Bandwidth partitioning in decentralized wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 5408–5419, December 2008.
- [12] V. Chandrasekhar and J. Andrews, "Spectrum allocation in tiered cellular networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 10, pp. 5314–5327, October 2009.
- [13] S. Weber, J. Andrews, and N. Jindal, "The effect of fading, channel inversion, and threshold scheduling on ad hoc networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 11, pp. 4127–4149, November 2007.
- [14] N. Jindal, S. Weber, and J. G. Andrews, "Fractional power control for decentralized wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 5482–5492, December 2008.
- [15] A. Hunter, J. Andrews, and S. Weber, "The transmission capacity of ad hoc networks with spatial diversity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 5058–5071, December 2008.
- [16] K. Huang, J. Andrews, R. Heath, D. Guo, and R. Berry, "Spatial interference cancellation for multi-antenna mobile ad hoc networks," *submitted in July, 2008 to IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, arXiv:0807.1773v1 [cs.IT].

- [17] K. Stamatiou, J. Proakis, and J. Zeidler, "Evaluation of MIMO techniques in frequency hopped-multi-access ad hoc networks," in *Proceedings of IEEE Globecom*, Washington, D.C., November 2007.
- [18] M. Kountouris and J. Andrews, "Transmission capacity scaling of SDMA in wireless ad hoc networks," in *IEEE Information Theory Workshop*, Taormina, Italy, October 2009.
- [19] N. Jindal, J. Andrews, and S. Weber, "Rethinking MIMO for wireless networks: linear throughput increases with multiple receive antennas," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, Dresden, Germany, June 2009.
- [20] A. Hunter and J. Andrews, "Adaptive rate control over multiple spatial channels in ad hoc networks," in *Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SPASWIN)*, Berlin, Germany, April 2008.
- [21] R. Vaze and R. W. Heath, "Transmission capacity of ad-hoc networks with multiple antennas using transmit stream adaptation and interference cancelation," *Submitted to, IEEE Trans. on Info. Theory: arxiv.org/abs/0912.2630*, 2010.
- [22] M. Haenggi, "Outage, local throughput, and capacity of random wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 8, pp. 4350–4359, August 2009.
- [23] N. Abramson, "The ALOHA system: another alternative for computer communications," in *Proceedings of the AFIPS Conference*, vol. 37, November 1970, pp. 281–285.
- [24] F. Baccelli, B. Błaszczyszyn, and P. Mühlethaler, "An Aloha protocol for multihop mobile wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 421–436, Feb. 2006.
- [25] A. Hasan and J. Andrews, "The guard zone in wireless ad hoc networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 897–906, March 2007.
- [26] H. Inaltekin, M. Chiang, H. Poor, and S. Wicker, "The behavior of unbounded path-loss models and the effect of singularity on computed network characteristics," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, September 2009.
- [27] W. Schottky, "Über spontane stromschwankungen in verschiedenen elektrizitätsleitern," *Annalen der Physik*, vol. 57, pp. 541–567, 1918.
- [28] S. O. Rice, "Mathematical analysis of random noise," *Bell Systems Technical Journal*, vol. 23, pp. 282–332, 1944.
- [29] J. Gubner, "Computation of shot-noise probability distributions and densities," *SIAM Journal of Scientific Computing*, vol. 17, no. 3, pp. 750–761, May 1996.
- [30] S. Lowen and M. Teich, "Power-law shot noise," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 36, no. 6, pp. 1302–1318, November 1990.
- [31] M. Shao and C. L. Nikias, "Signal processing with fractional lower order moments: stable processes and their applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 7, pp. 986–1010, July 1993.
- [32] L. Kleinrock and J. A. Silvester, "Optimum transmission radii in packet radio networks or why six is a magic number," in *Proceedings of National Telecommunications Conference*, December 1978.
- [33] S. Musa and W. Wasylkiwskyj, "Co-channel interference of spread spectrum systems in a multiple user environment," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 26, no. 10, pp. 1405–1413, October 1978.

