

18 Γιατί είναι το WiFi ταχύτερο στο σπίτι σε σχέση με το WiFi σε ένα hotspot;

Μία πρόχειρη απάντηση είναι ότι η διαχείριση των παρεμβολών στο WiFi δεν κλιμακώνεται καλά πέρα από μερικές συσκευές οι οποίες διαμοιράζονται ένα σημείο πρόσβασης. Όταν το κοινό είναι μεγάλο, το φαινόμενο της "τραγωδίας των κοινών", εξαιτίας της αμοιβαίας παρεμβολής στη μη αδειοδοτημένη ζώνη, δεν αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά από το WiFi. Για να διαπιστώσουμε το λόγο ο οποίος προκαλεί το παραπάνω, θα πρέπει να εξετάσουμε αναλυτικά τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσοστο επίπεδο σύνδεσης της διαστρωματομένης στοιβας των πρωτοκόλλων του Wifi.

18.1 Μία συνοπτική απάντηση

18.1.1 Πώς διαφέρει το WiFi από τα κυβελωτά δίκτυα;

Από τις πρώτες σημαντικές υλοποιήσεις τους στα τέλη της δεκαετίας του 1990, τα σημεία πρόσβασης στο WiFi (hotspots) έχουν καταστεί ένα απαραίτητο χαρακτηριστικό του ασύρματου τρόπου ζωής μας. Υπήρχαν ήδη παραπάνω από ένα δισεκατομμύριο συσκευές WiFi ανά τον κόσμο το 2010, και εκατοντάδες εκατομμύρια προστίθενται κάθε χρόνο. Χρησιμοποιούμε το WiFi στο σπίτι, στο γραφείο και γύρω από δημόσια σημεία πρόσβασης, όπως αυτά που βρίσκονται σε αεροδρόμια και σε καφετέριες, ή ακόμα και σε διασταυρώσεις.

Όλοι γνωρίζουμε ότι το WiFi είναι συχνά πιο γρήγορο από ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 3G, αλλά δεν μπορείτε να κινείστε πολύ γρήγορα εντός της υπηρεσίας WiFi ή να απέχετε περισσότερο από 100m από ένα **Σημείο Πρόσβασης** (Access Point, **AP**). Έχουμε δει πολλά γράμματα να συνοδεύουν το 802.11, όπως τα 802.11a, b, g, και n, τα οποία αναγράφονται πάνω στα κουτιά των συσκευών του WiFi που μπορείτε να αγοράσετε από τα καταστήματα ηλεκτρονικών, αλλά ίσως να μην εκτιμούμε γιατί καταλήγουμε με μία σούπα με τα γράμματα του αλφαβήτου. Όλοι μας έχουμε χρησιμοποιήσει υπηρεσίες ασύρματης πρόσβασης σε αεροδρόμια, εστιατόρια, ξενοδοχεία και ίσως το WiFi του γείτονά μας (αν δεν απαιτεί κωδικός πρόσβασης) και όλοι έχουμε εκνευριστεί από τη μικρή κλειδαριά που εμφανίζεται δίπλα από τις πολλές ονομασίες δικτύων WiFi που μπορούν μεν να δουν τα τηλέφωνα μας, αλλά όχι και να χρησιμοποιήσουν.

Όταν ο Steve Jobs παρουσίασε το iPhone 4 σε ένα μεγάλο ακροατήριο, το iPhone της επίδειξης δεν μπορούσε να συνδεθεί στο WiFi. Ο Jobs αναγκάστηκε να ζητήσει από όλους τους παριστάμενους να βγουν από το WiFi. Έπειτα, το iPhone του κατάφερε να συνδεθεί με το WiFi. Υπάρχει κάποιο όριο όσον αφορά τον αριθμό των χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει κάποιο σημείο πρόσβασης WiFi ;

Τον Ιούνιο 2012, πέντε κορυφαίοι πάροχοι καλωδιακής τηλεόρασης στις ΗΠΑ ανακοίνωσαν ότι θα ένωσαν τα πενήντα χιλιάδες σημεία πρόσβασης τους σε μία ενιαία υπηρεσία WiFi. Ένα χρόνο πριν, η κυβέρνηση της Νότιας Κορέας ανακοίνωσε ένα σχέδιο για να καλύψει ολόκληρη την πόλη της Σεούλ, συμπεριλαμβανομένης κάθε γωνίας κάθε δρόμου, με υπηρεσία WiFi μέχρι το 2015. Αν πολλοί χρήστες WiFi συγκεντρώνονταν γύρω από μία δημοφιλή διασταύρωση, πόσα πολλά σημεία πρόσβασης θα χρειάζονταν για να καλυφθεί η ζήτηση; Και, πιο σημαντικό, πώς μπορεί αυτή η κυκλοφορία να μετακλιστεί από την ασύρματη διεπαφή του WiFi στο υπόλοιπο Διαδίκτυο;

Στο σπίτι, μία οικιακή πύλη για την πρόσβαση στο Διαδίκτυο συχνά συνδέεται σε ένα σημείο πρόσβασης WiFi, το οποίο παρέχει ασύρματη δυνατότητα σύνδεσης εντός σπιτιού σε επιτραπέζιους και φορητούς υπολογιστές, κονσόλες παιχνιδιών, τηλέφωνα, ή ακόμα και σε τηλεοράσεις, χρησιμοποιώντας την τελευταία υψηλής ταχύτητας έκδοση WiFi. Καθώς κάθε σπίτι προσθέτει περισσότερες συσκευές WiFi, αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα της σύνδεσης θα υποβαθμίζεται, ιδιαίτερα σε πολυκατοικίες πολλών ορόφων;

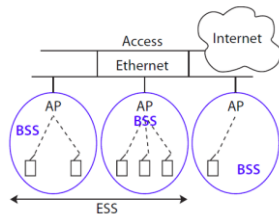
Οι απαντήσεις σε αυτές τις ερωτήσεις ενημερώνονται συνεχώς από τον κλάδο και από την ακαδημαϊκή κοινότητα, και γνωρίζουμε ήδη αρκετά σχετικά με την αρχιτεκτονική και την επίδοση του WiFi. Επίσημα, το WiFi θα πρέπει να αποκαλείται ως το πρότυπο **IEEE 802.11**. Αποτελεί μέρος της οικογένειας προτύπων 802 για τα Τοπικά Δίκτυα (Local Area Networks, LAN) που έχει οριστεί από την IEEE. Το μέρος .11 της οικογένειας εστιάζει στο ασύρματο τοπικό δίκτυο που χρησιμοποιεί το μη αδειοδοτημένο φάσμα.

Θα πρέπει να διαθέτετε μία άδεια από το κράτος για να μεταδίδετε στις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Για τα δίκτυα 3ης και 4ης γενιάς (3G και 4G), οι κυβερνήσεις ανά τον κόσμο πούλησαν αυτούς τους φασματικούς πόρους για δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια, μερικές φορές μέσω δημοπρασιών, όπως είδαμε σε άσκηση του κεφαλαίου 2. Το παραπάνω αποτρέπει την ύπαρξη υπερβολικά πολλών αναμεταδοτών που προκαλούν συνωστισμό και παρεμβολές σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων.

Αντιθέτως, οι κυβερνήσεις ανά τον κόσμο επίσης αφήνουν ορισμένες ζώνες χωρίς να απαιτείται άδεια και ελεύθερες, με την προϋπόθεση ότι η δύναμη μετάδοσής σας δεν είναι πολύ υψηλή. Για παράδειγμα, τα εύρη συχνοτήτων για τη Βιομηχανία, την Επιστήμη, και την Ιατρική (ISM) στη ζώνη S κυμαίνονται στα 2.4–2.5 GHz και στη ζώνη C γύρω στα 5.8 GHz. Αρχικά είχαν οριστεί για χρήση στα τρία

πεδία, όπως υποδηλώνεται από την ονομασία ISM, αλλά η πιο εκτεταμένη εφαρμογή στη ζώνη ISM S, πέραν του WiFi, είναι στην ουσία ο φούρνος μικροκυμάτων. Αυτή η ζώνη είναι εξαιρετική στο να διεγείρει τα μόρια του νερού. Υπάρχουν και άλλες συσκευές ασύρματης επικοινωνίας που λειτουργούν με Bluetooth, Zigbee, κ.α., χρησιμοποιώντας και αυτές την ίδια ζώνη ISM. Η διαχείριση των παρεμβολών σε ένα μη αδειοδοτημένο φάσμα αποτελεί μία σημαντική πρόκληση.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, καθώς απογειωνόταν η βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενιάς, οι άνθρωποι ξεκίνησαν να αναρωτιούνται αν θα μπορούσαν να δημιουργήσουν μία εναλλακτική λύση σε σχέση με το ασύρματο δίκτυο: χρήση του μικρού ποσού ισχύος που επιτρέπεται στην επικοινωνία ISM και βραχέως εύρους (περίπου 100m σε εξωτερικό χώρο, με εύρος μετάδοσης μία τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή της κινητής/κυψελοειδούς τηλεφωνίας) για τις περισσότερες σταθερές συσκευές. Καθώς αυτό δεν είναι ένα δίκτυο μονού παρόχου, υπήρχε ανάγκη για ένα βιομηχανικό φόρουμ το οποίο θα ήλεγχε την διαλειτουργικότητα όλων των συσκευών. Αυτό ιδρύθηκε το 1999, με την επωνυμία Wi-Fi Alliance, όπου το Wi-Fi σημαίνει “Wireless Fidelity” (Ασύρματη Πιστότητα) και είναι ένα πιο εύρηστο όνομα από το “IEEE 802.11b.”



Σχήμα 18.1 Συνηθισμένη τοπολογία ανάπτυξης δικτύου WiFi. Η ασύρματη διεπαφή παρέχει συνδέσμου διπλής κατεύθυνσης μεταξύ των AP και των συσκευών των τελικών χρηστών. Κάθε BSS έχει από ένα AP. Μία συλλογή από BSS που μπορεί να υποστηρίξει άμεσα τη μεταπομπή αποκαλείται ESS. Η ασύρματη διεπαφή συνδέεται σε ένα ενσύρματο οπισθοζευκτικό δίκτυο, συχνά ένα Ethernet, το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με το υπόλοιπο δίκτυο πρόσβασης και έπειτα με το υπόλοιπο Διαδίκτυο.

δημιουργήθηκαν πολλές εκδόσεις των προτύπων WiFi από τον οργανισμό IEEE 802, ξεκινώντας με το 802.11b που χρησιμοποιεί τη ζώνη 2,4 GHz και μπορεί να ανμεταδίδει μέχρι και 11 Mbps. Το παραπάνω ακολούθησαν άλλες δύο βασικές εκδόσεις: το 802.11g που χρησιμοποιεί μία πιο προηγμένη κωδικοποίηση φυσικού επιπέδου και διαμόρφωση για τη λήψη μέχρι και 54 Mbps στη ζώνη 2,4 GHz, και

το 802.11a, το οποίο μπορεί επίσης να πετύχει μέχρι και 54 Mbps στη ζώνη 5,8 GHz. Ορισμένα από αυτά τα πρότυπα διαχωρίζουν τη ζώνη συχνότητας σε μικρότερα τεμάχια μέσω πολυπλεξίας **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM). Σε αντίθεση με τη μη συγκέντρωση πόρων που προβλέπεται από την προσέγγιση της Τιμολόγησης του μετρώ του Παρισιού (Paris Metro Pricing) στο Κεφάλαιο 12, αυτός ο κατακερματισμός πόρων ενθαρρύνεται από την καλύτερη φασματική απόδοση καθώς τα σήματα σε μικρότερα κομμάτια ζωνών συχνότητας μπορούν να υποστούν επεξεργασία με καλύτερη απόδοση.

Πιο πρόσφατα, το 802.11n χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές σε ασυρμάτους για να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης πέραν των 100 Mbps. Η αύξηση του πλάτους του καναλιού στα 40 MHz επίσης βοήθησε ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων. Θα συζητήσουμε την OFDM και τα συστήματα πολλαπλών κεραιών στο Προχωρημένο Υλικό.

Επίσης έχουν προκύψει πολλά συμπληρωματικά στοιχεία με σκοπό τη βελτίωση συγκεκριμένων πεδίων στη λειτουργία του WiFi. Για παράδειγμα, το 802.11e βελτίωσε την ποιότητα της υπηρεσίας όσον αφορά τον έλεγχο πρόσβασης στα μέσα, ένα θέμα στο οποίο θα εστιάσουμε στο παρόν κεφάλαιο - το 802.11h βελτίωσε την κρυπτογράφηση και την ασφάλεια, ένα σημαντικό θέμα στις πρώτες ημέρες του WiFi, και το 802.11r βελτίωσε τη δυνατότητα περιαγωγής του WiFi ώστε να υποστηρίξει, σε κάποιο βαθμό, την κινητικότητα των ανθρώπων που κρατούν στα χέρια τους συσκευές WiFi.

Αν και η φύση της φασματικής λειτουργίας είναι διαφορετική, το WiFi μοιράζεται μία κοινή τοπολογία (Εικόνα 18.1) με τα δίκτυα κυψελοειδούς τηλεφωνίας, με την εξαίρεση ότι αυτή τη φορά δεν αποκαλούνται κυψέλες (καθώς συχνά δεν υπάρχει κάποιο αναλυτικό σχέδιο ασύρματων συχνοτήτων πριν την ανάπτυξη), αλλά ένα Σύνολο Βασικών Υπηρεσιών (Basic Services Set - BSS). Σε κάθε BSS υπάρχει ένα AP και όχι κάποιος Σταθμός Βάσης. Μία συλλογή γειτονικών BSS μπορεί επίσης να σχηματίζει ένα Σύνολο Εκτεταμένων Υπηρεσιών (Extended Services Set - ESS).

