

Επίπεδο Ζεύξης και Δίκτυα Τοπικής Περιοχής (LAN)

Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια μάθαμε ότι το επίπεδο δικτύου παρέχει μία υπηρεσία επικοινωνίας μεταξύ δύο *οποιαδήποτε* υπολογιστών του δικτύου. Ανάμεσα στους δύο υπολογιστές, τα δεδομενογράμματα ταξιδεύουν μέσω μίας σειράς ζεύξεων επικοινωνίας, άλλων ενσύρματων και άλλων ασύρματων, αρχίζοντας απ' τον υπολογιστή προέλευσης, περνώντας διαμέσου μίας σειράς μεταγωγέων πακέτων (μεταγωγέων και δρομολογητών) και καταλήγοντας στον υπολογιστή προορισμού. Καθώς συνεχίζουμε να προχωρούμε προς τα κάτω στη στοίβα πρωτοκόλλων, απ' το επίπεδο δικτύου προς το επίπεδο ζεύξης, αναρωτιόμαστε εύλογα για το πώς στέλνονται τα πακέτα μέσα απ' τις *ξεχωριστές ζεύξεις*, που απαρτίζουν τη διαδρομή επικοινωνίας από-άκρο-σε-άκρο. Πώς ενθυλακώνονται τα δεδομενογράμματα επιπέδου δικτύου μέσα στα πλαίσια του επιπέδου ζεύξης για να μεταδοθούν μέσω μίας μοναδικής ζεύξης; Χρησιμοποιούνται διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης σε διαφορετικές ζεύξεις κατά μήκος της διαδρομής επικοινωνίας; Πώς επιλύονται οι διενέξεις μετάδοσης στις ζεύξεις εκπομπής; Υπάρχει διευθυνσιοδότηση στο επίπεδο ζεύξης και, εάν ναι, πώς λειτουργεί η διευθυνσιοδότηση επιπέδου ζεύξης με τη διευθυνσιοδότηση επιπέδου δικτύου, που μάθαμε στο Κεφάλαιο 4; Και ποια ακριβώς είναι η διαφορά ανάμεσα σ' έναν μεταγωγέα και σ' έναν δρομολογητή; Θα απαντήσουμε σε αυτές και σε άλλες σημαντικές ερωτήσεις σ' αυτό το κεφάλαιο.

Στη συζήτηση για το επίπεδο ζεύξης, θα δούμε ότι υπάρχουν δύο ουσιαδώς διαφορετικοί τύποι καναλιών επιπέδου ζεύξης. Ο πρώτος τύπος αποτελείται από κανάλια εκπομπής, τα οποία συνδέουν πολλαπλούς υπολογιστές σε ασύρματα Δίκτυα Τοπικής Περιοχής (Local Area Networks - LAN), δορυφορικά δίκτυα και δίκτυα προσπέλασης υβριδικού ομοαξονικού καλωδίου οπτικών ινών (hybrid fiber-coaxial - HFC). Εφόσον συνδέονται πολλοί υπολογιστές στο ίδιο κανάλι επικοινωνίας εκπομπής, απαιτείται ένα, όπως λέγεται, πρωτόκολλο προσπέλασης μέσου για να συντονίζει τις μεταδόσεις πλαισίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας

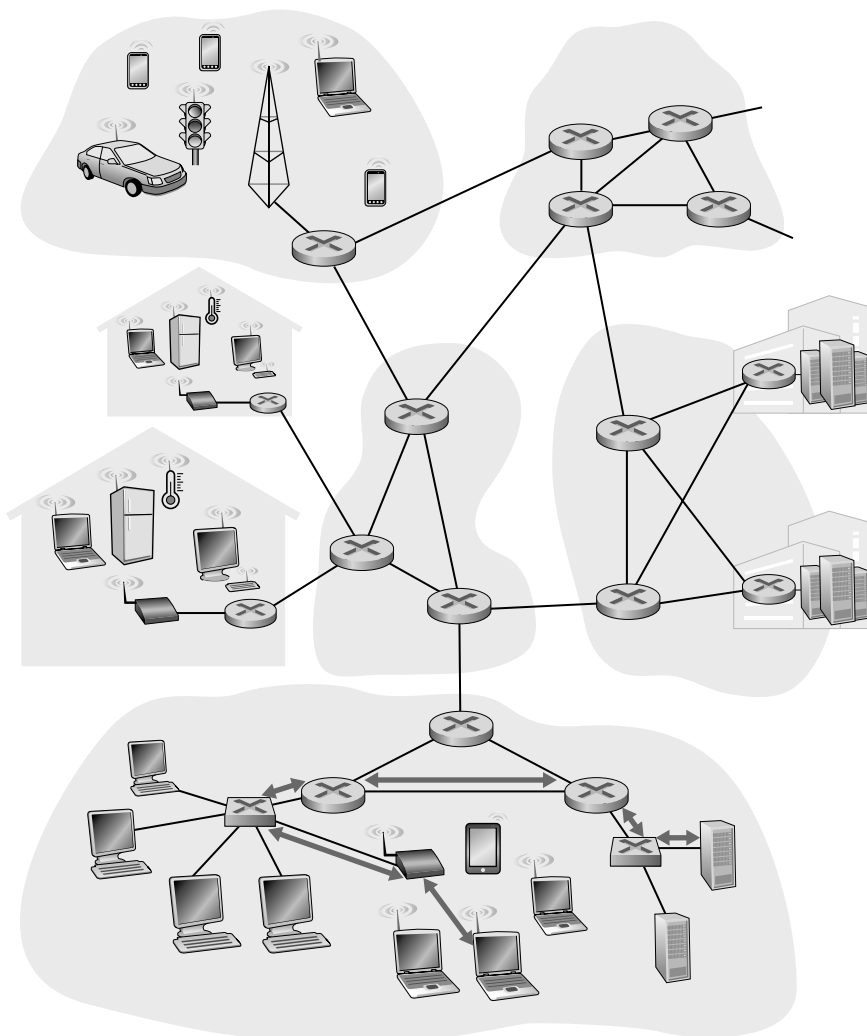
κεντρικός ελεγκτής για να συντονίζει τις μεταδόσεις· σε άλλες περιπτώσεις οι μεταδόσεις συντονίζονται απ' τους ίδιους τους υπολογιστές. Ο δεύτερος τύπος καναλιού επιπέδου ζεύξης είναι η ζεύξη επικοινωνίας σημείου-προς-σημείο, όπως συμβαίνει συχνά μεταξύ δύο δρομολογητών, οι οποίοι συνδέονται με μία ζεύξη μεγάλης απόστασης ή μεταξύ του υπολογιστή ενός χρήστη και του κοντινού μεταγωγέα Ethernet, με τον οποίο συνδέεται. Ο συντονισμός της προσπέλασης σε μία ζεύξη σημείου-προς-σημείο είναι απλούστερος· το υλικό αναφοράς στον ιστότοπο αυτού του βιβλίου περιέχει μία λεπτομερή παρουσίαση του Πρωτοκόλλου Σύνδεσης Σημείου-προς-Σημείο (Point-to-Point Protocol – PPP), το οποίο χρησιμοποιείται για ρυθμίσεις, που ποικίλουν απ' την υπηρεσία σύνδεσης μέσω τηλεφωνικής γραμμής μέχρι την, υψηλής ταχύτητας, μεταφορά πλαισίων από σημείο προς σημείο μέσω ζεύξεων οπτικών ινών.

Θα μελετήσουμε επίσης σ' αυτό το κεφάλαιο αρκετές σημαντικές αρχές και τεχνολογίες του επιπέδου ζεύξης. Θα εξετάσουμε αναλυτικά την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, ένα θέμα που συζητήσαμε συνοπτικά στο Κεφάλαιο 3. Θα μελετήσουμε τα δίκτυα πολλαπλής προσπέλασης και τα LAN μεταγωγής, περιλαμβανομένου του Ethernet – που είναι η κυρίαρχη τεχνολογία για ενσύρματα LAN. Θα εξετάσουμε επίσης τα εικονικά LAN και τα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Παρ' όλο που το WiFi και γενικά τα ασύρματα LAN, είναι θέματα επιπέδου ζεύξης, θα αναβάλουμε τη συζήτηση αυτών των σημαντικών θεμάτων για το Κεφάλαιο 7.

6.1 Εισαγωγή στο Επίπεδο Ζεύξης

Ας αρχίσουμε με κάποια σημαντική ορολογία. Θα είναι βολικό σ' αυτό το κεφάλαιο να αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε συσκευή εκτελεί ένα πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης (δηλ. επιπέδου 2) ως **κόμβο (node)**. Οι κόμβοι περιλαμβάνουν υπολογιστές, δρομολογητές, μεταγωγείς και σημεία πρόσβασης WiFi (τα οποία συζητούμε στο Κεφάλαιο 7). Θα αναφερόμαστε επίσης στα κανάλια επικοινωνίας που συνδέουν γειτονικούς κόμβους κατά μήκος μίας διαδρομής επικοινωνίας ως **ζεύξεις (links)**. Προκειμένου να μεταφερθεί ένα δεδομενόγραμμα απ' τον υπολογιστή προέλευσης στον υπολογιστή προορισμού, το δεδομενόγραμμα πρέπει να μεταφερθεί μέσω κάθε ξεχωριστής ζεύξης στη διαδρομή από-άκρο-σε-άκρο. Για παράδειγμα, στο εταιρικό δίκτυο που φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 6.1, θεωρήστε ότι στέλνετε ένα δεδομενόγραμμα από έναν απ' τους ασύρματους υπολογιστές σ' έναν απ' τους εξυπηρετές. Αυτό το δεδομενόγραμμα στην πραγματικότητα θα περάσει από έξι ζεύξεις: μία ζεύξη WiFi μεταξύ του υπολογιστή αποστολής και του σημείου πρόσβασης WiFi· μία ζεύξη Ethernet μεταξύ του σημείου πρόσβασης κι ενός μεταγωγέα επιπέδου ζεύξης· μία ζεύξη μεταξύ του μεταγωγέα επιπέδου ζεύξης και του δρομολογητή· μία ζεύξη μεταξύ των δύο δρομολογητών· μία ζεύξη Ethernet μεταξύ του δρομολογητή κι ενός μεταγωγέα επιπέδου ζεύξης· και τέλος, μία ζεύξη Ethernet μεταξύ του μεταγωγέα και του εξυπηρετή. Σε μία δεδομένη ζεύξη, ένας κόμβος που κάνει μετάδοση ενθυλακώνει το δεδομενόγραμμα σ' ένα **πλαίσιο επιπέδου ζεύξης (link-layer frame)** και μεταδίδει το πλαίσιο μέσα στη ζεύξη.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα το επίπεδο ζεύξης και πώς αυτό σχετίζεται με το επίπεδο δικτύου, ας σκεφθούμε μία αναλογία απ' τον τομέα των μεταφορών. Σκεφθείτε έναν ταξιδιωτικό πράκτορα, ο οποίος σχεδιάζει ένα ταξίδι για έναν τουρίστα, που ταξιδεύει από το Πρίνστον του New Jersey στη Λωζάννη της Ελβετίας. Ο ταξιδιωτικός πράκτορας αποφασίζει ότι είναι πιο βολικό για τον τουρίστα να πάρει μία λιμουζίνα απ' το Πρίνστον μέχρι το αεροδρόμιο JFK, κατόπιν ένα αεροπλάνο απ' το αεροδρόμιο JFK μέχρι το αεροδρόμιο της Γενεύης και τέλος ένα τραίνο απ' το αεροδρόμιο της Γενεύης μέχρι τον σιδηροδρομικό σταθμό της Λωζάννης. Απ' τη στιγμή που ο ταξιδιωτικός πράκτορας κάνει τις τρεις κρατήσεις, είναι



Εικόνα 6.1 ♦ Έξι άλματα επιπέδου ζεύξης μεταξύ ασύρματου υπολογιστή και εξυπηρέτη

ευθύνη της εταιρείας λιμουζινών του Πρίνστον να μεταφέρει τον τουρίστα απ' το Πρίνστον στο JFK· είναι ευθύνη της αεροπορικής εταιρείας να μεταφέρει τον τουρίστα απ' το JFK στην Γενεύη· και είναι ευθύνη της σιδηροδρομικής υπηρεσίας της Ελβετίας να μεταφέρει τον τουρίστα απ' τη Γενεύη στη Λωζάννη. Κάθ' ένα από αυτά τα τρία τμήματα του ταξιδιού είναι «απ' ευθείας» ανάμεσα σε δύο «γειτονικές» τοποθεσίες. Παρατηρήστε ότι τα τρία τμήματα μεταφοράς υπόκεινται σε διαχείριση από διαφορετικές εταιρείες και χρησιμοποιούν εντελώς διαφορετικούς τύπους μεταφορικών μέσων (λιμουζίνα, αεροπλάνο

και τραίνο). Αν και οι τύποι μεταφορικών μέσων είναι διαφορετικοί, όλοι τους παρέχουν τη βασική υπηρεσία μεταφοράς επιβατών από μία τοποθεσία σε μία γειτονική τοποθεσία. Σε αυτήν την αναλογία με τον τομέα των μεταφορών, ο τουρίστας είναι το δεδομένογράμμα, κάθε τμήμα μεταφοράς είναι μία ζεύξη, ο τύπος μεταφοράς είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης και ο ταξιδιωτικός πράκτορας είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης.