- [34] L. Kleinrock and J. A. Silvester, "Spatial reuse in multihop packet radio networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 1, pp.156–157, January 1987.
- [35] E. Sousa, "Interference modeling in a direct-sequence spread-spectrum packet radio network," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 38, no. 9, pp. 1475–1482, September 1990.
- [36] E. Sousa and J. Silvester, "Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 5, pp. 762–771, June 1990.
- [37] E. Sousa, "Performance of a spread spectrum packet radio network link on a Poisson field of interferers," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 38, no. 6, pp. 1743–1754, November 1992.
- [38] J. Ilow and D. Hatzinakos, "Analytic alpha-stable noise modeling in a Poisson field of interferers or scatterers," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, no. 6, pp. 1601–1611, June 1998.
- [39] F. Baccelli and B. Błaszczyszyn, *Stochastic geometry and wireless networks*. NOW: Foundations and Trends in Networking, 2010.
- [40] M. Franceschetti and R. Meester, *Random networks for communication: from statistical physics to information systems*. Cambridge University Press, 2007.
- [41] M. Haenggi and R. K. Ganti, *Interference in Large Wireless Networks*. NOW: Foundations and Trends in Networking, 2008.
- [42] M. Haenggi, J. G. Andrews, F. Baccelli, O. Dousse, and M. Franceschetti, "Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, September 2009.
- [43] M. Win, P. Pinto, and L. Shepp, "A mathematical theory of network interference and its applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 205–230, February 2009.
- [44] S. Toumpis and A. Goldsmith, "Capacity regions for wireless ad hoc networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 24, no. 5, pp. 736–48, May 2003.
- [45] P. Gupta and P. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, March 2000.
- [46] F. Xue and P. Kumar, *Scaling laws for ad hoc wireless networks: an information theoretic approach*, ser. Foundations and Trends in Networking. Hanover, MA: Now Publishers, 2006.
- [47] L. Xie and P. Kumar, "A network information theory for wireless communication: scaling laws and optimal operation," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 5, pp. 748–767, May 2004.
- [48] A. Jovicic, P. Viswanath, and S. Kulkarni, "Upper bounds to transport capacity of wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 11, pp. 2555–2565, November 2004.
- [49] O. Leveque and I. E. Teletar, "Information-theoretic upper bounds on the capacity of large extended ad hoc wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 3, pp. 858–865, March 2005.
- [50] M. Franceschetti, O. Dousse, D. Tse, and P. Thiran, "Closing the gap in the capacity of wireless networks via percolation theory," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 3, pp. 1009–1018, March 2007.
- [51] S. Toumpis and A. Goldsmith, "Large wireless networks under fading, mobility, and delay constraints," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Hong Kong, March 2004.

- [52] M. Franceschetti, M. Migliore, and P. Minero, "The capacity of wireless networks: information-theoretic and physical limits," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 8, pp. 3413–3424, August 2009.
- [53] M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 477–486, August 2002.
- [54] R. Negi and A. Rajeswaran, "Capacity of power constrained ad-hoc networks," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 1, March 2004, pp. 443–453.
- [55] A. Ozgur, O. Leveque, and D. Tse, "Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3549–3572, October 2007.
- [56] M. Haenggi, "On distances in uniformly random networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 10, pp. 3584–3586, October 2005.
- [57] R. Graham, D. Knuth, and O. Patashnik, *Concrete Mathematics: A Foundation for Computer Science*. Addison Wesley, 1994.
- [58] M. Mitzenmacher and E. Upfal, *Probability and Computing: Randomized Algorithms and Probabilistic Analysis*. Cambridge University Press, 2005.
- [59] C. Goldie and C. Kluppelberg, "Subexponential distributions," in *A practical guide to heavy tails: statistical techniques for analyzing heavy tails*, R. Adler, R. Feldman, and M. Taqqu, Eds. Birkhauser, 1997.
- [60] J. Linnartz, "Exact analysis of the outage probability in multiple-user mobile radio," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, no. 1, pp. 20–23, January 1992.
- [61] M. Zorzi and S. Pupolin, "Optimum transmission ranges in multihop packet radio networks in the presence of fading," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 7, pp. 2201–2205, July 1995.
- [62] S. Diggavi, N. Al-Dhahir, A. Stamoulis, and A. Calderbank, "Great expectations : the value of spatial diversity in wireless networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 219–270, February 2004.
- [63] A. Paulraj, D. Gore, and R. Nabar, *Introduction to space-time wireless communications*. Cambridge, 2003.
- [64] S. Govindasamy, D. W. Bliss, and D. H. Staelin, "Spectral efficiency in single-hop ad-hoc wireless networks with interference using adaptive antenna arrays," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 7, pp. 1358–1369, September 2007.
- 23
- [65] K. Stamatiou, F. Rossetto, M. Haenggi, T. Javidi, J. R. Zeidler, and M. Zorzi, "A delay-minimizing routing strategy for wireless multihop networks," in *2009 Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SpaSWiN)*, Seoul, Korea, June 2009.
- [66] J. G. Andrews, S. P. Weber, M. Kountouris, and M. Haenggi, "Random access transport capacity," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Submitted, available at arxiv.org/0909.5119.
- [67] L. Georgiadis, M. Neely, and L. Tassiulas, *Resource Allocation and Cross-Layer Control in Wireless Networks*, ser. Foundations and Trends in Networking. Hanover, MA: Now Publishers, 2006.
- [68] R. K. Ganti and M. Haenggi, "Interference and outage in clustered wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 4067–4086, 2009.