Όταν ο φορητός σας υπολογιστής ή το τηλέφωνό σας πραγματοποιεί αναζήτηση για να συνδεθεί σε κάποιο δίκτυο WiFi, στέλνει διερευνητικά μηνύματα ώστε να ανακαλύψει ποια AP βρίσκονται εντός του βεληνεκούς μετάδοσής του και σας προβάλλει τα ονόματα των BSS. Μπορεί να θέλετε να συνδεθείτε σε ένα BSS αλλά, αν προστατεύεται με κωδικό πρόσβασης, η συσκευή σας μπορεί να συνδεθεί με το AP μόνο αν έχετε τον κωδικό πρόσβασης ώστε να πιστοποιήσετε την κατάστασή σας, π.χ. κάτοικος του κτηρίου, αν το AP λειτουργεί υπό τον ιδιοκτήτη του κτηρίου, εργαζόμενος της εταιρίας, αν το AP λειτουργεί υπό την εταιρία, ή πελάτης που πλήρωσε, αν το AP αποτελεί μέρος της συνδρομητικής υπηρεσίας WiFi που προσφέρεται από κάποιον πάροχο ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Η

ανάπτυξη των δικτύων WiFi αυξάνεται όλο και περισσότερο, αλλά η διαθεσιμότητα του δωρεάν WiFi ενδεχομένως να μειώνεται.

Αυτά τα AP είναι συνδεδεμένα με ένα οπισθοζευκτικό σύστημα, συχνά σε ένα ενσύρματο δίκτυο Ethernet (ένα άλλο, και πολύ παλαιότερο μέλος της οικογένειας IEEE 802), το οποίο τα συνδέει στο υπόλοιπο Διαδίκτυο. Το παραπάνω είναι εννοιολογικά παρόμοιο με το βασικό (core) δίκτυο που βρίσκεται πίσω από τους σταθμούς βάσης στα κυψελοειδή δίκτυα, αν και τα στοιχεία της υποστήριξης κινητικότητας, χρεώσεων και ενδο-BSS συντονισμού είναι συχνά πολύ πιο απλά στο WiFi.

Αν οι συνθήκες του καναλιού είναι καλές, π.χ. αν κάθεστε ακριβώς δίπλα από την οικιακή πύλη με το ενεργοποιημένο WiFi στο σπίτι σας και δεν παρεμβάλλεται το σήμα κάποιου άλλου με το δικό σας, ο ρυθμός των δεδομένων μπορεί να είναι πολύ εντυπωσιακός, ιδιαίτερα αν χρησιμοποιείτε το 802.11n. Είναι πιο γρήγορο από το δίκτυο 3G και ενδεχομένως πιο γρήγορο και από το DSL ή το δίκτυο οπτικών ινών που συνδέει την οικιακή πύλη με το υπόλοιπο Διαδίκτυο. Αλλά αν βρίσκεστε εκτός του περιορισμένου βεληνικού του AP ή αν ξεκινήσετε να κινήσετε στα όρια ενός ESS, μπορεί να αποσυνδεθείτε εύκολα. Επίσης, αν μοιράζεστε τον αέρα με δέκα ή σχεδόν τόσες συσκευές WiFi, η ταχύτητα μπορεί να πέσει σημαντικά, όπως έχετε βιώσει ενδεχομένως σε ένα δημόσιο σημείο πρόσβασης WiFi το οποίο έχει πολύ κόσμη.

Υπάρχει επίσης και ένα διομότιμο πρωτόκολλο (peer-to-peer) στα πρότυπα 802.11, το πρωτόκολλο που στερείται υποδομής, το αποκαλούμενο ειδικού σκοπού - ad hoc. Οι συσκευές WiFi μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους χωρίς να περνούν από οποιαδήποτε σταθερή υποδομή, όπως είναι τα AP. Αυτή την επιλογή την βλέπετε όταν διαμορφώνετε την ικανότητα σύνδεσης σε δίκτυο WiFi στον υπολογιστή σας. Αλλά ελάχιστοι χρήστες χρησιμοποιούν αυτό το πρωτόκολλο σήμερα, και εμείς θα μιλήσουμε μόνο για το πρωτόκολλο υποδομής που χρησιμοποιεί AP.

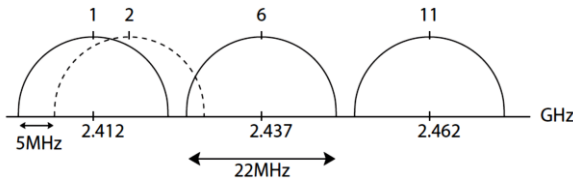
18.1.2 Διαχείριση παρεμβολών στο WiFi

Συνυψίζοντας αυτά που έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής: Το WiFi αποτελεί μία εξελισσόμενη οικογένεια προτύπων που επιτρέπει την ασύρματη επικοινωνία με περιορισμένο βεληνικές επί των μη αδειοδοτημένων ζωνών ISM για κυρίως σταθερές συσκευές. Σε αντίθεση με τα κυψελοειδή δίκτυα, τα δίκτυα WiFi συχνά αναπτύσσονται με πολύ περιορισμένο σχεδιασμό και υφίστανται ελάχιστη ή και καθόλου διαχείριση.

Το WiFi αποτελεί έναν αρκετά διαφορετικό τύπο ασύρματης δικτύωσης από τα κυψελοειδή δίκτυα, και η βελτιστοποίηση της επίδοσής του απαιτεί ορισμένες διαφορετικές προσεγγίσεις. Το αν ένα σημείο πρόσβασης WiFi λειτουργεί καλά ή

όχι, ουσιαστικά εξαρτάται από το πόσο αποτελεσματικά έχουν εκτελεστεί οι βελτιστοποιήσεις. Εστιάζουμε στην ασύρματη διεπαφή μεταξύ των AP και των συσκευών (ο όρος καλύπτει και τα δύο), αν και το οπισθοζευκτικό μέρος θα μπορούσε επίσης να προκαλέσει συμφόρηση δεδομένων (π.χ. όταν ένας εξυπηρετητής DHCP έχει ελαττωματικό κώδικα και δεν μπορεί να παρακολουθεί τις διευθύνσεις IP που ανατίθενται στις συσκευές, ή απλώς επειδή η χωρητικότητα οπισθοζεύξης είναι περιορισμένη).

Η πρώτη ομάδα της βελτιστοποίησης της επίδοσης περιλαμβάνει τη σωστή επιλογή του AP, του καναλιού, και του ρυθμού μετάδοσης του φυσικού επιπέδου.



Σχήμα 18.2 Το φάσμα και τα κανάλια 802.11b. Υπάρχουν 11 κανάλια στις Η.Π.Α. Κάθε κανάλι έχει πλάτος 22 MHz και απόσταση 5 MHz από τα γειτονικά κανάλια. Συνεπώς, μόνο τρία κανάλια, το Κανάλι 1, το Κανάλι 6, και το Κανάλι 11 δεν επικαλύπτουν το ένα το άλλο.

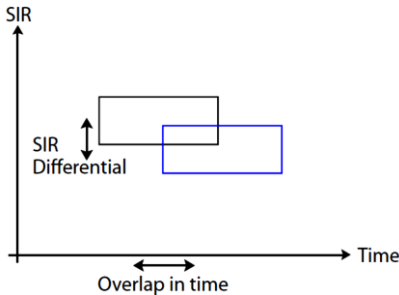
- **Συρρατισμός AP:** Μία συσκευή WiFi θα πρέπει να σαρώνει τακτικά τον αέρα και έπειτα να συρρατίζεται με το σωστό AP, π.χ. με αυτό που προσφέρει το καλύτερο SIR (και, φυσικά, με αυτό που πιστοποιεί τη συσκευή).
- **Επιλογή καναλιών:** Η συνολική ζώνη συχνοτήτων ISM χωρίζεται σε κανάλια. Για παράδειγμα, στο 802.11b στις ΗΠΑ, κάθε κανάλι έχει πλάτος 22 MHz και απόσταση 5 MHz από τα γειτονικά κανάλια. Όπως δείχνει η Εικόνα 18.2, μόνο τα κανάλια που έχουν απόσταση 5 κανάλια μεταξύ τους πραγματικά δεν επικαλύπτουν το ένα το άλλο. Οπότε, αν θέλετε να έχετε τρεις συσκευές σε μη αλληλοκαλυπτόμενα κανάλια, η μόνη διαμόρφωση για αυτά είναι να επιλεγεί ένα διαφορετικό κανάλι μεταξύ των Καναλιών 1, 6 και 11. Πολλές εφαρμογές δικτύων WiFi απλά χρησιμοποιούν το προεπιλεγμένο κανάλι σε κάθε AP. Αν είναι όλα ρυθμισμένα στο Κανάλι 6, σε αυτό το σημείο δημιουργείται περιττή παρεμβολή.
- **Επιλογή ρυθμού μετάδοσης:** Αναφέραμε ότι έκαστο από τα 802.11abgn μπορεί να μεταδίδει μέχρι ένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Το παραπάνω προϋποθέτει ένα πραγματικά καλό κανάλι, χωρίς παρεμβολές και χωρίς κινητικότητα. Σε πολλά σημεία πρόσβασης WiFi, η κατάσταση του καναλιού μεταβάλλεται και οι παρεμβολές έρχονται και φεύ-

γουν. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης επιτυγχάνεται σπάνια, και το AP ζητά από τις συσκευές να υποχωρήσουν σε έναν από τους χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης που ορίζονται, π.χ. μέχρι και 1 Mbps στο 802.11b, έτσι ώστε η αποκωδικοποίηση να έχει αρκετή ακρίβεια στη χαμηλότερη αυτή ταχύτητα. Μία συσκευή γνωρίζει ότι έχει έρθει η ώρα να μειώσει το ρυθμό μετάδοσής της στο επόμενο χαμηλότερο επίπεδο αν το SIR του δέκτη της είναι πολύ χαμηλό για τον υφιστάμενο ρυθμό, ή αν έχουν χαθεί πάρα πολλά πλαίσια.

Υποθέστε ότι η συσκευή WiFi λαμβάνει τις παραπάνω τρεις παραμέτρους σωστά. Τώρα θα πρέπει να φροντίσουμε τις παρεμβολές. Όταν δύο αναμεταδότες βρίσκονται εντός του εύρους παρεμβολής αναμεταξύ τους, και εκπέμπουν και οι δύο ένα πλαίσιο σε παρόμοιο χρόνο (t_1 και t_2 , αντίστοιχα), αυτά τα δύο πλαίσια συγκρούονται. Υπάρχουν τρία ενδεχόμενα αποτελέσματα σε μία σύγκρουση.

- Χάνονται και τα δύο πλαίσια: κανένας δέκτης δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά το σχετικό πλαίσιο.
- Το ισχυρότερο πλαίσιο λαμβάνεται σωστά, αλλά το αδύναμο χάνεται: σε αυτή την περίπτωση η «ισχύς» αναφέρεται σε SIR. Αυτό ονομάζεται σύλληψη (capture).
- Και τα δύο πλαίσια λαμβάνονται σωστά. Αυτό ονομάζεται διπλή σύλληψη (double capture).

Τώρα, ποιο αποτέλεσμα θα υπερισχύσει; Αυτό εξαρτάται ιδιαίτερα από τους παρακάτω παράγοντες.



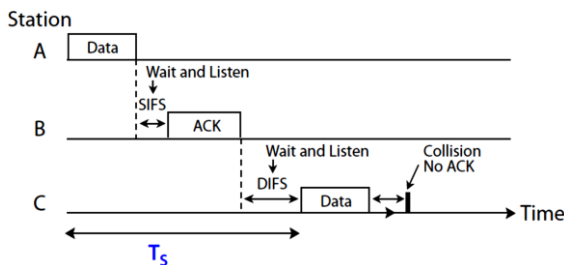
Σχήμα 18.3. Ένα διάγραμμα της σχέσης ενέργειας - χρόνου δύο συγκρουόμενων πλαισίων. Αν η σύγκρουση ορίζεται ως δύο πλαίσια που καλύπτουν το ένα το άλλο στο χρόνο μετάδοσής τους, το αποτέλεσμα μίας σύγκρουσης εξαρτάται ιδιαίτερα από ορισμένους παράγοντες: πόσο μεγάλη είναι η αλληλοεπικάλυψη (overlap), πόσο μεγάλη είναι η διαφορά στα SIRs που λαμβάνονται, και πόσο μεγάλο SIR απαιτείται για σωστή αποκωδικοποίηση σε κάθε αποδέκτη.

- Για πόσο αλληλοκαλύπτονται τα πλαίσια (σύμφωνα με τη διαφορά χρονισμού τους $t_1 - t_2$, τα μεγέθη των πλαισίων και τους ρυθμούς μετάδοσης).
- Πόσο μεγάλη είναι η διαφορά στο SIR μεταξύ των δύο πλαισίων (το οποίο εξαρτάται από τις συνθήκες του καναλιού και τις δυνάμεις μετάδοσης). Το παραπάνω παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.3.
- Πόσο μεγάλο SIR απαιτείται για τη σωστή αποκωδικοποίηση στον αποδέκτη (το οποίο εξαρτάται από τους ρυθμούς μετάδοσης, την κωδικοποίηση και τις διαμορφώσεις και από τα ηλεκτρονικά μέρη του αποδέκτη).