6.11 Οι Υπηρεσίες που Παρέχονται απ' το Επίπεδο Ζεύξης

Αν και η βασική υπηρεσία οποιουδήποτε επιπέδου ζεύξης είναι να μετακινεί ένα δεδομένογράμμα από έναν κόμβο σ' έναν γειτονικό κόμβο μέσω μίας μοναδικής ζεύξης επικοινωνίας, οι λεπτομέρειες της παρεχόμενης υπηρεσίας μπορούν να ποικίλλουν μεταξύ διαφορετικών πρωτοκόλλων επιπέδου ζεύξης. Στις πιθανές υπηρεσίες, που μπορεί να προσφέρει ένα πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης περιλαμβάνονται:

- **Πλαισίωση (framing).** Σχεδόν όλα τα πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης ενθυλακώνουν κάθε δεδομένογράμμα επιπέδου δικτύου σ' ένα πλαίσιο επιπέδου ζεύξης πριν το μεταδώσουν μέσω της ζεύξης. Ένα πλαίσιο αποτελείται από ένα πεδίο δεδομένων, στο οποίο εισάγεται το δεδομένογράμμα επιπέδου δικτύου, κι έναν αριθμό πεδίων κεφαλίδας. Η δομή του πλαισίου καθορίζεται απ' το πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης. Θα δούμε διάφορες μορφές πλαισίων όταν θα εξετάσουμε συγκεκριμένα πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης στο δεύτερο μισό αυτού του κεφαλαίου.
- **Προσπέλαση ζεύξης.** Ένα πρωτόκολλο ελέγχου προσπέλασης μέσου (Medium Access Control – MAC) καθορίζει τους κανόνες, με τους οποίους ένα πλαίσιο μεταδίδεται πάνω στη ζεύξη. Για ζεύξεις σημείου-προς-σημείο, μ' έναν μοναδικό αποστολέα στο ένα άκρο της ζεύξης κι έναν μοναδικό παραλήπτη στο άλλο άκρο της ζεύξης, το πρωτόκολλο MAC είναι απλό (ή ανύπαρκτο) – ο αποστολέας μπορεί να στείλει ένα πλαίσιο οποτεδήποτε η ζεύξη είναι αδρανής. Η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι όταν πολλοί κόμβοι μοιράζονται μία μοναδική ζεύξη εκπομπής – το αποκαλούμενο πρόβλημα πολλαπλής προσπέλασης. Εδώ, το πρωτόκολλο MAC χρησιμεύει στον συντονισμό των μεταδόσεων πλαισίων απ' τους πολλούς κόμβους.
- **Αξιόπιστη παράδοση.** Όταν ένα πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης παρέχει υπηρεσία αξιόπιστης παράδοσης, εγγυάται τη μετακίνηση κάθε δεδομένογράμματος επιπέδου δικτύου διαμέσου της ζεύξης χωρίς σφάλμα. Θυμηθείτε ότι ορισμένα πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς (όπως το TCP) επίσης παρέχουν μία υπηρεσία αξιόπιστης παράδοσης. Παρόμοια με μία υπηρεσία αξιόπιστης παράδοσης επιπέδου μεταφοράς, μία υπηρεσία αξιόπιστης παράδοσης επιπέδου ζεύξης μπορεί να επιτευχθεί με επιβεβαιώσεις και επαναμεταδόσεις (βλ. Ενότητα 3.4). Μία υπηρεσία αξιόπιστης παράδοσης επιπέδου ζεύξης χρησιμοποιείται συχνά για ζεύξεις οι οποίες είναι επιρρεπείς σε μεγάλους ρυθμούς σφαλμάτων, όπως μία ασύρματη ζεύξη, με σκοπό να επιδιορθώσει ένα σφάλμα τοπικά –στη ζεύξη όπου λαμβάνει χώρα το σφάλμα– παρά να επιβάλει μία επαναμετάδοση των δεδομένων από άκρο-σε-άκρο μέσω ενός πρωτοκόλλου επιπέδου μεταφοράς ή εφαρμογής. Παρ' όλα αυτά, η αξιόπιστη παράδοση επιπέδου ζεύξης μπορεί να θεωρηθεί ως αχρείαστη επιβάρυνση για ζεύξεις χαμηλού ρυθμού σφαλμάτων bit, συμπεριλαμβανομένων των ζεύξεων οπτικής ίνας, ομοαξονικού καλωδίου και πολλών συστρόφων ζευγών χαλκού. Για τον λόγο αυτόν, πολλά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης για ενσύρματα δίκτυα δεν παρέχουν μία υπηρεσία αξιόπιστης παράδοσης.
- **Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων.** Το υλικό επιπέδου ζεύξης σ' έναν κόμβο λήψης μπορεί να αποφασίσει εσφαλμένα ότι ένα bit στο πλαίσιο είναι μηδέν, ενώ μεταδόθηκε ως

μονάδα και το αντίστροφο. Τέτοια σφάλματα bit εισάγονται από εξασθένηση του σήματος και ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Επειδή δεν υπάρχει ανάγκη να προωθήσουν ένα δεδομένογράμμα που έχει ένα σφάλμα, πολλά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης παρέχουν έναν μηχανισμό για την ανίχνευση τέτοιων σφαλμάτων bit. Αυτό γίνεται επιβάλλοντας στον κόμβο μετάδοσης να συμπεριλαμβάνει bits ανίχνευσης στο πλαίσιο και τον κόμβο λήψης να πραγματοποιεί έλεγχο σφάλματος. Θυμηθείτε απ' τα Κεφάλαια 3 και 4 ότι το επίπεδο μεταφοράς και το επίπεδο δικτύου του Διαδικτύου επίσης παρέχουν μία περιορισμένη μορφή ανίχνευσης σφαλμάτων – το άθροισμα ελέγχου του Διαδικτύου. Η ανίχνευση σφαλμάτων στο επίπεδο ζεύξης είναι συνήθως πιο πολύπλοκη και υλοποιείται μέσω υλικού. Η διόρθωση σφαλμάτων είναι παρόμοια με την ανίχνευση σφαλμάτων, εκτός απ' το ότι ο παραλήπτης όχι μόνον ανιχνεύει τότε έχουν συμβεί σφάλματα bit στο πλαίσιο, αλλά προσδιορίζει επίσης επακριβώς πού έχουν συμβεί τα σφάλματα μέσα στο πλαίσιο (και μετά τα διορθώνει).

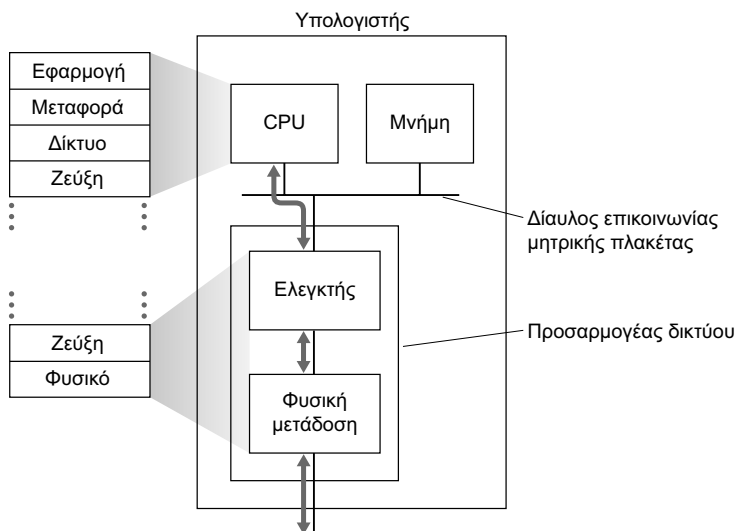
6.1.2 Πού Υλοποιείται το Επίπεδο Ζεύξης;

Πριν μελετήσουμε λεπτομερώς το επίπεδο ζεύξης, ας ολοκληρώσουμε αυτήν την εισαγωγή εξετάζοντας το ερώτημα του πού υλοποιείται το επίπεδο ζεύξης. Υλοποιείται το επίπεδο ζεύξης ενός υπολογιστή μέσω υλικού ή μέσω λογισμικού; Υλοποιείται σε ξεχωριστή κάρτα ή ξεχωριστό chip (πλινθίο/τσιπ); Πώς διασυνδέεται με τα υπόλοιπα στοιχεία του υλικού και του λειτουργικού συστήματος ενός υπολογιστή;

Η Εικόνα 6.2 δείχνει μία τυπική αρχιτεκτονική υπολογιστή. Οι δυνατότητες Ethernet είτε ενσωματώνονται στο chipset (πλινθιοσύνολο/τσιπσέτ) της μητρικής πλακέτας είτε υλοποιούνται μέσω ενός αποκλειστικού Ethernet τσιπ χαμηλού κόστους. Κατά το μεγαλύτερο μέρος του, το επίπεδο ζεύξης υλοποιείται σ' ένα chip που ονομάζεται **προσαρμογέας δικτύου (network adapter)**, γνωστό μερικές φορές και ως **κάρτα δικτύου** ή **ελεγκτής διασύνδεσης δικτύου (network interface controller – NIC)**. Ο προσαρμογέας δικτύου υλοποιεί πολλές απ' τις υπηρεσίες του επιπέδου ζεύξης, όπως η πλασιώση, η προσπέλαση ζεύξης, η ανίχνευση σφαλμάτων κ.ά. Έτσι, μεγάλο μέρος της λειτουργικότητας ενός ελεγκτή επιπέδου ζεύξης υλοποιείται μέσω υλικού. Για παράδειγμα, ο προσαρμογέας σειράς 700 της Intel [Intel 2020] υλοποιεί τα πρωτόκολλα Ethernet που θα μελετήσουμε στην Ενότητα 6.5· ο Atheros AR5006 [Atheros 2020] υλοποιεί τα πρωτόκολλα WiFi 802.11, που θα μελετήσουμε στο Κεφάλαιο 7.

Στην πλευρά αποστολής, ο ελεγκτής παίρνει ένα δεδομένογράμμα, που έχει δημιουργηθεί και έχει αποθηκευθεί στη μνήμη του υπολογιστή απ' τα υψηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων, το ενθυλακώνει σ' ένα πλαίσιο επιπέδου ζεύξης (συμπληρώνοντας τα διάφορα πεδία του πλαισίου) και μετά μεταδίδει το πλαίσιο μέσα στην ζεύξη επικοινωνίας, ακολουθώντας το πρωτόκολλο προσπέλασης ζεύξης. Στην πλευρά λήψης, ένας ελεγκτής λαμβάνει ολόκληρο το πλαίσιο και εξάγει το δεδομένογράμμα επιπέδου δικτύου. Εάν το επίπεδο ζεύξης πραγματοποιεί ανίχνευση σφαλμάτων, τότε είναι ο ελεγκτής αποστολής αυτός που ρυθμίζει τα bits ανίχνευσης σφαλμάτων στην κεφαλίδα του πλαισίου και ο ελεγκτής λήψης αυτός που πραγματοποιεί την ανίχνευση σφαλμάτων.

Η Εικόνα 6.2 δείχνει ότι, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του επιπέδου ζεύξης υλοποιείται μέσω υλικού, μέρος του επιπέδου ζεύξης υλοποιείται μέσω λογισμικού, το οποίο εκτελείται στην KME (CPU) του υπολογιστή. Τα στοιχεία λογισμικού του επιπέδου ζεύξης υλοποιούν συνήθως λειτουργικότητα επιπέδου ζεύξης ανώτερου επιπέδου, όπως η συγκέντρωση πληροφοριών διευθυνσιοδότησης επιπέδου ζεύξης και η ενεργοποίηση του υλικού του ελεγκτή. Στην πλευρά λήψης, το λογισμικό επιπέδου ζεύξης αποκρίνεται σε διακοπές



Εικόνα 6.2 ♦ Προσαρμογέας δικτύου: η σχέση του με τα άλλα συστατικά του υπολογιστή και με τη λειτουργικότητα της στοίβας πρωτοκόλλων

απ' τον ελεγκτή (π.χ. λόγω της λήψης ενός ή περισσότερων πλαισίων), χειριζόμενο συνθήκες σφάλματος και μεταβιβάζοντας το δεδομένο προς τα πάνω στο επίπεδο δικτύου. Έτσι, το επίπεδο ζεύξης είναι ένας συνδυασμός υλικού και λογισμικού – είναι δηλαδή η θέση μέσα στη στοίβα πρωτοκόλλων, όπου το λογισμικό συναντά το υλικό. Το [Intel 2020] παρέχει μία ευανάγνωστη επισκόπηση (καθώς και μία λεπτομερή περιγραφή) του ελεγκτή XL710 απ' τη σκοπιά του προγραμματισμού λογισμικού.

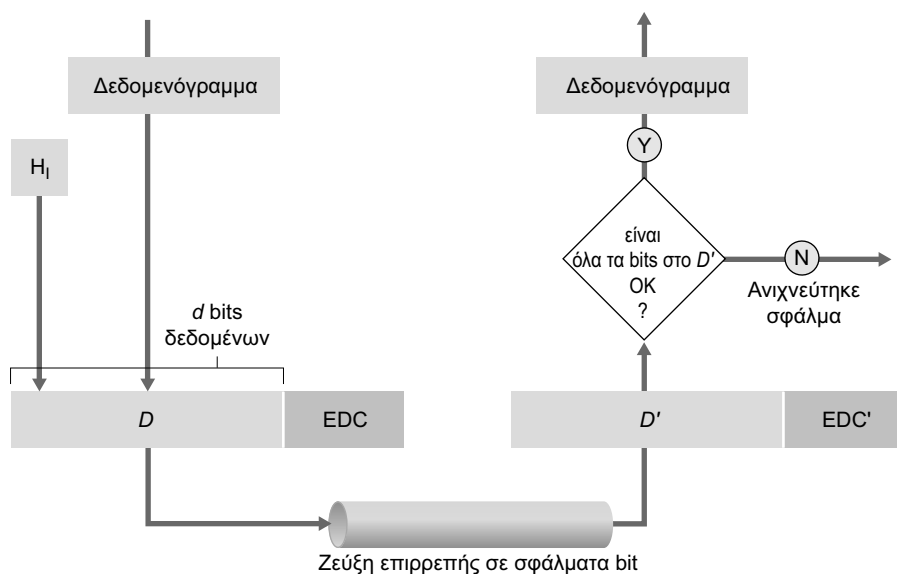
6.2 Τεχνικές Ανίχνευσης και Διόρθωσης Σφαλμάτων

Στην προηγούμενη ενότητα σημειώσαμε ότι η **ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων επιπέδου bit (bit-level error detection and correction)** – η ανίχνευση και διόρθωση της αλλοίωσης bits σε ένα πλαίσιο επιπέδου ζεύξης, το οποίο στέλνεται από έναν κόμβο σ' έναν άλλον φυσικά συνδεδεμένο γειτονικό κόμβο – είναι δύο υπηρεσίες που συχνά παρέχονται απ' το επίπεδο ζεύξης. Είδαμε στο Κεφάλαιο 3 ότι υπηρεσίες ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων προσφέρονται επίσης συχνά στο επίπεδο μεταφοράς. Σ' αυτήν την ενότητα θα εξετάσουμε μερικές απ' τις απλούστερες τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ώστε να ανιχνεύσουν και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να διορθώσουν τέτοια σφάλματα bit. Η πλήρης

μελέτη της θεωρίας και υλοποίησης αυτού του θέματος είναι από μόνη της το θέμα πολλών εκπαιδευτικών βιβλίων (π.χ. [Schwartz 1980] ή [Bertsekas 1991]) και η μελέτη μας στο παρόν είναι αναγκαστικά συνοπτική. Ο στόχος μας εδώ είναι να κατανοήσουμε γενικά τις δυνατότητες που παρέχουν οι τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων και να δούμε πώς λειτουργούν μερικές απλές τεχνικές και πώς αυτές χρησιμοποιούνται στην πράξη στο επίπεδο ζεύξης.

Η Εικόνα 6.3 δείχνει το περιβάλλον για τη μελέτη μας. Στον κόμβο αποστολής, τα δεδομένα D , που πρέπει να προστατευθούν από σφάλματα bit, εμπλουτίζονται με bits ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων EDC (error detection and correction). Τυπικά, τα δεδομένα προς προστασία περιλαμβάνουν όχι μόνον το δεδομένογράμμα που μεταβιβάζεται προς τα κάτω απ' το επίπεδο δικτύου για μετάδοση στη ζεύξη, αλλά και πληροφορίες διευθυνσιοδότησης επιπέδου ζεύξης, αριθμούς ακολουθίας και άλλα πεδία κεφαλίδας του πλαισίου ζεύξης. Τα D και EDC στέλνονται όλα στον κόμβο λήψης εντός ενός πλαισίου επιπέδου ζεύξης. Στον κόμβο λήψης λαμβάνεται μία ακολουθία bits D' και EDC' . Σημειώστε ότι τα D' και EDC' μπορεί να διαφέρουν απ' τα αρχικά D και EDC ως αποτέλεσμα της αντιστροφής bit κατά τη διακίνηση τους.

Η πρόκληση για τον παραλήπτη είναι να καθορίσει εάν το D' είναι ακριβώς ίδιο με το αρχικό D , δεδομένου ότι έχει λάβει μόνον τα D' και EDC' . Η ακριβής διατύπωση της απόφασης του παραλήπτη στην Εικόνα 6.3 (ρωτάμε εάν ανιχνεύθηκε ένα σφάλμα και όχι εάν υπάρχει ένα σφάλμα!) είναι σημαντική. Οι τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων επιτρέπουν στον παραλήπτη μερικές φορές, αλλά όχι πάντα, να ανιχνεύει ότι έχουν συμβεί σφάλματα bit. Ακόμη και με τη χρήση των bit ανίχνευσης σφαλμάτων, είναι πιθανό να υπάρχουν **μη ανιχνευμένα σφάλματα bit** (undetected bit errors): δηλαδή, ο παραλήπτης ίσως δεν γνωρίζει ότι οι ληφθείσες πληροφορίες περιέχουν σφάλματα bit. Κατά συνέπεια, ο παραλήπτης μπορεί να παραδώσει ένα



Εικόνα 6.3 ♦ Σενάριο ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων

αλλοιωμένο δεδομένογραμμα στο επίπεδο δικτύου ή να μην γνωρίζει ότι τα περιεχόμενα ενός πεδίου της κεφαλίδας του πλαισίου έχουν αλλοιωθεί. Έτσι, θέλουμε να επιλέξουμε ένα σχήμα ανίχνευσης σφαλμάτων, τέτοιο που η πιθανότητα τέτοιων συμβάντων να είναι μικρή. Γενικά, πιο εξελιγμένες τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων (δηλ. εκείνες οι τεχνικές που έχουν μικρότερη πιθανότητα να επιτρέπουν μη ανιχνευόμενα σφάλματα bit) επιφέρουν μεγαλύτερο φόρτο – χρειάζονται περισσότεροι υπολογισμοί για να υπολογισθούν και να μεταδοθούν περισσότερα bit ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων.

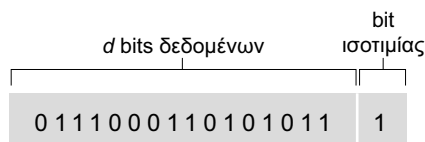
Ας εξετάσουμε τώρα τρεις τεχνικές για ανίχνευση σφαλμάτων μέσα στα μεταδιδόμενα δεδομένα – ελέγχους ισοτιμίας (ώστε να δείξουμε τις βασικές ιδέες πίσω απ' την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων), μεθόδους αθροισμάτων ελέγχου (οι οποίες χρησιμοποιούνται περισσότερο στο επίπεδο μεταφοράς) και κυκλικούς ελέγχους πλεονασμού (οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως στο επίπεδο ζεύξης μέσα στους προσαρμογείς).

6.2.1 Έλεγχοι Ισοτιμίας

Η απλούστερη ίσως μορφή ανίχνευσης σφαλμάτων είναι η χρήση ενός μοναδικού **bit ισοτιμίας (parity bit)**. Υποθέστε ότι οι πληροφορίες που θα σταλούν, D στην Εικόνα 6.4, έχουν d bits. Σ' ένα σχήμα άρτιας ισοτιμίας, ο αποστολέας απλώς περιλαμβάνει ένα πρόσθετο bit και επιλέγει την τιμή του έτσι, ώστε ο συνολικός αριθμός των 1 στα $d+1$ bits (οι αρχικές πληροφορίες συν ένα bit ισοτιμίας) να είναι άρτιος. Για σχήματα περιττής ισοτιμίας, η τιμή του bit ισοτιμίας επιλέγεται, έτσι ώστε να υπάρχει ένα περιττός αριθμός από 1. Η Εικόνα 6.4 δείχνει ένα σχήμα άρτιας ισοτιμίας, με το μοναδικό bit ισοτιμίας αποθηκευμένο σ' ένα ξεχωριστό πεδίο.

Η λειτουργία του παραλήπτη είναι επίσης απλή στην περίπτωση ενός μοναδικού bit ισοτιμίας. Ο παραλήπτης πρέπει απλώς να μετρήσει τον αριθμό των 1 στα ληφθέντα $d+1$ bits. Εάν βρεθεί περιττός αριθμός από 1 μ' ένα σχήμα άρτιας ισοτιμίας, τότε ο παραλήπτης γνωρίζει ότι έχει συμβεί τουλάχιστον ένα σφάλμα bit. Ακριβέστερα, γνωρίζει ότι έχει συμβεί κάποιος περιττός αριθμός σφαλμάτων bit.