Αποτελεί ένα δυσάρεστο γεγονός ότι οι ασύρματες μεταδόσεις μπορούν να παρεμβάλλονται η μία στην άλλη, καθώς η ασύρματη μετάδοση πρόκειται για ενέργεια που διαχέεται στον αέρα. Είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο σύνολο δεδομένων φυσικής για μοντελοποίηση, καθώς η σύγκρουση δεν αποτελεί απλώς έναν τύπο συμβάντος. Στο υπόλοιπο κεφάλαιο, απλώς υποθέτουμε ότι όταν συμβαίνει κάποια σύγκρουση, και τα δύο πλαίσια χάνονται.

Σε σύγκριση με τον έλεγχο ισχύος στο Κανάλι 1 αναφορικά με τα κυψελοειδή δίκτυα, το WiFi επίσης χρησιμοποιεί μία θεμελιώδη διαφορετική προσέγγιση για τη διαχείριση των παρεμβολών, λόγω του πολύ μικρότερου μεγέθους κυψέλης του, του συνήθως εσωτερικού περιβάλλοντος διάχυσης, μίας πολύ μικρότερης επιτρεπόμενης μέγιστης ισχύος μετάδοσης, και της περισσότερο ανεξέλεγκτης παρεμβολής σε μία μη αδειοδοτημένη ζώνη. Αντί να προσαρμόζει την ισχύ μετάδοσης για να διαμορφώσει τα σωστά SIR, το WiFi προσπαθεί να αποφύγει τη σύγκρουση γενικά, μέσω των **μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης των μέσων**.

Σκεφτείτε το κοκτέιλ πάρτι που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1 ξανά, όπου οι φωνές των καλεσμένων καλύπτουν η μία την άλλη στον αέρα. Με αρκετή παρεμβολή, δεν μπορείτε να καταλάβετε τι προσπαθεί να σας πει ο φίλος σας. Ο έλεγχος ισχύος του κυψελοειδούς δικτύου είναι σαν να ζητήσετε από κάθε καλεσμένο να προσαρμόσει τη ένταση της φωνής του χωρίς να καταλήξετε σε μάχη φωνών. Ο έλεγχος πρόσβασης στα μέσα του WiFi είναι σαν να κανονίζετε τους καλεσμένους σας ώστε να μιλούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.



Σχήμα 18.4. Ένα διάγραμμα χρονισμού των βασικών μεταδόσεων WiFi. Ένας σταθμός μπορεί είτε να είναι μία συσκευή χρήστη, είτε ένα AP. Πρώτα, ο αναμεταδότης μίας συνεδρίας, ο σταθμός A, αποστέλλει ένα πλαίσιο δεδομένων στον προοριζόμενο αποδέκτη, στον σταθμό B. Έπειτα, εντός μίας πολύς μικρής χρονικής περιόδου με προκαθορισμένη διάρκεια, η οποία ονομάζεται SIFS, ο B αποστέλλει ένα πλαίσιο αναγνώρισης πίσω στο A. Μετά από αναμονή μίας ελάχιστα μεγαλύτερης χρονικής περιόδου, που αποκαλείται DIFS, οι άλλοι κόμβοι, όπως ο σταθμός C, μπορούν να ξεκινήσουν να στέλνουν πλαίσια δεδομένων. Στο παραπάνω παράδειγμα, το πακέτο του κόμβου C συγκρούεται με κάποιο άλλο πακέτο που μεταδίδεται από, ας πούμε, τον σταθμό D.

Μπορείτε να έχετε είτε ένα κεντρικό συντονιστή που θα αναθέτει διαφορετικές χρονοθυρίδες σε κάθε καλεσμένο για να μιλήσει (χρονο-προγραμματισμός) ή μπορείτε να ζητήσετε από τον καθένα τους να υπακούσουν σε κάποια διαδικασία ώστε να αποφασίζεται τοπικά πότε θα μιλήσουν και για πόσο (τυχαία πρόσβαση). Αυτές τις εναλλακτικές τις αποκαλούμε **Λειτουργία Σημειακού Συντονισμού** (Point Coordination Function - **PCF**) και **Λειτουργία Κατανεμημένου Συντονισμού** (Distributed Coordination Function - **DCF**), αντίστοιχα. Η PCF, σαν ένα συμβολικός δακτύλιος στο πρωτόκολλο του ενσύρματου Ethernet, εκπροσωπεί τον κεντρικό έλεγχο (και την αποκλειστική ανάθεση των πόρων). Η λειτουργία της είναι περίπλοκη και σπάνια χρησιμοποιείται. Αντιθέτως, η DCF επιτρέπει την κατανομή των κοινών πόρων. Όπως ενδεχομένως υποψιάζεστε για οποιονδήποτε διανεμόμενο αλγόριθμο, μπορεί να είναι λιγότερο αποδοτικός, αλλά είναι περισσότερο εύκολος να λειτουργήσει. Στην πράξη, η DCF χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές. Θα συζητήσουμε για την DCF του WiFi, η οποία αποτελεί μία ιδιαίτερη υλοποίηση του πρωτόκολλου τυχαίας πρόσβασης **Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση του Φέροντος** (Carrier Sensing Multiple Access - **CSMA**).

Η βασική λειτουργία της CSMA είναι σχετικά απλή και εξαιρετικά διαισθητική. Ας υποθέσουμε ότι είστε ένας αναμεταδότης. Πριν στείλετε κάποιο πλαίσιο, συχνά ακροάζετε τον αέρα (το μέρος του φάσματος όπου βρίσκεται το κανάλι επικοινωνίας σας). Αυτό αποκαλείται **ανίχνευση φέροντος** (Carrier Sensing). Όπως δείχνει η Εικόνα 18.4, κάθε αναμεταδότης θα πρέπει να τηρεί μία περίοδο αναμονής και ακρόασης πριν αποπειραθεί να αναμεταδώσει. Αν το κανάλι ανιχνευτεί ως απασχολημένο (κάποιος χρησιμοποιεί το μέσο για να μεταδώσει τα πλαίσιά του), εσείς απλά παραμένετε σιωπηλός. Αλλά αν είναι αδρανές (δεν το χρησιμοποιεί κανένας), μπορείτε να προχωρήσετε και να στείλετε μία σειρά από πλαίσια. Μπορεί να θέλετε να στείλετε πολλά πλαίσια στη σειρά, έτσι ώστε να μπορέσετε να στείλετε ένα μήνυμα ελέγχου, δηλώνοντας για πόσο σκοπεύετε να χρησιμοποιήσετε το κανάλι. Φυσικά, ο χρόνος κατάληψης του καναλιού έχει ένα μέγιστο όριο, όπως όταν προβλέπεται κοινή χρήση σε ένα διάδρομο γυμναστικής. Αλλά αν το πλαίσιό σας συγκρουστεί με κάποια άλλα πλαίσια όταν προσπαθήσετε να το στείλετε, ο αναμετα-

δότης σας δεν θα το λάβει (καθώς θεωρούμε ότι η σύγκρουση σκοτώνει και τα δύο πλαίσια).

Οπότε δεν θα λάβετε την αναγνώριση. Με αυτό τρόπο μαθαίνετε ότι έχετε υποστεί μία σύγκρουση, και θα πρέπει να *υποχωρήσετε* (backoff). Αυτή η υποχώρηση στο WiFi είναι παρόμοια με την υποχώρηση από άκρο σε άκρο στο TCP, μειώνοντας στο μισό το παράθυρο της συμμόρφωσης που αναγράφεται στο Κεφάλαιο 14: διπλασιάζετε το **παράθυρο ανταγωνισμού** (contention window) στο WiFi. Και έπειτα τραβάτε ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ της υφιστάμενης χρονικής στιγμής και του τελικού χρόνου του παραθύρου ανταγωνισμού. Αυτή θα είναι η επόμενη ευκαιρία σας να στείλετε το χαμένο πλαίσιο.

Αυτή η περιγραφή πρωτοκόλλου μπορεί να ακούγεται σαν να πάσχει από έλλειψη κινήτρου στην αρχή. Αλλά στην ουσία, υπάρχουν δύο έξυπνες ιδέες καταναμημένου συντονισμού εδώ: η τυχαιοποίηση και η εκθετική υποχώρηση.

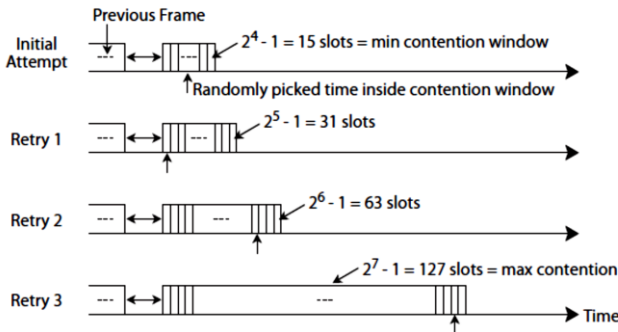
Πρώτα, αν τα πλαίσια των σταθμών A και B συγκρουστούν μία φορά τα πλαίσια, δεν θέλετε να υποχωρήσουν πίσω σε μία κοινή χρονική στιγμή μετά: απλά θα προκληθεί ακόμα μία σύγκρουση. Θα πρέπει να υποχωρήσουν *τυχαία* ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα να χτυπήσουν το ένα το άλλο ξανά. Αυτό είναι ακριβώς το αντίθετο με το να στοχεύετε στο συγχρονισμό, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 8. Φυσικά, μπορεί να συμβεί να διαλέξουν και πάλι ακριβώς την ίδια χρονοθυρία, αλλά αυτό είναι το τίμημα που πληρώνετε για τον καταναμημένο συντονισμό.

Δεύτερον, αν τα πλαίσια συνεχίσουν να συγκρούονται, γνωρίζετε ότι η κατάσταση παρεμβολής είναι πολύ άσχημη και εσείς, όπως και όλοι οι σταθμοί που βιώνουν συνεχόμενες συγκρούσεις των πλαισίων τους, θα πρέπει να ξεκινήσετε να υποχωρείτε περισσότερο όταν λαμβάνετε αυτή την απόλυτη, αρνητική επίδραση. Η γραμμική αύξηση του μεγέθους του παραθύρου ανταγωνισμού είναι μία επιλογή, αλλά θεωρήθηκε ότι δεν ήταν αρκετά επιθετική. Αντίθετα, το WiFi υποχρεώνει την *πολλαπλασιαστική* υποχώρηση. Καθώς ο *πολλαπλασιαστικός* παράγοντας είναι το 2, το **αποκαλούμε δυαδική εκθετική υποχώρηση** (binary exponential backoff). Το παραπάνω είναι παρόμοιο με την *πολλαπλασιαστική* μείωση του μεγέθους του παραθύρου συμμόρφωσης στο TCP. Όπως δείχνει η Εικόνα 18.5, όταν το παράθυρο ανταγωνισμού σας υπερβαίνει μία *μέγιστη τιμή*, δηλαδή όταν έχετε υποχωρήσει από υπερβολικά πολλά στάδια, θα πρέπει απλά να απορρίψετε το πλαίσιο και να αναφέρετε την απόλεια στα πρωτόκολλα των ανώτερων επιπέδων, έτσι ώστε να προσπαθήσουν να το επιδιορθώσουν. Το παράθυρο ανταγωνισμού μπορεί επίσης να διαθέτει μία *ελάχιστη τιμή*, όπου σε αυτή την περίπτωση, ο αποστολέας θα πρέπει να περιμένει πριν την πρώτη του προσπάθεια για να στείλει ένα πλαίσιο.

Μέχρι στιγμής όλα καλά. Αλλά αποτελεί ακόμα ένα δυσάρεστο γεγονός ασύρματης μετάδοσης ότι το εύρος αντίγνευσης δεν είναι το ίδιο με το εύρος παρεμβολών: μπορεί να προκύψει ώστε οι σταθμοί A και B να συγκρούονται αλλά δεν μπορούν

να ακούσουν ο ένας τον άλλο, όπως δείχνει η Εικόνα 18.6. Αυτό είναι το περίφημο πρόβλημα του **κρυφού κόμβου**, ένα από τα σημεία συμφόρησης στην επίδοση των σημείων πρόσβασης WiFi. Αυτό το πρόβλημα δεν προκύπτει στον έλεγχο συμφόρησης TCP. Όμως, υπάρχει μία έξυπνη λύση, περνώντας ένα μικρό ρητό μήνυμα, το οποίο βοηθά στην πλοήγηση μέσα από αυτό το δύσκολο πρόβλημα παρεμβολής. Αυτό αποκαλείται **RTS/CTS**. Όταν ο σταθμός A επιθυμεί να στείλει ένα πλαίσιο, πρώτα στέλνει ένα μικρό μήνυμα ελέγχου που αποκαλείται Request To Send (RTS) (Αίτηση για Εκπομπή). Όλοι οι σταθμοί εντός του εύρους εντοπισμού του A λαμβάνουν αυτό το μήνυμα και καθέννας από αυτούς με τη σειρά του στέλνει ένα σύντομο μήνυμα ελέγχου που αποκαλείται Clear To Send (CTS) (Ελεύθερο για Μετάδοση).

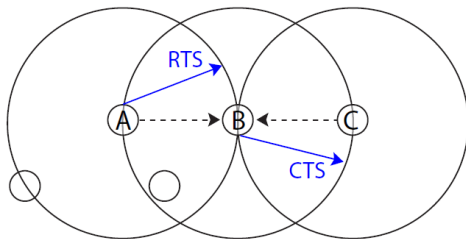
Όλοι οι σταθμοί εντός του εύρους εντοπισμού τους λαμβάνουν το CTS και σταματούν από το να μεταδίδουν οποιοδήποτε πλαίσιο στο κοντινό μέλλον. Φυσικά, και ο σταθμός A λαμβάνει την επιστροφή του μηνύματος CTS, και όταν δει αυτό το CTS, γνωρίζει ότι όλοι αυτοί οι κρυφοί κόμβοι έχουν επίσης λάβει το CTS και συνεπώς δεν πρόκειται να στείλουν πλέον κάποιο πλαίσιο. Σε αυτό το σημείο, ο σταθμός A στέλνει τα πραγματικά πλαίσια.



Σχήμα 18.5. Η εκθετική υποχώρηση στο DCF. Υπάρχουν δύο βασικές ιδέες. Πρώτα, όταν συγκρούονται δύο πλαίσια, και τα δύο θα πρέπει να υποχωρήσουν. Για να αποφευχθεί η επιλογή του ίδιου χρόνου για αναμετάδοση, καθένα επιλέγει ένα τυχαίο σημείο από το παράθυρο ανταγωνισμού για να πραγματοποιήσει την αναμετάδοση. Δεύτερον, αν οι συγκρούσεις συνεχιστούν, κάθε αποστολέας θα πρέπει να υποχωρήσει και άλλο. Ο διπλασιασμός του παραθύρου ανταγωνισμού αποτελεί ένα λογικό τρόπο για να αυξηθεί ο βαθμός της υποχώρησης. Μία άσκηση θα διερευνήσει το παραπάνω ακόμα περισσότερο. Το ελάχιστο μέγεθος του παραθύρου είναι

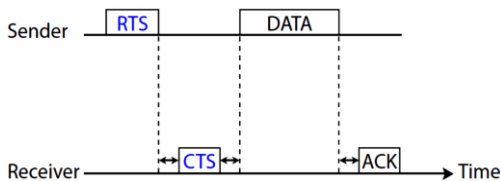
Με σχόλια [C1]: Νομίζω ότι τα προηγούμενα δεν χρειάζονται. Η εικόνα είναι κατανοητή.

W_{min} , ενώ ο μέγιστος αριθμός των υποχωρήσεων που επιτρέπονται (πριν την απόρριψη του πλαισίου) είναι B .



Σχήμα 18.6. Το πρόβλημα με τον κρυφό κόμβο: Οι μεταδόσεις των σταθμών A και C προς τον σταθμό B παρεμβάλλονται η μία με την άλλη, αλλά δεν μπορούν να εντοπίσουν η μία την άλλη. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν το εύρος εντοπισμού / μετάδοσης. Το RTS/CTS αποτελεί ένα πρωτόκολλο μετάδοσης μηνυμάτων που βοηθά στην επίλυση του προβλήματος κρυφού κόμβου. Ο κόμβος A πρώτα στέλνει ένα RTS. Μόλις ακουστεί το RTS, όλοι οι κόμβοι (συμπεριλαμβανομένου του κόμβου B) αποστέλλουν ένα CTS. Μόλις ακουστεί το CTS, όλοι οι κόμβοι (συμπεριλαμβανομένου του κόμβου C) παραμένουν σιωπηλοί για μία χρονική περίοδο, με την εξαίρεση του κόμβου A , ο οποίος ξεκίνησε το RTS. Ο κόμβος A πλέον γνωρίζει ότι είναι ασφαλές να αποστέλλει τα πραγματικά δεδομένα των πλαισίων χωρίς να ανησυχεί για τους κρυφούς κόμβους.

Όπως δείχνει η Εικόνα 18.7, η σύντομη περίοδος του χρόνου αδράνειας μεταξύ του RTS και του CTS είναι βραχύτερη από τον χρόνο αναμονής και ακρόασης (wait-and-listen) μεταξύ των μεταδόσεων των δεδομένων. Το παραπάνω αποτελεί ακόμα μία έξυπνη ιδέα για τον κατανομημένο συντονισμό σε ασύρματα δίκτυα. Δημιουργώντας πολλαπλούς τύπους διαστημάτων αναμονής και ακρόασης, οι μεταδόσεις που πρέπει μόνο να τηρούν ένα βραχύτερο διάστημα αναμονής και ακρόασης ουσιαστικά λαμβάνουν υψηλότερη προτεραιότητα.



Σχήμα 18.7. Ένα διάγραμμα χρονισμού για τα RTS/CTS στο WiFi DCF για την αντιμετώπιση του προβλήματος των κρυφών κόμβων. Οι διάρκειες των περιόδων

μεταξύ των RTS και CTS, και μεταξύ των πλαισίων CTS και των Δεδομένων, είναι μικρότερες από την περίοδο του χρόνου που οι άλλοι κόμβοι πρέπει να περιμένουν για ένα ζεκάθαρο κανάλι πριν τη μετάδοση. Αυτή η διαφορά χρονισμού ουσιαστικά παρέχει την προτεραιότητα του CTS και η επόμενη κυκλοφορία των δεδομένων επί της ανταγωνιστικής κυκλοφορίας.

Θα τους επιτρέπεται να στέλνουν πριν από αυτά που θα πρέπει να τηρούν μεγαλύτερη περίοδο αναμονής και ακρόασης.

Ούτε το RTS/CTS αποτελεί μία τέλεια λύση, π.χ. τα πλαίσια RTS και CTS συχνά συγκρούονται με άλλα πλαίσια. Ακόμα και έτσι, με το πρωτόκολλο μεταφοράς μηνυμάτων RTS/CTS, μαζί με την ιεράρχηση μέσω διαφορετικών διαστημάτων αναμονής και ακρόασης, την κατανομημένη μετάδοση μέσω τυχαιοποιημένου χρονισμού μετάδοσης, και της επίλυσης του ανταγωνισμού μέσω ενός παραθύρου ανταγωνισμού εκθετικής υποχώρησης, έχουμε ένα αρκετά κατανομημένο πρωτόκολλο MAC που επιτρέπει τη λειτουργία των σημείων πρόσβασης WiFi καθώς κλιμακώνονται.

Θα δούμε διάφορες άλλες ιδιαιτερότητες αναφορικά με την ασύρματη μετάδοση και τις επιδράσεις τους και στην επίδοση και στην ισονομία στο Προχωρημένο Υλικό. Αλλά πρώτα, ας αναλύσουμε την επίδοση ως προς την ρυθμιζόμενη των συσκευών WiFi σε ένα σημείο πρόσβασης που λειτουργεί με την DCF.

18.2 Μία εκτενής απάντηση

Η τυχαία πρόσβαση προσφέρει μία συμπληρωματική προσέγγιση στον έλεγχο ισχύος ως μία μέθοδο διαχείρισης παρεμβολών. Για την ακρίβεια, υπάρχει και στο WiFi λειτουργία ελέγχου ισχύος, αλλά χρησιμοποιείται κυρίως για τη συμμόρφωση με τα όρια ενέργειας στη μη αδειοδοτημένη ζώνη και για την εξοικονόμηση ενέργειας μπαταρίας, και όχι τόσο για τη διαχείριση των παρεμβολών. Ενώ ο έλεγχος ισχύος μπορεί να αναλυθεί μέσω γραμμικής άλγεβρας (και μερικές φορές μέσω της θεωρίας παιγνίων και της θεωρίας βελτιστοποίησης), όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 1, η τυχαία πρόσβαση περιλαμβάνει πιθανοτικές ενέργειες από τις ασύρματες συσκευές και η ανάλυση της επίδοσής της απαιτεί ορισμένη βασική θεωρία των πιθανοτήτων.

Ούτε το CSMA στη DCF του WiFi δεν είναι ιδιαίτερα εύκολο για μοντελοποίηση, καθώς οι συγκρούσεις πλαισίων εξαρτώνται από τις ενέργειες της κάθε ασύρματης συσκευής, και το ιστορικό της δυαδικής εκθετικής υποχώρησης συνδέεται με την απόφαση μετάδοσης σε κάθε χρονοθυρίδα. Ένα πολύ γνωστό μοντέλο ανάλυσης απόδοσης χρησιμοποιεί μία διδιάστατη αλυσίδα Markov, η οποία υπερβαίνει την προοπτική γνώση για τις βασικές έννοιες των πιθανοτήτων και είναι πολύ περίπλοκο για αυτό το κεφάλαιο. Υπάρχει μία απλοποιημένη έκδοση που χρησι-

μποιεί πολύ απλά επιχειρήματα στις βασικές πιθανότητες και λίγη αναγωγή για να προκύψει η ουσία του περίπλοκου σχηματισμού. Και αυτή είναι η προσέγγιση που θα ακολουθήσουμε. Η βασική ιδέα είναι να βρεθούν δύο διαφορετικές εκφράσεις που σχετίζονται με την πιθανότητα μετάδοσης σε κάποια συγκεκριμένη χρονοθυρίδα με την πιθανότητα της σύγκρουσης, και έπειτα να υπολογιστεί η λύση και για τις δύο πιθανότητες, χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο εξισώσεις. Έπειτα, ο υπολογισμός της ρυθμαπόδοσης γίνεται εύκολος.

18.2.1 Έκφραση του S ως συνάρτηση του τ

Η αναμενόμενη δυναμικότητα S σε bps για τυχαία πρόσβαση CSMA στη DCF του WiFi ορίζεται ως:

$$S = \frac{\text{μέσος αριθμός των bit που μεταδίδονται επιτυχώς σε μία χρονοθυρίδα}}{\text{μέση διάρκεια μίας χρονοθυρίδας}} \quad (18.1)$$

Πρώτα, εξετάζουμε το μέσο αριθμό των bit που μεταδίδονται επιτυχώς σε μία χρονοθυρίδα. Το παραπάνω μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο τριών αριθμών:

$$P_s P_t L,$$

όπου το P_t είναι η πιθανότητα ότι πραγματοποιείται τουλάχιστον μία (ή και περισσότερες) μετάδοση, το P_s είναι η πιθανότητα ότι μία μετάδοση είναι επιτυχής, και το L είναι το μέσο μήκος φορτίου (μετρημένο σε byte ή bit).

Έστω το τ η πιθανότητα ότι ένας σταθμός μεταδίδει σε κάποια συγκεκριμένη χρονοθυρίδα. Τότε γνωρίζουμε ότι:

$$P_t = 1 - (1 - \tau)^N, \quad (18.2)$$

καθώς το P_t ισούται με 1 μείον την πιθανότητα ότι κανένας σταθμός δεν μεταδίδει, το οποίο με τη σειρά του είναι το γινόμενο των πιθανοτήτων ότι κάθε σταθμός δεν μεταδίδει: $1 - \tau$, για όλους τους σταθμούς N . Το παραπάνω θεωρεί ότι όλοι οι σταθμοί λαμβάνουν αποφάσεις μετάδοσης ανεξάρτητα. Το παραπάνω αποτελεί ένα παράδειγμα της *διαφορικής απολαβής (diversity gain)* της επίδρασης του δικτύου, με την εξαίρεση ότι πλέον αναφέρεται στην πιθανότητα ενός καλού γεγονότος (η μετάδοση περνάει χωρίς σύγκρουση) και όχι σε κάποιο κακό γεγονός (κάποιος σύνδεσμος παρουσιάζει αστοχία).

Επίσης γνωρίζουμε ότι:

$$P_s P_t = N\tau(1-\tau)^{N-1}, \quad (18.3)$$

καθώς η αριστερή πλευρά είναι η πιθανότητα ότι υπάρχει κάποια επιτυχημένη μετάδοση σε κάποια χρονοθυρίδα. Για κάθε σταθμό, αυτό θα πρέπει να είναι η πιθανότητα ότι μεταδίδει (τ), ενώ δεν μεταδίδει κάποιος από τους υπόλοιπους $(1 - \tau)^{N-1}$. Για ολόκληρο το δίκτυο είναι $N\tau(1 - \tau)^{N-1}$.

Τώρα εξετάζουμε τη μέση διάρκεια μίας χρονοθυρίδας. Αυτό εξαρτάται από τι συμβαίνει σε αυτή τη χρονοθυρίδα. Υπάρχουν τρεις πιθανότητες, όπως δείχνει και η Εικόνα 18.4.

- Καμία μετάδοση: η πιθανότητα είναι $1 - P_t$ και η χρονοθυρίδα είναι μία θυρίδα υποχώρησης (*backoff*) με διάρκεια T_b .
- Υπάρχει μετάδοση, αλλά δεν είναι επιτυχημένη: η πιθανότητα είναι $P_t(1 - P_s)$ και η χρονοθυρίδα είναι μία θυρίδα σύγκρουσης με διάρκεια T_c .
- Υπάρχει μετάδοση, και είναι επιτυχημένη: η πιθανότητα είναι $P_t P_s$ και η χρονοθυρίδα είναι μία επιτυχημένη θυρίδα με διάρκεια T_s .

Περιληπτικά, αν γνωρίζουμε πώς να υπολογίσουμε το τ , μπορούμε να υπολογίσουμε το P_t όπως και το P_s , και συνεπώς την αναμενόμενη ρυθμισμένη ρυθμολόγηση S :

$$S = \frac{P_t P_s L}{(1 - P_t) T_b + P_t (1 - P_s) T_c + P_t P_s T_s} \quad (18.4)$$

Από τις ποσότητες που αναγράφονται παραπάνω, οι N , L , T_b , T_c , και T_s είναι σταθερές. Οπότε απλά πρέπει να υπολογίσουμε το τ .