Τι συμβαίνει όμως εάν συμβεί ένας άρτιος αριθμός σφαλμάτων bit; Θα πρέπει να πείσετε τον εαυτό σας ότι αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ένα μη ανιχνευμένο σφάλμα. Εάν η πιθανότητα σφαλμάτων bit είναι μικρή και αν μπορεί να υποτεθεί ότι τα σφάλματα συμβαίνουν ανεξάρτητα απ' το ένα bit στο επόμενο, τότε η πιθανότητα πολλαπλών σφαλμάτων bit μέσα σ' ένα πακέτο θα ήταν εξαιρετικά μικρή. Σ' αυτήν την περίπτωση, ένα μοναδικό bit ισοτιμίας ίσως να αρκούσε. Ωστόσο, μετρήσεις έχουν δείξει ότι, αντί να συμβαίνουν ανεξάρτητα, τα σφάλματα συνήθως ομαδοποιούνται σε «ριπές». Κάτω από συνθήκες ριπών σφαλμάτων, η πιθανότητα μη ανιχνευμένων σφαλμάτων μέσα σ' ένα πλαίσιο που προστατεύεται από ισοτιμία ενός bit μπορεί να προσεγγίσει το 50% [Spragins 1991]. Είναι σαφές ότι απαιτείται (και ευτυχώς χρησιμοποιείται στην πράξη!) ένα στιβαρότερο σχήμα ανίχνευσης σφαλμάτων. Πριν εξετάσουμε όμως τα σχήματα ανίχνευσης σφαλμάτων που χρησιμοποιούνται στην πράξη, ας

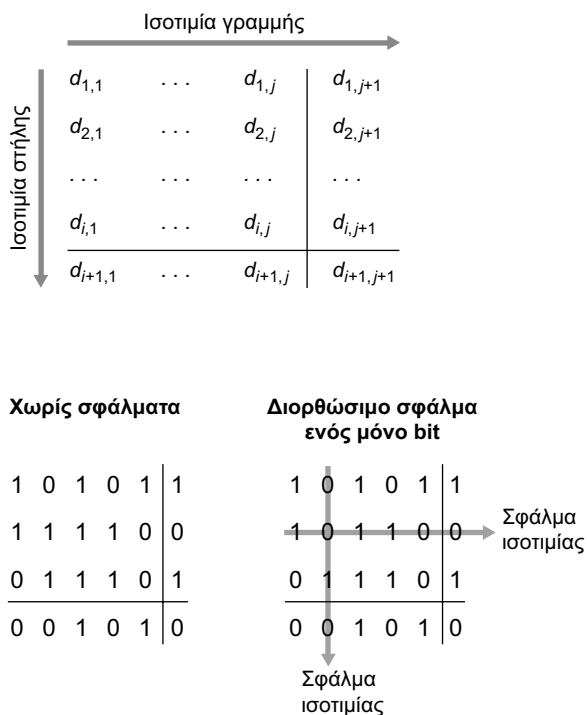


Εικόνα 6.4 ♦ Άρτια ισοτιμία ενός bit

θεωρήσουμε μία απλή γενίκευση της ισοτιμίας ενός bit, που θα μας δώσει μία καλύτερη αίσθηση των τεχνικών διόρθωσης σφαλμάτων.

Η Εικόνα 6.5 δείχνει μία διδιάστατη γενίκευση του σχήματος ισοτιμίας ενός bit. Εδώ, τα d bits μέσα στο D διαιρούνται σε i γραμμές και j στήλες. Υπολογίζεται μία τιμή ισοτιμίας για κάθε γραμμή και κάθε στήλη. Τα προκύπτοντα $i + j + 1$ bits ισοτιμίας αποτελούν τα bits ανίχνευσης σφαλμάτων του πλαισίου επιπέδου ζεύξης.

Υποθέστε τώρα ότι σημειώνεται ένα μόνο σφάλμα bit στα αρχικά d bits πληροφοριών. Με αυτό το σχήμα **δισδιάστατης ισοτιμίας (two-dimensional parity)**, η ισοτιμία και της γραμμής και της στήλης που περιέχουν το αντιστραμμένο bit θα είναι λανθασμένη. Ο παραλήπτης μπορεί έτσι όχι μόνον να ανιχνεύσει το γεγονός ότι έχει σημειωθεί ένα σφάλμα bit, αλλά μπορεί να χρησιμοποιήσει τους δείκτες γραμμής και στήλης με σφάλματα ισοτιμίας για να προσδιορίσει το αλλοιωμένο bit και να διορθώσει αυτό το σφάλμα! Η Εικόνα 6.5 δείχνει ένα παράδειγμα, στο οποίο το bit με τιμή 1 στη θέση (2,2) έχει αλλοιωθεί και έχει αλλάξει σε 0 – ένα σφάλμα που είναι και ανιχνεύσιμο και διορθώσιμο στον παραλήπτη. Παρ' όλο που η συζήτησή μας έχει εστιάσει στα αρχικά d bits πληροφοριών, ένα μοναδικό σφάλμα στα bits ισοτιμίας είναι επίσης ανιχνεύσιμο και διορθώσιμο. Η διδιάστατη ισοτιμία μπορεί επίσης να ανιχνεύσει (αλλά όχι και να διορθώσει!) οποιονδήποτε συνδυασμό δύο σφαλμάτων μέσα σ' ένα πακέτο. Άλλες ιδιότητες του σχήματος διδιάστατης ισοτιμίας διερευνώνται στα προβλήματα στο τέλος του κεφαλαίου.



Εικόνα 6.5 ♦ Δισδιάστατη άρτια ισοτιμία

Η ικανότητα του παραλήπτη να ανιχνεύει και να διορθώνει σφάλματα είναι γνωστή ως **πρόσθια (ή προληπτική) διόρθωση σφαλμάτων (forward error correction - FEC)**. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται συνήθως σε συσκευές αποθήκευσης και αναπαραγωγής ήχου, όπως είναι τα CD ήχου. Σ' ένα περιβάλλον δικτύου, οι τεχνικές FEC μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μόνες τους ή σε συνδυασμό με τεχνικές ARQ επιπέδου ζεύξης, παρόμοιες με αυτές που εξετάσαμε στο Κεφάλαιο 3. Οι τεχνικές FEC είναι πολύτιμες, επειδή μπορούν να μειώσουν τον αριθμό των απαιτούμενων επαναμεταδόσεων απ' τον αποστολέα. Ακόμα πιο σημαντικό ίσως είναι ότι επιτρέπουν την άμεση διόρθωση σφαλμάτων στον παραλήπτη. Έτσι δεν χρειάζεται να περιμένετε για την καθυστέρηση διάδοσης διαδρομής μετ' επιστροφής, που απαιτείται για να λάβει ο αποστολέας ένα πακέτο NAK και για να διαδοθεί το επαναμεταδιδόμενο πακέτο πίσω στον παραλήπτη – ένα ενδεχομένως σημαντικό πλεονέκτημα για εφαρμογές δικτύων πραγματικού χρόνου [Rubenstein 1998] ή για ζεύξεις (όπως οι ζεύξεις βαθέως διαστήματος) με μεγάλες καθυστερήσεις διάδοσης. Στις έρευνες που εξετάζουν τη χρήση FEC σε πρωτόκολλα ελέγχου σφαλμάτων περιλαμβάνονται τα [Biersack 1992, Nonnenmacher 1998, Byers 1998, Shacham 1990].

6.2.2 Μέθοδοι Αθροίσματος Ελέγχου

Στις τεχνικές αθροίσματος ελέγχου, τα d bits δεδομένων στην Εικόνα 6.4 θεωρούνται ως μία ακολουθία ακεραίων k -bit. Μία απλή μέθοδος αθροίσματος ελέγχου είναι να αθροίσετε απλώς τους ακεραίους k -bit και να χρησιμοποιήσετε το προκύπτον άθροισμα ως τα bits ανίχνευσης σφάλματος. Το **άθροισμα ελέγχου Διαδικτύου (Internet checksum)** βασίζεται σ' αυτήν την προσέγγιση – τα bytes δεδομένων θεωρούνται ακεραίοι 16-bit και αθροίζονται. Το συμπλήρωμα ως προς 1 αυτού του αθροίσματος αποτελεί κατόπιν το άθροισμα ελέγχου Διαδικτύου, το οποίο μεταφέρεται εντός της κεφαλίδας του τμήματος. Όπως συζητήσαμε στην Ενότητα 3.3, ο παραλήπτης ελέγχει το άθροισμα ελέγχου λαμβάνοντας το συμπλήρωμα ως προς 1 του αθροίσματος των ληφθέντων δεδομένων (συμπεριλαμβανομένου του αθροίσματος ελέγχου) και ελέγχοντας εάν το αποτέλεσμα αποτελείται μόνο από bits 0. Εάν οσαδήποτε bits είναι 1, τότε υποδεικνύεται ένα σφάλμα. Το RFC 1071 παρουσιάζει τον αλγόριθμο αθροίσματος ελέγχου Διαδικτύου και την υλοποίησή του λεπτομερώς. Στα πρωτόκολλα TCP και UDP, το άθροισμα ελέγχου Διαδικτύου υπολογίζεται επί όλων των πεδίων (περιλαμβανομένων των πεδίων κεφαλίδας και των πεδίων δεδομένων). Στο IP, το άθροισμα ελέγχου υπολογίζεται στην κεφαλίδα IP (αφού το τμήμα UDP ή TCP έχει το δικό του άθροισμα ελέγχου). Σε άλλα πρωτόκολλα, όπως το XTP [Strayer 1992], υπολογίζονται ένα άθροισμα ελέγχου για την κεφαλίδα και ένα άλλο άθροισμα ελέγχου για ολόκληρο το πακέτο.

Οι μέθοδοι αθροίσματος ελέγχου απαιτούν σχετικά μικρό επιπρόσθετο φορτίο πακέτου. Για παράδειγμα, τα αθροίσματα ελέγχου στο TCP και στο UDP χρησιμοποιούν μόνο 16 bits. Ωστόσο, παρέχουν σχετικά μικρή προστασία από σφάλματα σε σύγκριση με τον κυκλικό πλεονασμό, ο οποίος συζητείται παρακάτω και χρησιμοποιείται συχνά στο επίπεδο ζεύξης. Μία εύλογη ερώτηση σ' αυτό το σημείο είναι: Γιατί χρησιμοποιείται το άθροισμα ελέγχου στο επίπεδο μεταφοράς και ο έλεγχος κυκλικού πλεονασμού στο επίπεδο ζεύξης; Θυμηθείτε ότι το επίπεδο μεταφοράς υλοποιείται τυπικά μέσω λογισμικού σε έναν υπολογιστή, ως τμήμα του λειτουργικού συστήματός του. Επειδή η ανίχνευση σφαλμάτων επιπέδου μεταφοράς υλοποιείται μέσω λογισμικού, είναι σημαντικό να έχετε ένα απλό και γρήγορο σχήμα ανίχνευσης σφάλματος, όπως το άθροισμα ελέγχου. Απ' την άλλη, η ανίχνευση σφάλματος στο επίπεδο ζεύξης υλοποιείται μέσω αποκλειστικού υλικού μέσα σε προσαρμογείς, το οποίο μπορεί να εκτελέσει ταχέως τις πιο πολύπλοκες πράξεις του CRC. Ο Feldmeier [Feldmeier 1995] παρουσιάζει ταχείες τεχνικές υλοποίησης με λογισμικό όχι μόνον για κώδικες σταθμισμένου αθροίσματος ελέγχου, αλλά και για CRC (βλ. παρακάτω) και για άλλους κώδικες.

6.2.3 Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού (CRC)

Μία τεχνική ανίχνευσης σφαλμάτων, που χρησιμοποιείται ευρέως στα σημερινά δίκτυα υπολογιστών, βασίζεται σε **κώδικες κυκλικού ελέγχου πλεονασμού (cyclic redundancy check [CRC] codes)**. Οι κώδικες CRC είναι επίσης γνωστοί ως **πολυωνυμικοί κώδικες (polynomial codes)**, καθώς είναι δυνατόν να θεωρήσετε την προς αποστολή δυαδική συμβολοσειρά (bit string) ως ένα πολυώνυμο, οι συντελεστές του οποίου είναι οι τιμές 0 και 1 μέσα στη δυαδική συμβολοσειρά, με τις πράξεις επί της δυαδικής συμβολοσειράς να ερμηνεύονται ως πολυωνυμική αριθμητική.

Οι κώδικες CRC λειτουργούν ως εξής. Θεωρήστε το d -bit τμήμα δεδομένων D , το οποίο ο κόμβος αποστολής θέλει να στείλει στον κόμβο λήψης. Αποστολέας και παραλήπτης πρέπει πρώτα να συμφωνήσουν σε μία ακολουθία (ή σχήμα) $r + 1$ bits, γνωστή ως **γεννήτρια (generator)**, την οποία θα συμβολίσουμε με G . Θα απαιτήσουμε το πιο σημαντικό (το αριστερότερο) bit του G να είναι 1. Η βασική ιδέα πίσω απ' τους κώδικες CRC φαίνεται στην Εικόνα 6.6. Για ένα δεδομένο τμήμα δεδομένων, D , ο αποστολέας θα επιλέξει r πρόσθετα bits, R και θα τα προσαρτήσει στο D , έτσι ώστε η προκύπτουσα ακολουθία $d + r$ bits (ερμηνευόμενη ως δυαδικός αριθμός) να διαιρείται ακριβώς με το G χρησιμοποιώντας αριθμητική υπολοίπων modulo 2. Η διαδικασία ελέγχου σφάλματος με το CRC είναι επομένως απλή: Ο παραλήπτης διαιρεί τα λαμβανόμενα $d + r$ bits με το G . Εάν το υπόλοιπο είναι διάφορο του μηδενός, ο παραλήπτης γνωρίζει ότι έχει συμβεί ένα σφάλμα· αλλιώς, τα δεδομένα γίνονται αποδεκτά ως σωστά.

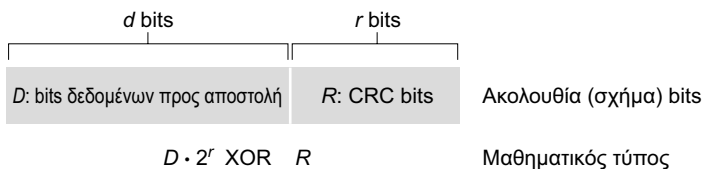
Όλοι οι υπολογισμοί CRC γίνονται με αριθμητική υπολοίπων modulo 2 χωρίς κρατούμενα στην πρόσθεση και δανεικά κρατούμενα στην αφαίρεση. Αυτό σημαίνει ότι η πρόσθεση και η αφαίρεση είναι ταυτόσημες και είναι και οι δύο ισοδύναμες με την αποκλειστική διάζευξη (XOR) επιπέδου bit των τελεστών. Έτσι, για παράδειγμα:

```
1011 XOR 0101 = 1110
1001 XOR 1101 = 0100
```

Επίσης, έχουμε παρομοίως

```
1011 - 0101 = 1110
1001 - 1101 = 0100
```

Ο πολλαπλασιασμός και η διαίρεση είναι ίδιες πράξεις όπως στην αριθμητική με βάση το 2, με την εξαίρεση ότι τυχόν απαιτούμενη πρόσθεση ή αφαίρεση γίνεται χωρίς κρατούμενα.



Εικόνα 6.6 ♦ CRC

Έχουν ορισθεί διεθνή πρότυπα για γεννήτριες 8-, 12-, 16- και 32-bit. Το πρότυπο 32-bit CRC-32, το οποίο έχει υιοθετηθεί σε αρκετά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης του IEEE, χρησιμοποιεί τη γεννήτρια:

$$G_{\text{CRC-32}} = 100000100110000010001110110110111$$

Καθένα απ' τα πρότυπα CRC μπορεί να ανιχνεύσει ριπές σφαλμάτων με λιγότερα από $r + 1$ bits. (Αυτό σημαίνει ότι όλα τα συνεχόμενα σφάλματα bit με r bits ή λιγότερα θα ανιχνευθούν). Επιπλέον, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, μία ριπή μήκους μεγαλύτερου των $r + 1$ bits ανιχνεύεται με πιθανότητα $1 - 0,5^r$. Επίσης, κάθε πρότυπο CRC μπορεί να ανιχνεύσει οποιονδήποτε περιττό αριθμό σφαλμάτων bit. Δείτε το [Williams 1993] για μία συζήτηση υλοποίησης ελέγχων CRC. Η θεωρία πίσω απ' τους κώδικες CRC και ακόμη ισχυρότερους κώδικες είναι πέραν του σκοπού αυτού του βιβλίου. Το βιβλίο [Schwartz 1980] παρέχει μία εξαιρετική εισαγωγή σ' αυτό το θέμα.

6.3 Πρωτόκολλα και Ζεύξεις Πολλαπλής Προσπέλασης

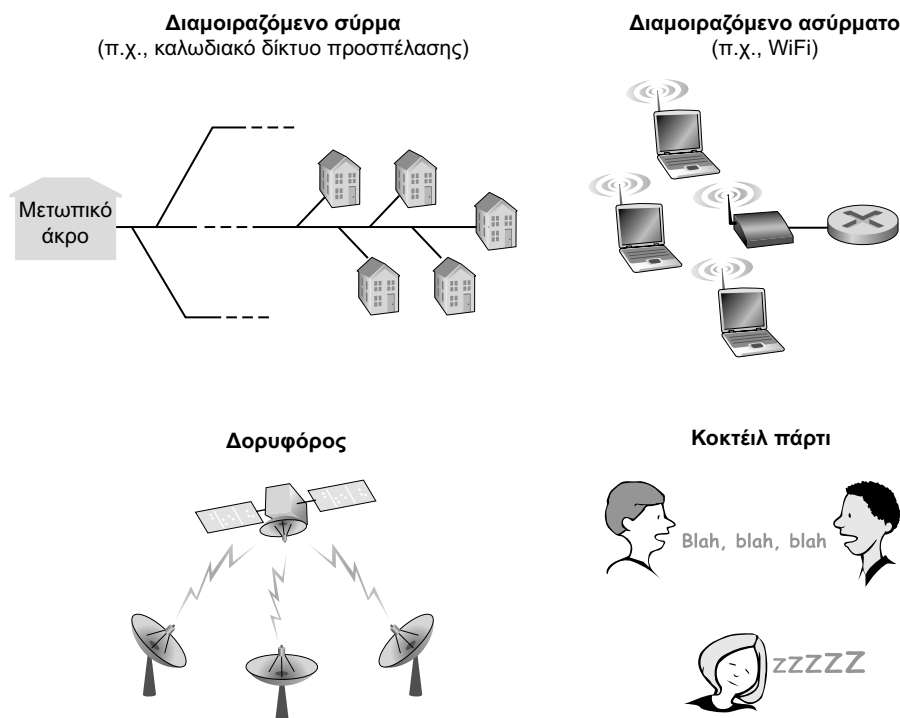
Στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, σημειώσαμε ότι υπάρχουν δύο τύποι ζεύξεων δικτύου: ζεύξεις σημείου-προς-σημείο και ζεύξεις εκπομπής. Μία **ζεύξη σημείου-προς-σημείο (point-to-point link)** αποτελείται από έναν μόνον αποστολέα στο ένα άκρο της ζεύξης και έναν μόνον παραλήπτη στο άλλο άκρο της ζεύξης. Πολλά πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης έχουν σχεδιασθεί για ζεύξεις σημείου-προς-σημείο: το πρωτόκολλο σημείου-προς-σημείο (Point-to-Point-Protocol – PPP) και το πρωτόκολλο ελέγχου ζεύξης δεδομένων υψηλού επιπέδου (High-level Data Link Control – HDLC) είναι δύο τέτοια πρωτόκολλα. Ο δεύτερος τύπος ζεύξης, μία **ζεύξη εκπομπής (broadcast link)**, μπορεί να έχει πολλαπλούς κόμβους αποστολής και λήψης, με όλους τους συνδεδεμένους στο ίδιο, μοναδικό, διαμοιραζόμενο κανάλι εκπομπής. Ο όρος *εκπομπή (broadcast)* χρησιμοποιείται εδώ, επειδή όταν ένας κόμβος μεταδίδει ένα πλαίσιο, το κανάλι εκπέμπει το πλαίσιο και καθένας απ' τους άλλους κόμβους λαμβάνει ένα αντίγραφο. Το Ethernet και τα ασύρματα LAN είναι παραδείγματα τεχνολογιών εκπομπής επιπέδου ζεύξης. Σ' αυτήν την ενότητα θα κάνουμε ένα βήμα πίσω απ' τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης και θα εξετάσουμε πρώτα ένα πρόβλημα βασικής σημασίας για το επίπεδο ζεύξης: πώς να συντονίσετε την προσπάθεια πολλαπλών κόμβων αποστολής και λήψης σ' ένα διαμοιραζόμενο κανάλι εκπομπής – το **πρόβλημα πολλαπλής προσπέλασης (multiple access problem)**. Κανάλια εκπομπής χρησιμοποιούνται συχνά σε δίκτυα τοπικής περιοχής (LAN), δίκτυα που είναι γεωγραφικά συγκεντρωμένα μέσα σε ένα κτήριο (ή μέσα σε ένα εταιρικό ή πανεπιστημιακό συγκρότημα). Έτσι, στο τέλος αυτής της ενότητας, θα εξετάσουμε επίσης πώς χρησιμοποιούνται τα κανάλια πολλαπλής προσπέλασης σε LAN.

Είμαστε όλοι εξοικειωμένοι με την ιδέα της εκπομπής, αφού η τηλεόραση την χρησιμοποιεί απ' τη στιγμή που εφευρέθηκε. Αλλά η παραδοσιακή τηλεόραση είναι μονοκατευθυντική εκπομπή (δηλ., ένας σταθερός κόμβος εκπέμπει προς πολλούς κόμβους λήψης), ενώ οι κόμβοι σε ένα κανάλι εκπομπής δικτύου υπολογιστών μπορούν τόσο να εκπέμπουν όσο και να λαμβάνουν. Ίσως μία καταλληλότερη ανθρώπινη αναλογία για ένα κανάλι εκπομπής είναι ένα κοκτέιλ πάρτι, όπου πολλοί άνθρωποι συγκεντρώνονται σε ένα μεγάλο δωμάτιο (το μέσο εκπομπής είναι ο αέρας) για να μιλήσουν και να ακούσουν. Μία δεύτερη καλή αναλογία είναι κάτι με το οποίο πολλοί αναγνώστες θα είναι εξοικειωμένοι – μία αίθουσα διδασκαλίας – όπου καθηγητές και μαθητές μοιράζονται το ίδιο, μοναδικό μέσο εκπομπής. Ένα κεντρικό πρόβλημα και στα δύο σενάρια είναι ο καθορισμός του ποιος μιλά (δηλ. ποιος

μεταδίδει μέσα στο κανάλι) και πότε. Ως άνθρωποι έχουμε αναπτύξει ένα περίπλοκο σύνολο πρωτοκόλλων για τον διαμοιρασμό του καναλιού εκπομπής:

«Δώσε σε όλους την ευκαιρία να μιλήσουν».
 «Μην μιλήσεις μέχρι να σου απευθύνουν τον λόγο».
 «Μην μονοπωλείς την συζήτηση».
 «Σήκωσε το χέρι σου εάν έχεις κάποια ερώτηση».
 «Μην διακόπτεις όταν μιλά κάποιος άλλος».
 «Μην κοιμάσαι όταν μιλά κάποιος».

Ομοίως, τα δίκτυα υπολογιστών έχουν πρωτόκολλα – τα επονομαζόμενα **πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης (multiple access protocols)** – βάσει των οποίων οι κόμβοι ρυθμίζουν την μετάδοσή τους στο διαμοιραζόμενο κανάλι εκπομπής. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.8, τα πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης χρειάζονται σε μία μεγάλη ποικιλία περιβαλλόντων δικτύων, που περιλαμβάνει ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα προσπέλασης και δορυφορικά δίκτυα. Αν και τεχνολογικά κάθε κόμβος προσπελάζει το κανάλι εκπομπής μέσω του προσαρμογέα του, στην ενότητα αυτή θα αναφερόμαστε στον κόμβο ως τη συσκευή



Εικόνα 6.8 ♦ Διάφορα κανάλια πολλαπλής προσπέλασης

αποστολής και λήψης. Στην πράξη, εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν άμεσα μέσω ενός καναλιού εκπομπής.