18.2.2 Υπολογίζοντας το τ

Πρώτα, μπορούμε να εκφράσουμε το c , την πιθανότητα ότι ένα πλαίσιο (που μεταδίδεται από κάποιο συγκεκριμένο σταθμό, π.χ. τον σταθμό Α) συγκρούεται με πλαίσια από άλλους σταθμούς, ως συνάρτηση του τ . Θεωρώντας ότι η πιθανότητα σύγκρουσης είναι ανεξάρτητη από το στάδιο υποχώρησης, προκύπτει:

$$c = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \quad (18.5)$$

Με σχόλια [C2]: Θέλει διόρθωση

καθώς το c είναι απλώς η πιθανότητα ότι τουλάχιστον ένας (μπορεί και περισσότεροι) από τους άλλους σταθμούς $N-1$ ο οποίος μεταδίδει πρόσθετα του σταθμού Α. Οπότε το (18.5) ακολουθεί το ίδιο επιχειρήμα όπως με αυτό που βρίσκεται πίσω από την έκφραση του P_t στο (18.2).

Έστω ότι μπορούμε να κάνουμε επίσης και το αντίθετο, και να εκφράσουμε το τ ως συνάρτηση του c . Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να αντικαταστήσουμε το c ως μία συνάρτηση του τ (18.5) και να λύσουμε αριθμητικά για το τ . Οπότε τώρα όλα καταλήγουν στο εξής: Βρείτε το τ (η πιθανότητα ότι ένας σταθμός μεταδίδει) σε σχέση με το c (η πιθανότητα ότι ένα μεταδιδόμενο πλαίσιο συγκρούεται).

Καθώς υπάρχουν πολλά στάδια υποχώρησης καταγεγραμμένα από το i , καθένα με ένα παράθυρο ανταγωνισμού που διπλασιάζει τα προηγούμενα στάδια, εξετάζουμε την κοινή πιθανότητα να μεταδίδει ένας σταθμός ενώ βρίσκεται σε στάδιο υποχώρησης i . Μπορούμε να εκφράσουμε αυτή την κοινή πιθανότητα με δύο τρόπους:

Πιθανότητα(μετάδοση) χ Πιθανότητα(σε στάδιο υποχώρησης i | μετάδοση)

και

Πιθανότητα (σε στάδιο υποχώρησης i) χ Πιθανότητα (μετάδοση) σε στάδιο υποχώρησης i),

και οι δύο παραπάνω εκφράσεις θα πρέπει να είναι οι ίδιες. Απλοποιούμε τις παραπάνω εκφράσεις: $\frac{\tau P(i|T)}{P(T|i)}$ και $\frac{P(i)P(T|i)}{P(T|i)}$. Οπότε έχουμε την επόμενη έκφραση του Bayes, η οποία χρησιμοποιείται επίσης στο Κεφάλαιο 7 για την ανάλυση των διαδοχικών πληροφοριών:

$$\tau \frac{P(i|T)}{P(T|i)} = P(i)$$

Αθροίζοντας σε όλα το i από το 0 (χωρίς υποχώρηση) στο B (ο μέγιστος αριθμός υποχωρήσεων που επιτρέπονται) και στις δύο πλευρές, προκύπτει το εξής:

$$\tau \sum_{i=0}^B \frac{P(i|T)}{P(T|i)} = \sum_{i=0}^B P(i) = 1 \quad (18.6)$$

Αν μπορούμε να εκφράσουμε το $\frac{P(i|T)}{P(T|i)}$ και το $\frac{P(T|i)}{P(i)}$ σε όρους c , μπορούμε να έχουμε μία έκφραση για το τ σε όρους c , που ολοκληρώνει τον υπολογισμό μας για το S_2 .

Ο υπολογισμός του $\frac{P(i|T)}{P(T|i)}$ είναι εύκολος: αν ένας σταθμός μεταδίδει στο στάδιο υποχώρησης i , θα πρέπει να έχει υποστεί i συγκρούσεις στο παρελθόν και μία μη σύγκρουση τώρα. Μπορούμε να σημειώσουμε αυτή την πιθανότητα, βεβαιώνοντας ότι είναι κανονικοποιημένη.

$$P(i|T) = \frac{c^i(1-c)}{1-c^{B+1}}$$

Ο υπολογισμός του $\frac{P(T|i)}{P(i)}$ είναι επίσης εύκολος (με λίγη αναγωγή): η θυρίδα μετάδοσης είναι μία θυρίδα από μόνη της, οπότε η διάρκεια ζωής του σταδίου υποχώρησης i , κατά μέσο όρο, είναι $1+T_i$ θυρίδες. Εδώ το T_i είναι η μέση τιμή του μετρητή υποχώρησης στο στάδιο i και μπορεί να εκφραστεί ως: $T_i = \frac{1}{2} (0 + 2^i W_{\min})$.

όπου W_{\min} είναι το ελάχιστο μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού. Όπως είναι προφανές από τα παραπάνω, έχουμε θεωρήσει ότι η χρονοθυρίδα για τη μετάδοση έχει επιλεγεί τυχαία μεταξύ του «αυτή τη στιγμή» και του «ανώτερου ορίου της δυαδικής εκθετικής υποχώρησης». Το πραγματικό μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού W είναι 2 υψωμένο σε κάποια ακέραια δύναμη και έπειτα μείον 1. Αγνωστούμε το μέρος "μείον 1" για λόγους απλότητας. Τώρα έχουμε:

$$P(T|i) = \frac{1}{1+T_i}$$

Τέλος, μπορούμε να τα συγκεντρώσουμε όλα μαζί (18.6) και να προκύψει η παρακάτω έκφραση του τ σε όρους c :

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{1-\varepsilon}{1-c \times (B+1)} \sum_i c^i T_i} \quad (18.7)$$

Συνεπώς, απλά εισάγετε την (18.5) στην (18.7). Μπορούμε να λύσουμε για τ αριθμητικά, ως μία συνάρτηση του αριθμού των σταδίων υποχώρησης B και του ελάχιστου μεγέθους του παραθύρου ανταγωνισμού W_{min} .

18.2.3 Ενώνοντάς τα όλα μαζί

Αφού βρεθεί το τ , μέσω των (18.2, 18.3) έχουμε το P_r και το P_s , επίσης, και μπορούμε έπειτα να υπολογίσουμε το S (18.4) όσον αφορά τις παραμέτρους του πρωτοκόλλου WiFi DCF: L , B , W_{min} , τις διάρκειες των τριών τύπων χρονοθυρίδων T_b , T_c , T_s , και τον αριθμό των σταθμών N .

18.3 Παραδείγματα

18.3.1 Παράμετροι και χρονοθυρίδες

Πριν από οποιονδήποτε υπολογισμό, πρέπει να καθορίσουμε τις παραμέτρους του πρωτοκόλλου DCF, L , B , W_{min} και τις διάρκειες των χρονοθυρίδων T_b , T_s , T_c .

Θεωρούμε ότι το DCF χρησιμοποιείται στο 802.11g στα 54 Mbps. Από τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου και το Σχήμα 18.4, οι σχετικές παράμετροι χρονισμού είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \text{χρόνος θυρίδας} &= 9 \mu\text{s}, \\ \text{SIFS} &= 10 \mu\text{s}, \\ \text{DIFS} &= \text{SIFS} + (2 \times \text{χρόνος θυρίδας}) = 28 \mu\text{s}. \end{aligned}$$

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, $W_{min} = 15$. Επίσης, θέτουμε $L = 8192$ bit και $B = 3$ ως τις προεπιλεγμένες τιμές. Αργότερα θα σαρώσουμε τις τιμές τους για να διερευνήσουμε την επίδραση.

1. *Διάρκεια του T_b* . Είναι απλώς η διάρκεια του DIFS, ήτοι $T_b = 28 \mu\text{s}$.
2. *Διάρκεια του T_s* . Μία επιτυχημένη μετάδοση αποτελείται και από τη μετάδοση ενός πλαισίου δεδομένων από τον αποστολέα, αλλά και από τη μετάδοση ενός πλαισίου ACK από τον αποδέκτη, μαζί με την κατάλληλη απόσταση: [πλαίσιο δεδομένων] + SIFS + [πλαίσιο ACK] + DIFS.

Ένα πλαίσιο δεδομένων αποτελείται από ένα προίμιο στρώματος PHY διάρκειας $16 \mu\text{s}$, από μία κεφαλίδα PHY των 40-bit, από μία κεφαλίδα MAC των 240 bit, από το φορτίο των L -bit, και από κώδικα CRC των 32-bit. Οι προδιαγραφές του πρωτοκόλλου ορίζουν ότι η κεφαλίδα PHY διαχωρίζεται περαιτέρω και αποστέλλεται με δύο διαφορετικούς ρυθμούς: τα πρώτα 24 bit σε 6 Mbps ώστε να είναι πιο ανθεκτικά έναντι σφαλμάτων στο κανάλι, με αποτέλεσμα χαμηλότερο ρυθμό μετά-

δοσης, και τα υπόλοιπα 16 bit στα 54 Mbps. Συνεπώς, ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή ενός πλαισίου δεδομένων είναι:

$$16 + \frac{24}{6} + \frac{16+240+32}{54} + \frac{L}{54} = 25.33 + \frac{L}{54} \mu\text{s}.$$

Αντίστοιχα, ένα πλαίσιο ACK αποτελείται από ένα προοίμιο PHY 16 μs , μία κεφαλίδα PHY των 40 bit (και πάλι διαχωρισμένη και σταλμένη με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης) και από ένα πλαίσιο στρώματος MAC των 112-bit (κεφαλίδα και CRC). Συνεπώς, ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή ενός πλαισίου ACK είναι:

$$16 + \frac{24}{6} + \frac{16+112}{54} = 22.37 \mu\text{s},$$

και προκύπτει $T_s = 25.33 + L/54 + 10 + 22.37 + 28 = 85.70 + L/54 \mu\text{s}$.

(3) *Διάρκεια του T_c* . Όταν υπάρχει σύγκρουση, ο αποστολέας πρέπει να περιμένει για ολόκληρη τη διάρκεια του πλαισίου ACK πριν αποφασίσει ότι έχει προκύψει κάποια σύγκρουση (σημειώνοντας την απουσία ενός ACK), οπότε $T_c - T_s = 85.70 + L/54 \mu\text{s}$.

18.3.2 Ρυθμαπόδοση

Πρώτα, εισάγοντας το $T_i = (0 + 2^i W_{\min})/2$ στο (18.7), λύνουμε αριθμητικά για το τ σε:

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{1-c}{1-c^{(B+1)}} \sum_i c^{(2^i(i-1))} W_{\min}} \quad \text{όπου } c = 1 - (1 - \tau)^{N-1}.$$

Έπειτα εισάγουμε τη λύση του τ στον τύπο για το S :

$$S = \frac{N\tau(1-\tau)N-1L}{(1-\tau)NTb + (1-(1-\tau)N) - N\tau(1-\tau)N-1)Tc + N\tau(1-\tau)N-1T8}$$

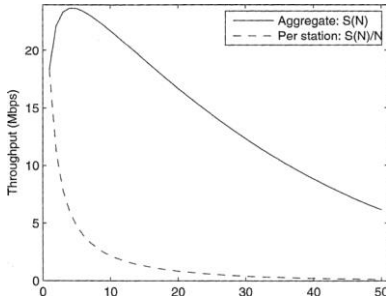
ενώ μεταβάλλονται οι τιμές των N , B , W_{\min} και L . Εκτός και αν ορίζεται, οι προεπιλεγμένες τιμές τους είναι $N = 5$, $B = 3$, $W_{\min} = 15$, και $L = 8192$. Με αυτές τις τιμές $\tau = 0,0765$. Τώρα, ποια είναι η επίδραση του αριθμού των σταθμών, η μέση επιθετικότητα πρόσβασης, και το μέγεθος του φορτίου;

(1) *Μεταβαλλόμενο N* (Εικόνα 18.8). Αυτό είναι το βασικό γράφημα που αναζητούμε σε αυτό το κεφάλαιο, το οποίο ποσοτικοποιεί την επίδραση του μεγέθους του πλήθους στην «τραγωδία των κοινών τόπων των WiFi».

- Καθώς αυξάνεται το N , η ρυθμαπόδοση $S(N)/N$ ανά σταθμό μειώνεται επειδή περισσότεροι σταθμοί ανταγωνίζονται για το ίδιο κανάλι. Η πτώση είναι αρκετά απότομη από το $N = 2$ στο $N = 15$. Η τιμή της χωρητικότητας γίνεται αρκετά χαμηλή, κάτω από 2 Mbps, μόλις το N γί-

νει 10. Το παραπάνω τονίζει την έλλειψη δυνατότητας κλιμάκωσης του CSMA.

- Η αθροιστική ρυθμαπόδοση $S(N)$ αρχικά μειώνεται για μικρό N καθώς οι σταθμοί περιορίζονται κατ' ουσία από τον μηχανισμό της εκθετικής υποχώρησής τους. Ακόμα και όταν ένας σταθμός δεν έχει κάποιους ανταγωνιστές για το κανάλι, και πάλι καταλαμβάνει μία θυρίδα μετάδοσης ομοιόμορφα και τυχαία μεταξύ 0 και W_{min} , και αυτό οδηγεί σε ανεπάρκεια. Η προσθήκη σταθμών βοηθά ώστε να χρησιμοποιηθεί το κανάλι, αν δεν υπάρχει σημαντικός ανταγωνισμός (όταν το N είναι μικρό).



Σχήμα 18.8 Ρυθμαπόδοση έναντι αριθμού σταθμών. Καθώς ο αριθμός των χρηστών N αυξάνεται, η συνολική ρυθμαπόδοση τελικά πέφτει. Η μέση ρυθμαπόδοση ανά χρήστη πέφτει σε μικρές τιμές των σχεδόν 2 Mbps όταν υπάρχουν περίπου δέκα χρήστες. Η γρήγορη πτώση της μέσης ρυθμαπόδοσης ανά χρήστη, ακόμα και για ένα χαμηλό N , τονίζει την έλλειψη δυνατότητας κλιμάκωσης του CSMA.