Επειδή όλοι οι κόμβοι είναι ικανοί να μεταδίδουν πλαίσια, περισσότεροι από δύο κόμβοι μπορούν να μεταδίδουν πλαίσια ταυτόχρονα. Όταν συμβαίνει αυτό, όλοι οι κόμβοι δέχονται πολλαπλά πλαίσια ταυτόχρονα· δηλαδή, τα μεταδιδόμενα πλαίσια **συγκρούονται (collide)** σε όλους τους αποδέκτες. Τυπικά, όταν υπάρχει μία σύγκρουση, κανένας απ' τους κόμβους λήψης δεν μπορεί να κατανοήσει κανένα απ' τα πλαίσια που μεταδόθηκαν· κατά μία έννοια, τα σήματα των συγκρουόμενων πλαισίων εμπλέκονται άρρηκτα μεταξύ τους. Έτσι, όλα τα πλαίσια που λαμβάνουν μέρος στην σύγκρουση χάνονται και το κανάλι εκπομπής σπαταλάται κατά το διάστημα της σύγκρουσης. Είναι σαφές ότι, εάν πολλοί κόμβοι θέλουν να μεταδίδουν πλαίσια συχνά, πολλές μεταδόσεις θα έχουν ως αποτέλεσμα συγκρούσεις και μεγάλο μέρος του εύρους ζώνης του καναλιού εκπομπής θα σπαταλάται.

Για να διασφαλίσετε ότι το κανάλι εκπομπής πραγματοποιεί χρήσιμο έργο όταν είναι ενεργοί πολλαπλοί κόμβοι, είναι αναγκαίο να συντονίσετε με κάποιον τρόπο τις μεταδόσεις των ενεργών κόμβων. Αυτό το έργο συντονισμού είναι ευθύνη του πρωτοκόλλου πολλαπλής προσπέλασης. Τα τελευταία 40 χρόνια, χιλιάδες άρθρα και εκατοντάδες διδακτορικές διατριβές έχουν γραφεί για τα πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης· μία εμπεριστατωμένη μελέτη εργασιών των πρώτων 20 ετών περιέχεται στο [Rom 1990]. Επιπροσθέτως, η έρευνα για πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης συνεχίζεται ενεργά, λόγω της συνεχιζόμενης εμφάνισης νέων τύπων ζεύξεων, ιδιαιτέρως νέων ασύρματων ζεύξεων.

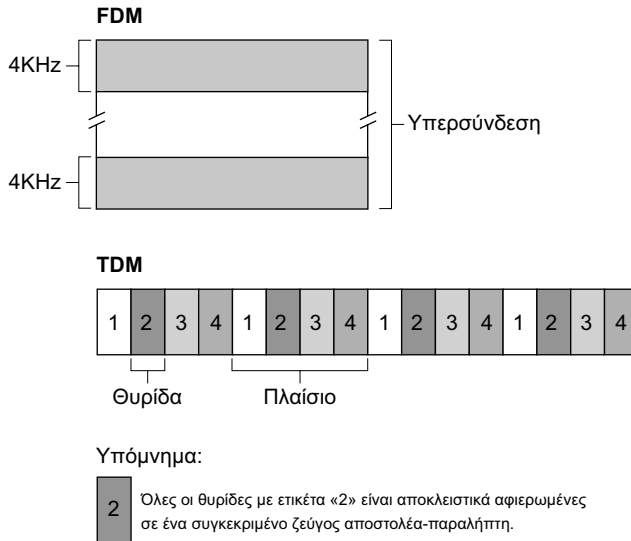
Με τα χρόνια, δεκάδες πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης έχουν υλοποιηθεί σε διάφορες τεχνολογίες επιπέδου ζεύξης. Παρά ταύτα, μπορούμε να κατατάξουμε σχεδόν όλα τα πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης σε τρεις κατηγορίες: **πρωτόκολλα διαμέρισης ή κατάτμησης ή επιμερισμού καναλιού (channel partitioning protocols)**, **πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης (random access protocols)** και **πρωτόκολλα λειτουργίας εκ περιτροπής ή προσπέλασης «με σειρά» (taking-turns protocols)**. Θα καλύψουμε αυτές τις κατηγορίες πρωτοκόλλων πολλαπλής προσπέλασης στις τρεις επόμενες υποενότητες.

Ας ολοκληρώσουμε αυτήν την επισκόπηση σημειώνοντας ότι ένα πρωτόκολλο πολλαπλής προσπέλασης για ένα κανάλι εκπομπής ρυθμού R bits ανά δευτερόλεπτο πρέπει, ιδανικά, να έχει τα παρακάτω επιθυμητά χαρακτηριστικά:

1. Όταν μόνον ένας κόμβος έχει δεδομένα για αποστολή, εκείνος ο κόμβος έχει διεκπεραιωτική ικανότητα R bps.
2. Όταν M κόμβοι έχουν δεδομένα για αποστολή, κάθε ένας απ' αυτούς τους κόμβους έχει διεκπεραιωτική ικανότητα R/M bps. Αυτό δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι κάθε ένας απ' τους M κόμβους έχει πάντα έναν στιγμιαίο ρυθμό R/M , αλλά ότι κάθε κόμβος θα πρέπει να έχει έναν μέσο ρυθμό μετάδοσης R/M κατά τη διάρκεια ενός κατάλληλα καθορισμένου χρονικού διαστήματος.
3. Το πρωτόκολλο είναι αποκεντρωμένο· δηλαδή δεν υπάρχουν ένας κύριος κόμβος, ο οποίος να μπορεί να προκαλέσει αστοχία ολόκληρου του δικτύου.
4. Το πρωτόκολλο είναι απλό, ώστε να είναι φθηνό στην υλοποίησή του.

6.3.1 Πρωτόκολλα Διαμέρισης Καναλιού

Θυμηθείτε απ' την προηγούμενη συζήτησή μας στην Ενότητα 1.3, ότι η πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου (TDM) και η πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας (FDM) είναι δύο τεχνικές οι οποίες μπορούν να



Εικόνα 6.9 ♦ Ένα παράδειγμα TDM και FDM τεσσάρων κόμβων

μεταξύ όλων των κόμβων που διαμοιράζονται αυτό το κανάλι. Ως παράδειγμα, υποθέστε ότι το κανάλι υποστηρίζει N κόμβους και ότι ο ρυθμός μετάδοσης του καναλιού είναι R bps. Το TDM διαιρεί τον χρόνο σε **χρονοπλαίσια** (time frames) και διαιρεί περαιτέρω κάθε χρονοπλαίσιο σε N **χρονοθυρίδες** (time slots). (Το χρονοπλαίσιο TDM δεν πρέπει να συγχέεται με τη μονάδα επιπέδου ζεύξης δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ προσαρμογέων αποστολής και λήψης, η οποία καλείται επίσης *πλαίσιο*. Προκειμένου να μειώσουμε τη σύγχυση, σε αυτήν την υποενότητα θα αναφερόμαστε στη μονάδα δεδομένων του επιπέδου ζεύξης ως ένα πακέτο). Κάθε χρονοθυρίδα εκχωρείται κατόπιν σε έναν απ' τους N κόμβους. Όποτε ένας κόμβος έχει ένα πακέτο για αποστολή, μεταδίδει τα bits του πακέτου κατά τη διάρκεια της χρονοθυρίδας που του έχει εκχωρηθεί μέσα στο περιοδικά διαθέσιμο πλαίσιο TDM. Τυπικά, τα μεγέθη χρονοθυρίδων επιλέγονται έτσι, ώστε να μπορεί να μεταδοθεί μόνον ένα πακέτο κατά τη διάρκεια μίας θυρίδας. Η Εικόνα 6.9 δείχνει ένα απλό παράδειγμα TDM τεσσάρων κόμβων. Επιστρέφοντας στο παράδειγμά μας του κοκτέιλ πάρτι, ένα ρυθμιζόμενο μέσω TDM πάρτι θα επέτρεπε μόνον σε έναν συμμετέχοντα να μιλά για ένα σταθερό χρονικό διάστημα, μετά θα επέτρεπε σε έναν άλλον συμμετέχοντα να μιλά για ίδιο χρονικό διάστημα κ.ο.κ. Αφού θα είχαν όλοι μία ευκαιρία να μιλήσουν, το μοτίβο θα επαναλαμβανόταν.

Το TDM είναι ελκυστικό, επειδή εξαλείφει τις συγκρούσεις και είναι ακριβοδίκαιο: Κάθε κόμβος λαμβάνει έναν αποκλειστικό ρυθμό μετάδοσης R/N bps κατά τη διάρκεια κάθε χρόνου πλαισίου. Εν τούτοις, έχει δύο βασικά μειονεκτήματα. *Πρώτον*, ένας κόμβος περιορίζεται σε έναν μέσο ρυθμό R/N bps, ακόμη και όταν είναι ο μόνος κόμβος που έχει πακέτα να στείλει. Ένα *δεύτερο* μειονέκτημα είναι ότι ένας κόμβος πρέπει να περιμένει πάντα τη σειρά του μέσα στην ακολουθία μετάδοσης – πάλι, ακόμη και εάν είναι ο μόνος κόμβος μ' ένα πλαίσιο για αποστολή. Φανταστείτε έναν συμμετέχοντα στο πάρτι, που είναι ο μόνος που έχει να πει κάτι (και φανταστείτε, ότι πρόκειται για την ακόμη πιο σπάνια περίπτωση που όλοι μέσα στο πάρτι

θέλουν να ακούσουν αυτό που έχει να πει το συγκεκριμένο άτομο). Είναι σαφές ότι το TDM θα ήταν μία άσχημη επιλογή πρωτοκόλλου πολλαπλής προσπέλασης για το συγκεκριμένο πάρτι.

Ενώ το TDM διαμοιράζει το κανάλι εκπομπής μέσα στον χρόνο, το FDM διαιρεί το κανάλι ρυθμού R bps σε διαφορετικές συχνότητες (κάθε μία με εύρος ζώνης R/N) και εκχωρεί μία συχνότητα σε καθέναν απ' τους N κόμβους. Το FDM δημιουργεί έτσι N μικρότερα κανάλια ρυθμού R/N bps απ' το ένα, μεγαλύτερο κανάλι ρυθμού R bps. Το FDM έχει τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με το TDM. Αποφεύγει τις συγκρούσεις και διαιρεί το εύρος ζώνης δίκαια ανάμεσα στους N κόμβους. Αλλά, το FDM επίσης έχει ένα ιδίο βασικό μειονέκτημα με το TDM – ένας κόμβος περιορίζεται σ' ένα εύρος ζώνης R/N , ακόμη και όταν είναι ο μόνος με πακέτα προς αποστολή.

Ένα τρίτο πρωτόκολλο διαμέρισης καναλιού είναι η **πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση κώδικα (code division multiple access – CDMA)**. Ενώ τα TDM και FDM εκχωρούν χρονοθυρίδες και συχνότητες, αντίστοιχως, στους κόμβους, το CDMA εκχωρεί έναν διαφορετικό κώδικα σε κάθε κόμβο. Κάθε κόμβος χρησιμοποιεί κατόπιν τον μοναδικό του κώδικα για να κωδικοποιήσει τα bits δεδομένων που στέλνει. Εάν οι κώδικες επιλεγούν προσεκτικά, τότε τα δίκτυα CDMA έχουν τη θαυμάσια ιδιότητα, διαφορετικοί κόμβοι να μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα και μολαταύτα οι αντίστοιχοι παραλήπτες τους να λαμβάνουν σωστά τα κωδικοποιημένα bits δεδομένων ενός αποστολέα (υποθέτοντας ότι ο παραλήπτης γνωρίζει τον κώδικα του αποστολέα), παρά τις παρεμβαλλόμενες μεταδόσεις από άλλους κόμβους. Το CDMA έχει χρησιμοποιηθεί σε στρατιωτικά συστήματα για αρκετό διάστημα (λόγω των ιδιοτήτων του αποτροπής παρεμβολών [anti-jamming]) και σήμερα έχει ευρεία χρήση σε πολιτικές εφαρμογές, ειδικά στην κινητή τηλεφωνία. Επειδή η χρήση του CDMA είναι πολύ στενά συνδεδεμένη με ασύρματα κανάλια, θα αναβάλλουμε τη συζήτησή μας για τις τεχνικές λεπτομέρειες του CDMA για το Κεφάλαιο 7. Για την ώρα, αρκεί να γνωρίζετε ότι οι κώδικες CDMA, όπως οι χρονοθυρίδες στο TDM και οι συχνότητες στο FDM, μπορούν να κατανέμονται στους χρήστες καναλιών πολλαπλής προσπέλασης.