- Παρά τη διαφημισμένη ρυθμαπόδοση των 54 Mbps, η πραγματική μέγιστη δυναμικότητα κυμαίνεται γύρω στα 25 Mbps. Αυτό προκύπτει εν μέρει επειδή μόνο το φορτίο αποστέλλεται σε 54 Mbps και υπάρχει σημαντικός επιβάρυνση στο στρώμα PHY (π.χ. το προοίμιο και η κεφαλίδα που αποστέλλονται στα 6 Mbps).

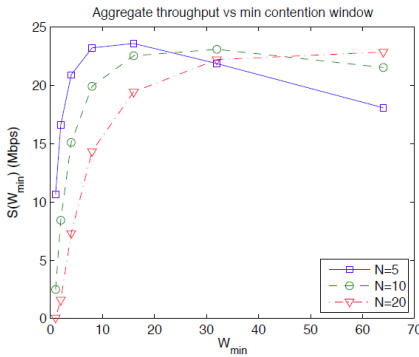
(2) Μεταβλλόμενο W_{min} (Εικόνα 18.9). Ένα μικρότερο W_{min} οδηγεί σε υψηλότερη επιθετικότητα κάποιου σταθμού όσον αφορά τη χρήση του καναλιού.

- Όταν δεν υπάρχει συμφόρηση στο κανάλι ($N = 5$), βοηθά να είναι περισσότερο επιθετικό.

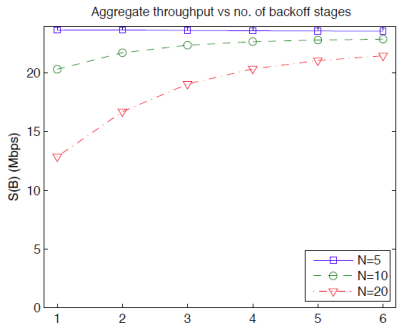
- Όταν υπάρχει συμφόρηση στο κανάλι ($N = 20$), η επιθετικότητα οδηγεί σε περισσότερες συγκρούσεις, οπότε είναι καλύτερα να επιλεγεί ένα μεγαλύτερο W_{min} και μικρότερη επιθετικότητα.

(3) *Μεταβαλλόμενο B* (Εικόνα 18.10). Ένα μεγαλύτερο B τείνει να αυξάνει το μέσο μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού (ήτοι καθίσταται λιγότερο επιθετικό). Συνεπώς, η παρατήρηση είναι παρόμοια με αυτή για το W_{min} :

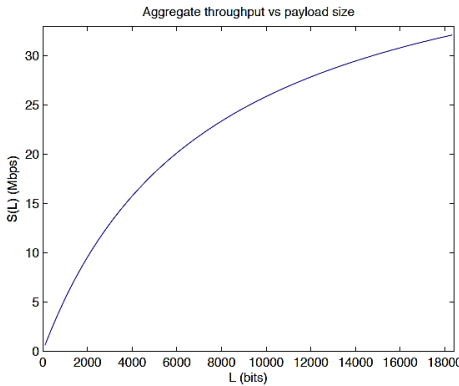
- Όταν $N = 5$, η αύξηση του B δεν βοηθά καθόλου.
- Όταν το $N = 20$, η λιγότερη επιθετικότητα (αύξηση του B) βοηθά πολύ.



Σχήμα 18.9 Συνολική ρυθμαπόδοση έναντι ελάχιστου παραθύρου ανταγωνισμού. Η αύξηση του ελάχιστου μεγέθους του παραθύρου ανταγωνισμού W_{min} αρχικά έχει μία θετική επίδραση στη μέση ρυθμαπόδοση, καθώς ο ανταγωνισμός είναι λιγότερο επιθετικός. Έπειτα από κάποια οριακή τιμή, η αύξηση του ελάχιστου παραθύρου επηρεάζει αρνητικά τη ρυθμαπόδοση (λόγω του επιβάρυνσης της σε αναμονή) περισσότερο από ότι βοηθά. Όσο περισσότεροι χρήστες υπάρχουν, τόσο μεγαλύτερη καθίσταται αυτή η οριακή τιμή.



Σχήμα 18.10 Συνολική ρυθμαπόδοση έναντι αριθμού σταδίων υποχώρησης. Καθώς αυξάνεται το B , επιτρέπονται περισσότερα στάδια υποχώρησης, και η μέση υποχώρηση αυξάνεται. Ο περισσότερο συντηρητικός ανταγωνισμός αυξάνει τη μέση ρυθμαπόδοση (αλλά επίσης αυξάνει και τον χρόνο αναμονής (latency)).



Σχήμα 18.11 Συνολική ρυθμαπόδοση έναντι μεγέθους φορτίου. Ένα μεγαλύτερο φορτίο L σημαίνει μικρότερο ποσοστό επιβάρυνσης. Η ρυθμαπόδοση φυσικά αυξάνει. Αν το μοντέλο εμπειρείχε το γεγονός ότι ένα μεγαλύτερο φορτίο επίσης αυξάνει την πιθανότητα σύγκρουσης, η καμπύλη θα παρουσίαζε κάμψη καθώς το L γίνεται πολύ μεγάλο.

(4) *Μεταβαλλόμενο L* (Σχήμα 18.11). Το μέγεθος του φορτίου σε σχέση με το μέγεθος της επιβάρυνσης επίσης έχει σημασία.

- Η αύξηση του μεγέθους του φορτίου βοηθά, γιατί προκύπτει λιγότερη επιβάρυνση.
- Αλλά αυτό το μοντέλο δεν καταγράφει την επίδραση ενός πλαισίου με μεγαλύτερο φορτίο που έχει μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης. Στην πραγματικότητα, αναμένουμε να αυξάνεται η ρυθμαπόδοση μέχρι να φτάσει σε κάποια βέλτιστη τιμή, και έπειτα να μειώνεται.

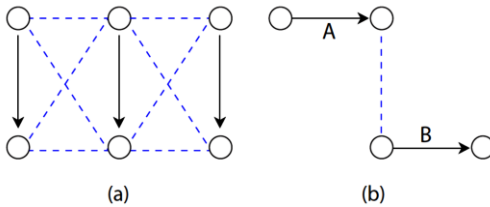
18.4 Προηγμένο υλικό

18.4.1 Επίδραση της τοπολογίας των παρεμβολών

Είδαμε ότι το DCF εφαρμόζει διάφορες έξυπνες ιδέες για να επιτρέψει ένα λογικό έλεγχο πρόσβασης στα μέσα, όπου ένα μικρό μέρος του μηνύματος αποτελεί την επιβάρυνση. Ωστόσο, είναι επίσης γνωστό ότι το DCF μπορεί μερικές φορές να είναι αναποτελεσματικό ενώ συχνά μεροληπτεί, όπως θα δείξει μία άσκηση παρακάτω. Έχουμε συναντήσει την ποσοτικοποίηση της αμεροληψίας/δικαιοσύνης (*fairness*) πολλές φορές μέχρι στιγμής, και στο Κεφάλαιο 20 θα εστιάσουμε στις μονάδες μέτρησης της αμεροληψίας.

Μέρος της αιτίας πίσω από την αναποτελεσματικότητα και τη μεροληψία του DCF πηγάζει από τη σκληρή πραγματικότητα της ανίχνευσης και της παρεμβολής στα ασύρματα δίκτυα. Το πρόβλημα του κρυφού κόμβου προκύπτει από τη *διαφορά* μεταξύ του εύρους ανίχνευσης και του εύρους παρεμβολής, όπως έχουμε δει. Το εύρος ανίχνευσης είναι επίσης *ασύμμετρο*: ένα ζεύγος (αναμεταδότης, δέκτης) ενδεχομένως να μπορεί να ανιχνεύει και να παρεμβάλλεται με το άλλο, αλλά όχι και με την αντίστροφη φορά.

Ένα παράδειγμα είναι η τοπολογία «ροής στο κέντρο» που παρουσιάζει το Σχήμα 18.12(a). Η συνεδρία στο κέντρο μπορεί να ανιχνεύσει τις άλλες δύο συνεδρίες σε κάθε πλευρά, και θα πρέπει να είναι ευγενική, περιμένοντας και ακούγοντας και τις δύο. Αντίθετα, και οι δύο πλευρικές συνεδρίες μπορούν μόνο να ανιχνεύσουν τη μεσαία συνεδρία, και χρειάζεται να περιμένουν και να ακούν λιγότερο.



Σχήμα 18.12: Δύο περισσότερο σημαντικές τοπολογίες, όπου οι συνεχόμενες γραμμές αναπαριστούν την σκοπούμενη μετάδοση, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν την παρεμβολή, όπως και την ανίχνευση. (a) ροή στο κέντρο και (b) ασύμμετρη ανίχνευση. Στο (a), η μεσαία συνεδρία θα πρέπει να περιμένει μέχρι να σιγήσει και η αριστερή, αλλά και η δεξιά ροή, και συχνά πέφτει σε σχεδόν μηδενική δυναμικότητα στην πραγματικότητα. Στο (b), η συνεδρία A υφίσταται παρεμβολή από τη συνεδρία B, αλλά όχι και το αντίστροφο. Η συνεδρία A έχει ως αποτέλεσμα πολύ μικρότερη ρυθμαπόδοση.

Μία αναλογικά δίκαιη λύση θα παρείχε στις δύο πλευρικές συνεδρίες την ίδια ρυθμαπόδοση και στη μεσαία συνεδρία τη μισή από αυτήν. Αλλά το DCF του WiFi σίγουρα θα οδηγήσει τη μεσαία συνεδρία σε σχεδόν μηδενική ρυθμαπόδοση.

Ακόμα ένα παράδειγμα είναι η ασύμμετρη ανίχνευση και η τοπολογία παρεμβολής στην Εικόνα 18.12 (b). Η συνεδρία A δεν μπορεί να ανιχνεύσει τη συνεδρία B, και συνεπώς συγκρούονται συχνά. Σε μία αναλογικά δίκαιη κατανομή, και οι δύο συνεδρίες θα πρέπει να έχουν την ίδια ρυθμαπόδοση. Αλλά στο DCF του WiFi, η ρυθμαπόδοση της συνεδρίας A θα είναι σημαντικά λιγότερη από αυτή της συνεδρίας B.

Έχουν συνταχθεί πολλές εργασίες για τη βελτίωση του DCF του WiFi, κυρίως επειδή είναι πολύ περισσότερο εφικτός ο πειραματισμός σε μία μη αδειοδοτημένη ζώνη, σε σχέση με μία αδειοδοτημένη ζώνη στα πανεπιστημιακά εργαστήρια. Για παράδειγμα, μία από τις πιο πρόσφατες βελτιώσεις του DCF έρχεται από ένα μοντέλο βελτιστοποίησης της προσαρμογής των παραμέτρων του CSMA: κάθε αναμεταδότης αλλάζει την επιθετικότητα ανταγωνισμού και τη διάρκεια διατήρησης του καναλιού παρατηρώντας την υφιστάμενη ρυθμαπόδοσή του, εξισορροπώντας μεταξύ της ζήτησης για χωρητικότητα και της παροχής της ανατεθειμένης χωρητικότητας (επί των πρόσφατων χρονοθυρίδων), όπως στις περιπτώσεις των αντίστοιχων ενεργειών εξισορρόπησης για τον έλεγχο συμφόρησης των δικτύων TCP ή στην περίπτωση ελέγχου ισχύος στη κινητή τηλεφωνία. Οι ερευνητές έπειτα μελετούν αν η κατανομημένη ενέργεια, χωρίς οποιαδήποτε διεκπεραίωση μηνύματος (πέραν του RTC/CTS), μπορεί να συγκλίνει στη βέλτιστη ρυθμαπόδοση για όλες τις συσκευές. Οι τοπολογίες κρυφού κόμβου, ροής στο κέντρο, και ασύμμετρης

ανίχνευσης, αποτελούν τρεις από τις τοπολογίες που θα πρέπει να ελεγχθούν για οποιαδήποτε από αυτές τις εναλλακτικές για το CSMA που χρησιμοποιούνται στα σημερινά δίκτυα WiFi. Η περίπλοκη φύση της ανίχνευσης (ατελής και ασύμμετρη) και της παρεμβολής (Σχήμα 18.3) θα πρέπει επίσης να ενσωματωθεί προσεκτικά στην αξιολόγηση.

18.4.2 Διαχείριση στο WiFi

Υπάρχουν πολλές παράμετροι στο πρωτόκολλο WiFi και δεν είναι εύκολο να ρυθμιστούν όλες. Εξαιτίας της αναφοράς δεδομένων παθητικών μετρήσεων ή δεδομένων ενεργής ανίχνευσης που φέρουν θόρυβο, θα πρέπει να πραγματοποιούμε ανάλυση της επίδοσης μέσω του συσχετισμού σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες και φυσικές τοποθεσίες, όπως και σε διαφορετικά επίπεδα πρωτοκόλλων, ώστε να ανακαλύψουμε τη βασική αιτία πίσω από την έλλειψη αποτελεσματικότητας ή τη μεροληψία που παρατηρείται. Έπειτα, ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους του WiFi θα πρέπει να προσαρμοστούν, είτε σε πραγματικό χρόνο επιτόπου, είτε σε πολύ βραδύτερη χρονική κλίμακα εξ' αποστάσεως. Οι παραπάνω προσαρμογές ρυθμίσεων συμπεριλαμβάνουν τις εξής:

- Δυναμική αξιολόγηση της ανταλλαγής μεταξύ ρυθμού και αξιοπιστίας χρησιμοποιώντας διαφορετική διαμόρφωση και κώδικες, και συνεπώς διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης και πιθανότητες αποκωδικοποίησης σφαλμάτων για κάποια συγκεκριμένη κατάσταση δικτύου.
- Δυναμική προσαρμογή των αναθέσεων καναλιών (π.χ. από τα 11 κανάλια που είναι διαθέσιμα στο 802.11b) και μετάδοση των επιπέδων ισχύος για την εξισορρόπηση των φορτίων στους σταθμούς που βρίσκονται σε γειτονικά σημεία πρόσβασης.
- Δυναμική προσαρμογή της συχνότητας σάρωσης, η οποία καθορίζει πόσο συχνά μία συσκευή WiFi μπορεί να έχει την ευκαιρία να συσχετιστεί ξανά η ίδια με ένα διαφορετικό σημείο πρόσβασης. Η πολύ συχνή σάρωση επιφέρει περιττή διακοπή στις μεταδόσεις υπό εξέλιξη. Η μη τακτική σάρωση δημιουργεί ανεπιθύμητες διαμορφώσεις ζευγών αναμεταδότη - δέκτη.
- Δυναμική προσαρμογή του ανώτερου δεσμευμένου B στον αριθμό των επαναλήψεων που επιτρέπονται για τη μετάδοση ενός πλαισίου. Όταν το χρονόμετρο επανάληψης λήξει, το πλαίσιο δηλώνεται ως χαμένο και η ανάκτηση ανατίθεται στα ανώτερα στρώματα. Ένας πολύ σύντομος χρόνος επανάληψης ισοδυναμεί με απώλεια μίας ευκαιρίας ανάκτησης του πλαισίου, ενώ ένας πολύ καθυστερημένος χρόνος επανάληψης σημαίνει ότι τα ανώτερα στρώματα, όπως το TCP και ο έλεγχος συμφόρησής του, μπορεί να ενεργοποιήσουν τα δικά τους χρονόμετρα αποσύνδεσης (*timeout timer*).
- Δυναμική προσαρμογή του μεγέθους του πλαισίου πάνω από το οποίο χρησιμοποιείται το RTS/CTS. Το RTS/CTS είναι μία έξυπνη ιδέα, αλλά

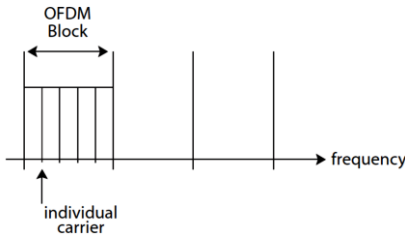
εισάγει επιβάρυνση. Μόνο όταν το φορτίο L είναι αρκετά μεγάλο έχει νόημα η χρήση του BTS/CTS. Θα δούμε ένα παράδειγμα σε μία άσκηση.

18.4.3 OFDM και MIMO

Λόγω του περιορισμένου βασικού πόρου (ο περιορισμός του εύρους) και της φύσης των ασύρματων επικοινωνιών, οι οποίες επηρεάζονται από παρεμβολές (αρνητική εξωτερικότητα), οι άνθρωποι έχουν αφιερώσει πολύ χρόνο στη σχεδίαση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και του WiFi. Θέλουμε να αποφύγουμε την τραγωδία των κοινών (*tragedy of the commons*). Υπάρχουν διάφορες διαστάσεις προς τις οποίες μπορούμε να προσανατολίσουμε τη σκέψη μας.

Χρόνος: π.χ. το CSMA αποτελεί ένα καταναμημένο πρωτόκολλο που επιτρέπει το μοίρασμα του χρόνου μεταξύ των σταθμών WiFi και των σημείων πρόσβασης χωρίς την κατανομή αποκλειστικών πόρων, αλλά και χωρίς κεντρικό έλεγχο.

Συχνότητα: Έχουμε δει το διαχωρισμό της συχνότητας για τη διπλή ταυτόχρονη επικοινωνία: διαχωρισμός της ζώνης συχνότητας σε δύο μέρη - ένα για την ανερχόμενη ζεύξη και ένα για την κατερχόμενη ζεύξη. Ακόμα μία ιδέα, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.13, είναι να χωριστούν έκαστο από αυτά τα μέρη ακόμα περισσότερο σε πολλά μικρά τεμάχια συχνότητας, τα οποία μερικές φορές αποκαλούνται φορείς συχνότητας.



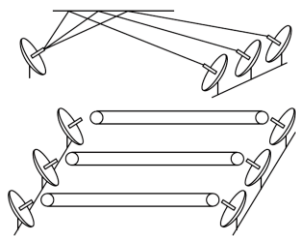
Σχήμα 18.13 Μία εννοιολογική παρουσίαση του OFDM, όπου η ζώνη των συχνοτήτων (frequency) κόβεται σε κομμάτια και κάθε κομμάτι (OFDM block) χωρίζεται περαιτέρω σε μία ομάδα φορέων. Τα σήματα διαμορφώνονται σε κάθε φορέα (individual carrier) για μετάδοση, και η επεξεργασία σημάτων εντός και επί των τεμαχίων βοηθά στη μείωση της παραμόρφωσης του σήματος.

Μαζί με την προσέγγιση Paris metro pricing, αυτή είναι η δεύτερη φορά που έχουμε δει την χρήση μη συγκέντρωσης πόρων. Αυτή τη φορά, η αιτία πίσω από τη μη συγκέντρωση των πόρων είναι η επεξεργασία σήματος και όχι η μεγιστοποίηση των εσόδων. Υπάρχουν αποτελεσματικοί τρόποι για την επεξεργασία των σημάτων που μεταδίδονται σε στενές ζώνες συχνοτήτων, έτσι ώστε να μπορεί να διατηρηθεί

μία υψηλή φασματική επίδοση, μετρούμενη σε bit ανά δευτερόλεπτο ανά Hz. Φυσικά, οι φορείς με καλύτερη ποιότητα καναλιού θα χρησιμοποιούνται περισσότερο, π.χ. αφιερώνοντας περισσότερο από το σύνολο ισχύος εκεί. Μία κοινή ονομασία για αυτή την ιδέα είναι η **OFDM**, και χρησιμοποιείται στα WiFi 802.11a και 802.11g, ώστε να επιτρέπει μία ταχύτητα φυσικού στρώματος μέχρι και 54 Mbps. Παρόμοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται επίσης στις τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας 4ης γενιάς (4G) και στις τεχνολογίες DSL.

Χώρος: Στα ασύρματα δίκτυα, όπως και στα κοινωνικά δίκτυα και στα δίκτυα P2P, η ίδια η έννοια ενός «συνδέσμου/ζεύξης» είναι περίπλοκη. Δεν υπάρχουν αγωγοί στον αέρα, απλά ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με ενέργεια που διαχέεται σε αυτό.

- Από τις πρώτες ημέρες των ασύρματων επικοινωνιών, ένα πρώτο βήμα για τη χρήση της χωρικής διάστασης ήταν η εγκατάσταση πολλαπλών κεραιών στο δέκτη, έτσι ώστε να μπορούν να συλλέγονται οι ενέργειες που ανακλώνται από διαφορετικά μονοπάτια. Αυτά τα σήματα έπειτα υφίσταται επεξεργασία, π.χ. ποσοτικοποιώντας το βαθμό ομοιότητάς τους, χρησιμοποιώντας συντελεστές συσχετισμού, όπως είδαμε στη σύσταση του Netflix στο Κεφάλαιο 4, και συνδυάζοντάς τους με ένα σταθμισμένο άθροισμα, παρόμοιο με το AdaBoost που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6. Το παραπάνω επιτυγχάνει τη διαφορική απολαβή (Σχήμα 18.14 άνω γράφημα) επωφελούμενο από το πλήθος των καναλιών, το οποίο συμβολίζεται με το $1-(1-p)^N$. Σε αυτή την περίπτωση, το "πλήθος" αποτελεί το σύνολο των καναλιών που βρίσκονται μεταξύ του αναμεταδότη και του δέκτη, και το p αποτελεί την πιθανότητα ενός από αυτά τα κανάλια να βρίσκεται σε κατάσταση με ιδιαίτερο θόρυβο.
- Για παραπάνω από δύο δεκαετίες, οι άνθρωποι έχουν επίσης μελετήσει τον τρόπο εγκατάστασης και έπειτα της επωφελούς χρήσης πολλαπλών κεραιών στην πλευρά του αναμεταδότη, αποστέλλοντας διαφορετικές εκδόσεις του σήματος από κάθε μία από αυτές τις κεραιές.



Σχήμα 18.14 Μπορεί να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές κεραιές για την επίτευξη διαφορικής απολαβής (άνω γράφημα) ή απολαβής πολυπλεξίας (multiplexing) (κάτω

γράφημα) σε ασύρματα δίκτυα. Αυτοί οι δύο τύποι απολαβών που χρησιμοποιούν το πλήθος συναντώνται επίσης και στα κοινωνικά δίκτυα.

Αντές αποκαλούνται συστοιχίες κεραίων ή έξυπνες κεραίες. Ορισμένα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας έχουν χρησιμοποιήσει επίσης έξυπνες κεραίες για να δημιουργήσουν Πολλαπλή Προσπέλαση Διαίρεσης Χώρου (Space Division Multiple Access).

- Από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, τα συστήματα Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input Multiple Output), με πολλαπλές κεραίες και στον αναμεταδότη και στο δέκτη έχουν περάσει από την ακαδημαϊκή έρευνα στην εκτεταμένη χρήση. Για παράδειγμα, τα νέα συστήματα WiFi 802.11g βασίζονται σε MIMO, με μέχρι και τέσσερις κεραίες αναμετάδοσης και τέσσερις κεραίες λήψης, μία διαμόρφωση 4x4. Στη θεωρία, αν υπάρχει αρκετή ποικιλομορφία στα κανάλια και επαρκής γνώση για τις συνθήκες των καναλιών στον αναμεταδότη ή στο δέκτη, έχουμε ένα παράγοντα αύξησης N στην ταχύτητα για ένα σύστημα MIMO $N \times N$. Αυτό οφείλεται στην απολαβή πολυπλεξίας που επωφελείται από το πλήθος, καθώς αυτά τα σήματα που αποστέλλονται μέσω διαφορετικών καναλιών που δημιουργούνται από το MIMO «συσσωρεύονται» ώστε να δημιουργήσουν έναν αγωγό υψηλής ταχύτητας. Επιτυγχάνει, έτσι, την απολαβή πολυπλεξίας (Εικόνα 18.14, κάτω γράφημα). Επίσης, μας θυμίζει τον παράγοντα μείωσης N για την εύρεση του μέσου όρου των ανεξάρτητων ειδικασιών στο Κεφάλαιο 5.

Θα μελετήσουμε τις ταχύτητες των OFDM, MIMO, και των φυσικών στρωμάτων στο επόμενο κεφάλαιο και θα εξετάσουμε τη ρυθμιαπόδοση, όπως αυτή παρατηρείται από τους τελικούς χρήστες ενός ασύρματου κυβελωτού δικτύου.

Σύνοψη

Πλαίσιο 18 Διαχείριση παρεμβολών μέσω τυχαίας πρόσβασης

Το WiFi χρησιμοποιεί τη μη αδειοδοτημένη ζώνη και βασίζεται σε πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης για την επίλυση του ανταγωνισμού των σημάτων και για το μετριασμό της αρνητικής επίδρασης του δικτύου. Το DCF του χρησιμοποιεί μία έκδοση του CSMA που χρησιμοποιεί τυχαίοποίηση, περιόδους αναμονής και ακρόασης, και περιορισμένη μετάδοση εμφανών μηνυμάτων για τη διαχείριση των παρεμβολών. Αλλά η αποτελεσματικότητά του μειώνεται γρήγορα καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών και ο ανταγωνισμός καθίσταται ιδιαίτερα έντονος για επίλυση μέσω καταναμημένου χρονο-προγραμματισμού.

Περαιτέρω μελέτη

Υπάρχουν κυριολεκτικά χιλιάδες ερευνητικές εργασίες για όλες τις πτυχές του WiFi από τα τέλη του 1990, σχετικά με την επίδοση ή την ασφάλεια, ή σχετικά με νέα πρωτόκολλα και με πειραματισμό με υλικά. Το παραπάνω οφείλεται εν μέρει στη διαθεσιμότητα των πλατφορμών προσομοίωσης και πειραματισμού για μεταδόσεις σε μη αδειοδοτημένες ζώνες. Σχεδόν κάθε ερευνητική ομάδα που ασχολείται με τις ασύρματες επικοινωνίες και τη δικτύωση στον κόσμο έχει δημοσιεύσει κάποιες εργασίες για το WiFi.