6.3.2 Πρωτόκολλα Τυχαίας Προσπέλασης

Η δεύτερη ευρεία κατηγορία πρωτοκόλλων πολλαπλής προσπέλασης είναι τα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης. Σ' ένα πρωτόκολλο τυχαίας προσπέλασης, ένας εκπέμπων κόμβος εκπέμπει πάντα με τον πλήρη ρυθμό του καναλιού, δηλαδή, R bps. Όταν υπάρχει μία σύγκρουση, κάθε κόμβος που εμπλέκεται στην σύγκρουση επανεκπέμπει συνεχώς το πλαίσιό του (δηλ. το πακέτο), μέχρι αυτό να περάσει χωρίς σύγκρουση. Όταν όμως ένας κόμβος ανιχνεύει μία σύγκρουση, δεν επαναμεταδίδει κατ' ανάγκη το πλαίσιο αμέσως. Αντ' αυτού περιμένει επί ένα διάστημα τυχαίας καθυστέρησης πριν να επαναμεταδώσει το πλαίσιο. Κάθε κόμβος που εμπλέκεται σε μία σύγκρουση επιλέγει ανεξάρτητες τυχαίες καθυστερήσεις. Επειδή οι τυχαίες καθυστερήσεις επιλέγονται ανεξάρτητα, είναι δυνατόν ένας απ' τους κόμβους να επιλέξει μία καθυστέρηση η οποία θα είναι αρκετά μικρότερη απ' τις καθυστερήσεις των άλλων συγκρουόμενων κόμβων και έτσι θα μπορέσει να περάσει το πλαίσιό του μέσα στο κανάλι, χωρίς σύγκρουση.

Στη βιβλιογραφία περιγράφονται δεκάδες, αν όχι εκατοντάδες, πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης [Rom 1990, Bertsekas 1991]. Σ' αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε μερικά απ' τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης – τα πρωτόκολλα ALOHA [Abramson 1970, Abramson 1985, Abramson 2009] και τα πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης με ανίχνευση φέροντος (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) [Kleinrock 1975b]. Το Ethernet [Metcalfe 1976] είναι ένα δημοφιλές και ευρέως χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο CSMA.

Θυριδωτό ALOHA

Ας αρχίσουμε τη μελέτη των πρωτοκόλλων τυχαίας προσπέλασης με ένα απ' τα απλούστερα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης, το θυριδωτό (τεμαχισμένο) πρωτόκολλο ALOHA (slotted ALOHA). Στην περιγραφή μας για το θυριδωτό ALOHA υποθέτουμε τα εξής:

- Όλα τα πλαίσια αποτελούνται από ακριβώς L bits.
- Ο χρόνος διαιρείται σε θυρίδες μεγέθους L/R δευτερολέπτων (δηλ., μία θυρίδα ισούται με τον χρόνο μετάδοσης ενός πλαισίου).
- Οι κόμβοι αρχίζουν να μεταδίδουν πλαίσια μόνον στις αρχές των θυρίδων.
- Οι κόμβοι συγχρονίζονται έτσι, ώστε κάθε κόμβος να γνωρίζει πότε αρχίζουν οι θυρίδες.
- Εάν δύο ή περισσότερα πλαίσια συγκρούονται μέσα σε μία θυρίδα, τότε όλοι οι κόμβοι ανιχνεύουν το συμβάν της σύγκρουσης πριν να τελειώσει η θυρίδα

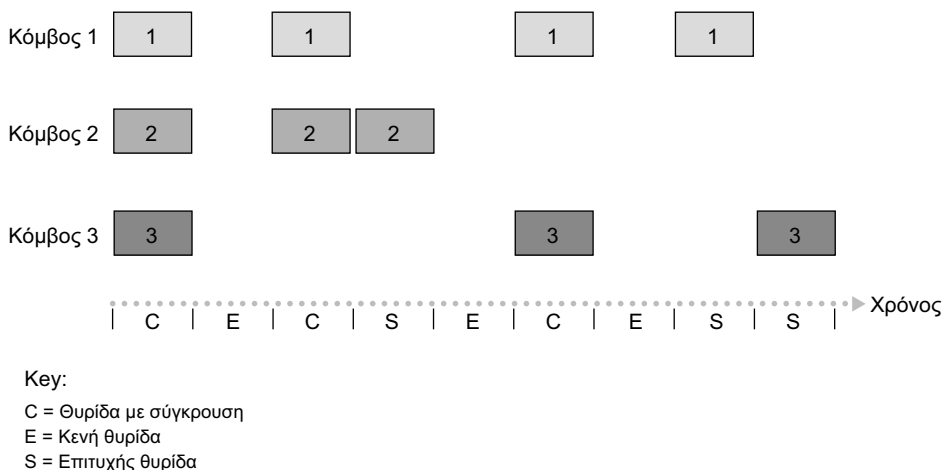
Έστω p μία πιθανότητα, δηλαδή ένας αριθμός μεταξύ 0 και 1. Η λειτουργία του θυριδωτού ALOHA σε κάθε κόμβο είναι απλή:

- Όταν ο κόμβος έχει ένα νέο πλαίσιο να στείλει, περιμένει μέχρι την αρχή της επόμενης θυρίδας και μεταδίδει ολόκληρο το πλαίσιο μέσα στην θυρίδα.
- Εάν δεν υπάρχει σύγκρουση, ο κόμβος έχει μεταδώσει επιτυχώς το πλαίσιο του και έτσι δεν χρειάζεται να εξετάσει την επαναμετάδοσή του. (Ο κόμβος μπορεί να προετοιμάσει ένα νέο πλαίσιο για μετάδοση, εάν έχει κάποιο).
- Εάν υπάρχει μία σύγκρουση, ο κόμβος ανιχνεύει την σύγκρουση πριν απ' το τέλος της θυρίδας. Ο κόμβος επαναμεταδίδει το πλαίσιο του σε κάθε επόμενη θυρίδα με πιθανότητα p , έως ότου το πλαίσιο μεταδοθεί χωρίς σύγκρουση.

Επαναμετάδοση με πιθανότητα p , σημαίνει ότι ο κόμβος στην ουσία στρίβει ένα μεροληπτικό κέρμα· το συμβάν «κεφάλι» αντιστοιχεί σε επαναμετάδοση, η οποία συμβαίνει με πιθανότητα p . Το συμβάν «γράμματα» αντιστοιχεί στο «παράλειψε τη θυρίδα και στρίψε πάλι το κέρμα στην επόμενη θυρίδα»· αυτό συμβαίνει με πιθανότητα $(1 - p)$. Όλοι οι εμπλεκόμενοι στη σύγκρουση κόμβοι στρίβουν τα κέρματά τους ανεξάρτητα.

Το θυριδωτό ALOHA φαίνεται να έχει πολλά πλεονεκτήματα. Σε αντιδιαστολή με τη διαμέριση καναλιού, το θυριδωτό ALOHA επιτρέπει σ' έναν κόμβο να μεταδίδει συνεχώς με τον πλήρη ρυθμό, R , όταν αυτός είναι ο μόνος ενεργός κόμβος. (Ένας κόμβος λέγεται ότι είναι ενεργός, εάν έχει πλαίσια να στείλει). Το θυριδωτό ALOHA είναι επίσης πολύ αποκεντρωμένο, επειδή κάθε κόμβος ανιχνεύει συγκρούσεις και αποφασίζει ανεξάρτητα πότε να επαναμεταδώσει. (Το θυριδωτό ALOHA απαιτεί, ωστόσο, οι θυρίδες να είναι συγχρονισμένες στους κόμβους· σύντομα θα συζητήσουμε μία μη θυριδωτή έκδοση του πρωτοκόλλου ALOHA, όπως και τα πρωτόκολλα CSMA, κανένα απ' τα οποία δεν απαιτεί τέτοιο συγχρονισμό). Το θυριδωτό ALOHA είναι επίσης ένα ιδιαιτέρως απλό πρωτόκολλο.

Θυριδωτό ALOHA λειτουργεί καλά όταν υπάρχει μόνον ένας ενεργός κόμβος, αλλά πόσο αποδοτικό είναι όταν υπάρχουν πολλαπλοί ενεργοί κόμβοι; Εδώ υπάρχουν δύο πιθανοί



Εικόνα 6.10 ♦ Οι κόμβοι 1, 2 και 3 συγκρούονται στην πρώτη θυρίδα. Ο κόμβος 2 τελικά επιτυγχάνει στην τέταρτη θυρίδα, ο κόμβος 1 στην όγδοη θυρίδα και ο κόμβος 3 στην ένατη θυρίδα

προβληματισμοί ως προς την αποτελεσματικότητα. Πρώτον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.10, όταν υπάρχουν πολλαπλοί ενεργοί κόμβοι, ένα ορισμένο ποσοστό θυρίδων θα έχουν συγκρούσεις και συνεπώς θα «σπαταλώνονται». Ο δεύτερος προβληματισμός είναι ότι ένα άλλο ποσοστό των θυρίδων θα είναι κενό, επειδή όλοι οι ενεργοί κόμβοι θα απέχουν απ' τη μετάδοση ως αποτέλεσμα της πιθανοτικής πολιτικής μετάδοσης. Οι μόνες «μη σπαταλώμενες» θυρίδες θα είναι εκείνες, στις οποίες μεταδίδει ακριβώς ένας κόμβος. Μία θυρίδα, κατά την οποία μεταδίδει ένας μόνον κόμβος, αποκαλείται **επιτυχής θυρίδα (successful slot)**. Η **αποδοτικότητα (efficiency)** ενός θυριδωτού πρωτοκόλλου πολλαπλής προσπέλασης ορίζεται ως το μακροπρόθεσμο κλάσμα επιτυχών θυρίδων, στην περίπτωση που υπάρχει μεγάλος αριθμός ενεργών κόμβων, με καθέναν απ' αυτούς να έχει πάντοτε έναν μεγάλο αριθμό πλαισίων να στείλει. Σημειώστε ότι εάν δεν χρησιμοποιούνταν καμία μορφή ελέγχου προσπέλασης και κάθε κόμβος έκανε επαναμετάδοση ακριβώς μετά από κάθε σύγκρουση, η απόδοση θα ήταν μηδέν. Το θυριδωτό ALOHA σαφώς αυξάνει την απόδοση πάνω απ' το μηδέν, αλλά κατά πόσο;