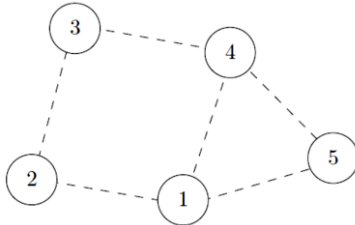
1. Η βασική πηγή των προηγούμενων και των υφιστάμενων προτύπων βρίσκεται στον ιστοτόπο της IEEE: IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks Working Group, www.ieee802.org/11
Πολλές λευκές βίβλοι και εκπαιδευτικά υλικά για τις πρακτικές λειτουργίες του WiFi μπορούν να βρεθούν στο WiFi Consortium, στη διεύθυνση www.wifi.org.
2. Το παρακάτω είναι ένα καλογραμμένο και αναλυτικό βιβλίο για τα πρωτόκολλο WiFi:
M. S. Gast, *802.11 Wireless Networks*, 2nd edn., O'Reilly, 2005.
3. Η δεύτερη έκδοση του παρακάτω εγχειριδίου για τις ασύρματες επικοινωνίες πραγματοποιεί μία εκτεταμένη κάλυψη των τεχνολογιών φυσικών στρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των OFDM και MIMO, στα τελευταία πρότυπα:
802.11g. A. F. Molish, *Wireless Communications*, 2nd edn., Wiley, 2011.
4. Μία σύντομη παραγωγή ενός ευρέως αναφερόμενου μοντέλου για την επίδοση του DCF μπορεί να βρεθεί στην παρακάτω εργασία, την οποία ακολουθήσαμε στο παράδειγμα του παρόντος κεφαλαίου:
G. Bianchi and I. Tinnirello, "Remarks on IEEE 802.11 DCF performance evaluation," *IEEE Communication Letters*, τόμος 9, αριθμ. 8, σελ. 765-767, Αύγουστος 2005.
5. Το CSMA στο WiFi αποτελεί μία ασύρματη παραλλαγή του αρχικού πρωτοκόλλου τυχαίας πρόσβασης στο Ethernet, το οποίο εφευρέθηκε από τον Metcalfe στη Xerox PARC το 1976:
R. Metcalfe and D. R. Boggs, "Ethernet: Distributed packet switching for local computer networks," *Communications of the ACM*, τόμος 19, αριθμ. 7, σελ. 395-404, Ιούλιος 1976.

Προβλήματα

18.1 Κρυφοί κόμβοι *

Εξετάστε το δίκτυο στην Σχήμα 18.15.

1. Έστω ο σταθμός 1 αναμεταδίδει στον σταθμό 2. Ποιος σταθμός (ή σταθμοί) μπορεί να προκαλέσει το πρόβλημα κρυφού κόμβου;
2. Μήπως ο σταθμός 1 που μεταδίδει στο σταθμό 4;
3. Μήπως ο σταθμός 1 που μεταδίδει στο σταθμό 5;



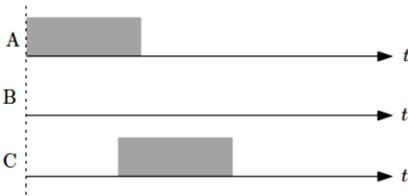
Σχήμα 18.15 Ένα απλό δίκτυο για την προβολή των κρυφών κόμβων. Ένα διακεκομμένο άκρο μεταξύ δύο σταθμών υποδηλώνει ότι οι σταθμοί μπορούν να μεταδώσουν και να παρεμβάλλονται ο ένας στον άλλο.

18.2 Ροή στο κέντρο *

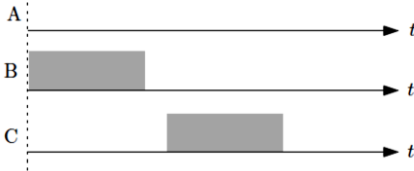
Εξετάστε τη τοπολογία «ροή στο κέντρο» στην Εικόνα 18.12(a), η οποία έχει τρεις συνεδρίες, A, B, και C.

1. Το σχήμα 18.16 δείχνει τη δραστηριότητα των συνεδριών A και C σε βάθος χρόνου. Σχεδιάστε στην εικόνα το εύρος του χρόνου όταν η συνεδρία B μπορεί να μεταδώσει χωρίς να προκύψει σύγκρουση με τις υπόλοιπες συνεδρίες.
2. Το σχήμα 18.17 δείχνει τη δραστηριότητα των συνεδριών B και C σε βάθος χρόνου. Σχεδιάστε στην εικόνα το εύρος του χρόνου όταν η συνεδρία A μπορεί να μεταδώσει χωρίς να προκύψει σύγκρουση με τις υπόλοιπες συνεδρίες.
3. Εξηγήστε γιατί η συνεδρία B βρίσκεται σε μειονεκτική θέση.

Με σχόλια [C3]: Αλλαγή σε α, β, γ.



Σχήμα 18.16 Ένα διάγραμμα δραστηριότητας συνεδριών. Οι γκρι περιοχές υποδηλώνουν τον χρόνο όταν η συνεδρία μεταδίδει ένα πλαίσιο.



Σχήμα 18.17 Ένα διάγραμμα δραστηριότητας συνεδριών. Οι γκρι περιοχές υποδηλώνουν τον χρόνο όταν η συνεδρία μεταδίδει ένα πλαίσιο. Σημειώστε ότι οι μεταδόσεις της B και της C δεν υπερκαλύπτονται σε βάθος χρόνου.

18.3 Ασύμμετρα Ανίχνευσης *

Εξετάστε την τοπολογία «ασύμμετρης ανίχνευσης» στην Εικόνα 18.12(b), θεωρώντας ότι το RTS/CTS είναι ενεργοποιημένο. Η συνεδρία A ξεκινά από τον σταθμό 1 προς το σταθμό 2, και η συνεδρία B από το σταθμό 3 στο σταθμό 4.

- Το σχήμα 18.18 δείχνει τη δραστηριότητα της συνεδρίας B. Τη χρονική στιγμή t_1 ο σταθμός 1 εντοπίζει ότι το κανάλι βρίσκεται σε αδράνεια και αποστέλλει ένα πλαίσιο RTS στο σταθμό 2 σε μία προσπάθεια να μεταδώσει δεδομένα. Τι πρόκειται να συμβεί;
- Υποθέστε ότι ο σταθμός 1 αποστέλλει πλαίσια RTS στους χρόνους t_2 , t_3 , t_4 . Τι θα συμβεί; Γενικά, ποια είναι η σχέση μεταξύ των χρονικών διαφορών $t_2 - t_1$, $t_3 - t_2$, και $t_4 - t_3$;
- Εξηγήστε γιατί είναι δύσκολο για τη συνεδρία A να μεταδίδει με επιτυχία.
- Υποθέστε ότι αντιστρέφουμε τις καταστάσεις των συνεδριών A και B, ήτοι η συνεδρία A αναμεταδίδει και ο σταθμός 3 αποστέλλει ένα πλαίσιο RTS για την έναρξη της μεταφοράς των δεδομένων στη συνεδρία B. Εξηγήστε γιατί το πρόβλημα στο μέρος (γ) εξαφανίζεται.



Σχήμα 18.18. Ένα διάγραμμα δραστηριότητας συνεδριών. Οι γκρι περιοχές υποδηλώνουν τον χρόνο όταν η συνεδρία μεταδίδει ένα πλαίσιο.

18.4 Aloha * *

Υπάρχει ένα πιο απλό πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης σε σχέση με το CSMA, το οποίο είναι εξίσου διάσημο. Ονομάζεται **Aloha**, καθώς εφευρέθηκε στη Χαβάη στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και οδήγησε έπειτα στην ανάπτυξη των τεχνολογιών ραδιοεκπομπών πακέτων. Η λειτουργία του Aloha (της θυριδοτής έκδοσης) μπορεί να περιγραφεί με ευκολία. Κατά τη διάρκεια κάθε χρονοθυρίδας, έκαστος από μία καθορισμένη ομάδα χρηστών χρήστης N επιλέγει να μεταδώσει ένα πακέτο με πιθανότητα p . Θεωρούμε ότι αν δύο ή παραπάνω χρήστες μεταδώσουν στην ίδια χρονοθυρίδα, όλα τα πακέτα χάνονται. Το παραπάνω είναι η μοναδική ανάδραση που είναι διαθέσιμη σε κάθε αναμεταδότη. Κάθε χαμένο πακέτο αναμεταδίδεται επίσης με πιθανότητα p . Θεωρούμε ότι αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τελικά να μεταδοθεί με επιτυχία το πακέτο.

- Θεωρήστε ότι το κανάλι υποστηρίζει 1 μονάδα χωρητικότητας (π.χ. 1 Mbps) όταν υπάρχει επιτυχής μετάδοση. Ποια είναι η ρυθμαπόδοση S ως συνάρτηση του N και του p ;
- Ποιο είναι το βέλτιστο p , ως συνάρτηση του N , για τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης;
- Καθώς το δίκτυο μεγαλώνει, και το $N \rightarrow \infty$, ποια είναι η μεγιστοποιημένη ρυθμαπόδοση; Θα δείτε ότι δεν είναι κάποιος μεγάλος αριθμός, κάτι το οποίο είναι διαισθητικό καθώς το θυριδοτό Aloha που περιγράφηκε παραπάνω δεν διαθέτει ούτε τα στοιχεία ακρόασης και αναμονής ούτε της εκθετικής υποχώρησης. Το Aloha χρειάζεται το μικρότερο δυνατό ποσό επικοινωνίας και συντονισμού, και δεν χρησιμοποιεί καν ανίχνευση φορέα. Επίσης έχει χαμηλή ρυθμαπόδοση. Το CSMA χρησιμοποιεί τη διεκπεραίωση υπονοούμενων (*implicit*) μηνυμάτων μέσω της ανίχνευσης φορέα, αλλά δεν απαιτεί περαιτέρω εμφανή συντονισμό. Η ρυθμαπόδοσή του μπορεί να είναι υψηλή για ένα πολύ μικρό αριθμό χρηστών, αλλά πέφτει καθώς το πλήθος αυξάνεται. Ένας κεντρικός χρονοταξινομητής θα επέφερε ακόμα περισσότερο επίφορτο συντονισμού, και θα παρείχε με τη σειρά του τη βέλτιστη επίδοση. Αλλά σε πολλά δίκτυα, είναι οικονομικά ανεφάρμοστη η χρήση ενός κεντρικού χρονοταξινομητή.

Με σχόλια [C4]: ελληνικά

18.5 Εναλλακτικοί κανόνες υποχώρησης * * *

Υποθέστε ότι υπάρχουν δύο σταθμοί σε ένα δίκτυο CSMA που προσπαθούν να μεταδώσουν ένα πλαίσιο δεδομένων. Οι δύο σταθμοί ξεκινούν στο στάδιο 1 με κάποιο παράθυρο ανταγωνισμού μεγέθους w_1 , και κάθε σταθμός επιλέγει μία χρονοθυρίδα εντός του παραθύρου ανταγωνισμού, και οι δύο τυχαία. Αν συμπέσουν οι επιλεγμένες χρονοθυρίδες, τότε οι σταθμοί προχωρούν στο στάδιο 2 με ένα ενημερωμένο παράθυρο ανταγωνισμού, μεγέθους w_2 κ.ο.κ. Η μετάδοση ολοκληρώνεται σε κάποιο στάδιο i , αν κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου οι δύο σταθμοί επιλέξουν διαφορετικές χρονοθυρίδες. Μας ενδιαφέρει ο αναμενόμενος αριθμός χρονοθυρίδων που θα έχουν περάσει πριν την ολοκλήρωση της μετάδοσης. Αυτός ο αναμενόμενος αριθμός αποτελεί μία μονάδα μέτρησης της αποτελεσματικότητας της μετάδοσης (όσο πιο μικρός, τόσο το καλύτερο).

Για να απλοστευθεί η επερχόμενη ανάλυση, θεωρούμε ότι δεν υπάρχει όριο στον αριθμό των σταδίων - δηλαδή, το μέγεθος του παραθύρου ανταγωνισμού είναι απεριόριστο.

- a. Υποθέστε ότι οι δύο σταθμοί βρίσκονται σε στάδιο i με μέγεθος παραθύρου ανταγωνισμού W_i . Ποια είναι η πιθανότητα να επιλέξουν οι σταθμοί την ίδια χρονοθυρίδα; Θεωρώντας ότι οι δύο σταθμοί έχουν επιλέξει την ίδια χρονοθυρίδα, ποια είναι η αναμενόμενη τιμή της επιλεγμένη χρονοθυρίδας, καθώς έχουν ταξινομηθεί από 1 ως W_i ;
- b. Ποια είναι η πιθανότητα να ολοκληρωθεί η μετάδοση στο στάδιο i ;
- c. Καθώς η μετάδοση ολοκληρώνεται στο στάδιο i , ποιος είναι ο αναμενόμενος αριθμός χρονοθυρίδων που έχουν περάσει;

(Συμβουλή: Είναι το άθροισμα των αναμενόμενων τιμών των χρονοθυρίδων που επιλέχθηκαν σε προηγούμενα στάδια (βλέπε μέρος (α)), συν την αναμενόμενη τιμή της μεγαλύτερης από τις δύο (διαφορετικές) χρονοθυρίδες που επιλέχθηκαν σε στάδιο i , η οποία είναι $2(w_i + 1)/3$).
- d. Ποιος είναι ο αναμενόμενος αριθμός χρονοθυρίδων που πέρασαν πριν την ολοκλήρωση της μετάδοσης;

(Συμβουλή: Εφαρμόστε το νόμο της συνολικής προσδοκίας).
- e. Τώρα εισάγουμε διαφορετικούς κανόνες ενημέρωσης για τα παράθυρα ανταγωνισμού. Θεωρήστε τους παρακάτω τρεις κανόνες:
 1. δυαδική εκθετική υποχώρηση - $w_i = 2^i$
 2. προσθετική υποχώρηση - $w_i = i$
 3. υπερ-δυαδική εκθετική υποχώρηση - $w_i = 2^{2^i}$

Με σχόλια [C5]: ελληνικά

Υπολογίστε τον αναμενόμενο αριθμό χρονοθυρίδων στο μέρος (δ) γι αυτές τις τρεις περιπτώσεις: Τι παρατηρείτε; Πώς αυτό αντιστοιχεί με τη διαίσθηση ότι η καλύτερη πολιτική υποχώρησης δεν θα πρέπει να είναι ούτε πολύ συντηρητική, ούτε πολύ επιθετική;

Με σχόλια [C6]: σημεία στίξης