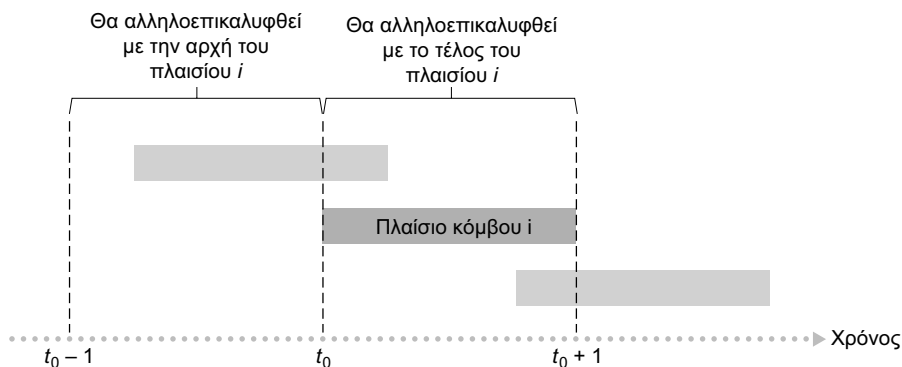
Τώρα προχωρούμε στην αδρομερή περιγραφή του υπολογισμού της μέγιστης απόδοσης του θυριδωτού ALOHA. Για να κρατήσουμε αυτόν τον υπολογισμό απλό, ας τροποποιήσουμε λίγο το πρωτόκολλο και ας υποθέσουμε ότι κάθε κόμβος προσπαθεί να μεταδώσει ένα πλαίσιο μέσα σε κάθε θυρίδα με πιθανότητα p . (Δηλ. υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος έχει πάντα ένα πλαίσιο να μεταδώσει και ότι ο κόμβος μεταδίδει με πιθανότητα p για ένα νέο πλαίσιο, όπως και για ένα πλαίσιο που έχει ήδη υποστεί μία σύγκρουση). Υποθέστε ότι υπάρχουν N κόμβοι. Τότε η πιθανότητα ότι μία δεδομένη θυρίδα είναι επιτυχής είναι η πιθανότητα ένας απ' τους κόμβους να μεταδίδει και οι υπόλοιποι $N - 1$ κόμβοι να μην μεταδίδουν. Η πιθανότητα να μεταδίδει ένας δεδομένος κόμβος είναι p : η πιθανότητα να μην μεταδίδουν οι υπόλοιποι κόμβοι είναι $(1 - p)^{N-1}$. Άρα, η πιθανότητα ένας δεδομένος κόμβος να έχει μία επιτυχία είναι $p(1 - p)^{N-1}$. Επειδή υπάρχουν N κόμβοι, η πιθανότητα οποιοσδήποτε απ' τους N κόμβους να έχει επιτυχία είναι $Np(1 - p)^{N-1}$.

Έτσι, όταν υπάρχουν N ενεργοί κόμβοι, η απόδοση του θυριδωτού ALOHA είναι $Np(1-p)^{N-1}$. Για να βρούμε τη μέγιστη απόδοση για N ενεργούς κόμβους, πρέπει να βρούμε την p^* που μεγιστοποιεί αυτήν την έκφραση. (Δείτε τα προβλήματα για το σπίτι για ένα περίγραμμα αυτού του υπολογισμού). Και για να βρούμε την μέγιστη απόδοση για έναν μεγάλο αριθμό ενεργών κόμβων, παίρνουμε το όριο του $Np^*(1-p^*)^{N-1}$, καθώς το N προσεγγίζει στο άπειρο. (Δείτε πάλι τα προβλήματα για το σπίτι). Αφού πραγματοποιήσουμε αυτούς τους υπολογισμούς, θα βρούμε ότι η μέγιστη απόδοση του πρωτοκόλλου δίνεται απ' το $1/e = 0,37$. Δηλαδή, όταν ένας μεγάλος αριθμός κόμβων έχει πολλά πλαίσια να μεταδώσει, τότε (στην καλύτερη περίπτωση) μόνον το 37% των θυριδων επιτελούν χρήσιμο έργο. Έτσι, ο ισοδύναμος ρυθμός εκπομπής του καναλιού δεν είναι R bps, αλλά μόνον $0,37 R$ bps! Μία παρόμοια ανάλυση δείχνει επίσης ότι το 37% των θυριδων είναι κενές και το 26% των θυριδων έχουν συγκρούσεις. Φαντασθείτε τον ταλαιπώρο διαχειριστή δικτύου, ο οποίος έχει προμηθευτεί ένα σύστημα θυριδωτού ALOHA 100 Mbps, προσδοκώντας να είναι σε θέση να χρησιμοποιεί το δίκτυο, προκειμένου να μεταδίδει δεδομένα ανάμεσα σε πολλούς χρήστες με συνολικό ρυθμό, ας πούμε, 80 Mbps! Αν και το κανάλι είναι σε θέση να μεταδίδει ένα δεδομένο πλαίσιο με πλήρη ρυθμό καναλιού 100 Mbps, μακροπρόθεσμα, η επιτυχής διεκπεραιωτική ικανότητα του καναλιού θα είναι μικρότερη από 37 Mbps.

ALOHA

Το θυριδωτό πρωτόκολλο ALOHA απαιτούσε όλοι οι κόμβοι να συγχρονίζουν τις μεταδόσεις τους για να εκκινούν στην αρχή μίας θυριδας. Το πρώτο πρωτόκολλο ALOHA [Abramson 1970] ήταν στην ουσία ένα μη θυριδωτό, πλήρως αποκεντρωμένο πρωτόκολλο. Στο καθαρό αυτό ALOHA, όταν πρωτοφθάνει ένα πλαίσιο (δηλ., ένα δεδομένογραμμα επιπέδου δικτύου μεταβιβάζεται απ' το επίπεδο δικτύου προς τα κάτω στον κόμβο αποστολής), ο κόμβος μεταδίδει αμέσως ολόκληρο το πλαίσιο μέσα στο κανάλι εκπομπής. Εάν ένα μεταδιδόμενο πλαίσιο συγκρουσθεί με μία ή περισσότερες άλλες μεταδόσεις, τότε ο κόμβος θα επαναμεταδώσει αμέσως το πλαίσιο (αφού ολοκληρώσει την μετάδοση του συγκρουσθέντος πλαισίου του) με πιθανότητα p . Διαφορετικά, ο κόμβος περιμένει για έναν χρόνο μετάδοσης πλαισίου. Μετά απ' αυτήν την αναμονή, μεταδίδει το πλαίσιο με πιθανότητα p ή περιμένει (παραμένοντας αδρανής) για άλλον έναν χρόνο μετάδοσης πλαισίου με πιθανότητα $1 - p$.

Για να προσδιορίσουμε τη μέγιστη απόδοση του καθαρού ALOHA, εστιάζουμε την προσοχή μας σε έναν μεμονωμένο κόμβο. Θα κάνουμε τις ίδιες υποθέσεις όπως στην ανάλυσή μας για το θυριδωτό ALOHA και θα πάρουμε ως μονάδα χρόνου τον χρόνο μετάδοσης πλαισίου. Ανά πάσα στιγμή, η πιθανότητα ένας κόμβος να μεταδίδει ένα πλαίσιο είναι p . Υποθέστε ότι αυτό το πλαίσιο αρχίζει να μεταδίδεται σε χρόνο t_0 . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.11, για να μεταδοθεί επιτυχώς αυτό το πλαίσιο, κανένας άλλος κόμβος δεν πρέπει να αρχίσει τη μετάδοσή του στο χρονικό διάστημα $[t_0 - 1, t_0]$. Μία τέτοια μετάδοση θα αλληλεπικαλυπτόταν με την αρχή της μετάδοσης του πλαισίου ενός κόμβου i . Η πιθανότητα όλοι οι άλλοι κόμβοι να μην αρχίζουν μία μετάδοση σ' αυτό το διάστημα είναι $(1 - p)^{N-1}$. Παρομοίως, κανένας άλλος κόμβος δεν μπορεί να αρχίσει μία μετάδοση, ενώ μεταδίδει ο κόμβος i , γιατί θα υπήρχε αλληλοεπικάλυψη με το τελευταίο μέρος της μετάδοσης του κόμβου i . Η πιθανότητα όλοι οι άλλοι κόμβοι να μην αρχίσουν μία μετάδοση σ, αυτό το διάστημα είναι επίσης $(1 - p)^{N-1}$. Έτσι, η πιθανότητα ένας δεδομένος κόμβος να έχει μία επιτυχή εκπομπή είναι $p(1 - p)^{2(N-1)}$. Παίρνοντας τα όρια, όπως στην περίπτωση του θυριδωτού ALOHA, βρίσκουμε ότι η μέγιστη απόδοση του καθαρού πρωτοκόλλου ALOHA είναι μόνον $1/(2e)$ – ακριβώς η μισή εκείνης του θυριδωτού ALOHA. Αυτό είναι επομένως το τίμημα για ένα πλήρως αποκεντρωμένο πρωτόκολλο ALOHA.



Εικόνα 6.11 ♦ Αλληλεπικαλυπτόμενες μεταδόσεις στο καθαρό ALOHA

Πολλαπλή Προσπέλαση με Ανίχνευση Φέροντος (CSMA)

Τόσο στο θυριδωτό, όσο και στο καθαρό ALOHA, η απόφαση ενός κόμβου να μεταδώσει λαμβάνεται ανεξάρτητα απ' τη δραστηριότητα των άλλων κόμβων, που είναι συνδεδεμένοι στο κανάλι εκπομπής. Ειδικότερα, όταν ένας κόμβος αρχίζει να μεταδίδει, δεν προσέχει εάν ένας άλλος κόμβος τυχαίνει να μεταδίδει, ούτε σταματά να μεταδίδει εάν ένας άλλος κόμβος αρχίσει να παρεμβάλλεται στη δική του μετάδοση. Στην αναλογία με το πάρτι μας, τα πρωτόκολλα ALOHA μοιάζουν μ' έναν αγροίκο συμμετέχοντα, ο οποίος συνεχίζει να μιλά ανεξάρτητα απ' το αν μιλούν άλλοι άνθρωποι. Ως άνθρωποι, έχουμε ανθρώπινα πρωτόκολλα, τα οποία μας επιτρέπουν όχι μόνον να φερόμαστε πιο πολιτισμένα, αλλά και να μειώνουμε τον χρόνο που σπαταλάται σε «συγκρούσεις» με άλλους σε μία συζήτηση και, συνεπώς, να αυξάνουμε τα δεδομένα που ανταλλάσσουμε κατά τη διάρκεια των συζητήσεών μας. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο σημαντικοί κανόνες για ευγενική συζήτηση μεταξύ ανθρώπων:

- **Άκου πριν να μιλήσεις.** Εάν κάποιος άλλος μιλά, περίμενε μέχρι να τελειώσει. Στον κόσμο της δικτύωσης, αυτό ονομάζεται **ανίχνευση φέροντος (carrier sensing)** – ένας κόμβος κάνει ακρόαση στο κανάλι πριν μεταδώσει. Εάν ένα πλαίσιο από έναν άλλο κόμβο μεταδίδεται εκείνη τη στιγμή μέσα στο κανάλι, τότε ο κόμβος περιμένει έως ότου δεν ανιχνεύει καμία μετάδοση για ένα μικρό χρονικό διάστημα κι μετά αρχίζει τη μετάδοση.
- **Εάν κάποιος άλλος αρχίσει να μιλά ταυτόχρονα, σταμάτα να μιλάς.** Στον κόσμο της δικτύωσης αυτό καλείται **ανίχνευση σύγκρουσης (collision detection)** – ένας κόμβος που μεταδίδει κάνει ακρόαση στο κανάλι ενώ μεταδίδει. Εάν ανιχνεύσει ότι ένας άλλος κόμβος μεταδίδει ένα αλληλοεπικαλυπτόμενο πλαίσιο, τότε σταματά να μεταδίδει και περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα πριν επαναλάβει τον κύκλο ανίχνευσης και μετάδοσης όταν το κανάλι είναι αδρανές.

Αυτοί οι δύο κανόνες ενσωματώνονται στην οικογένεια πρωτοκόλλων **πολλαπλής προσπέλασης με ανίχνευση φέροντος (carrier sense multiple access - CSMA)** και **CSMA με ανίχνευση συγκρούσεων (CSMA with collision detection - CSMA/CD)** [Kleinrock 1975b, Metcalfe 1976, Lam 1980, Rom 1990]. Έχουν προταθεί πολλές παραλλαγές των CSMA και

CASE HISTORY

NORM ABRAMSON KAI ALOHANET

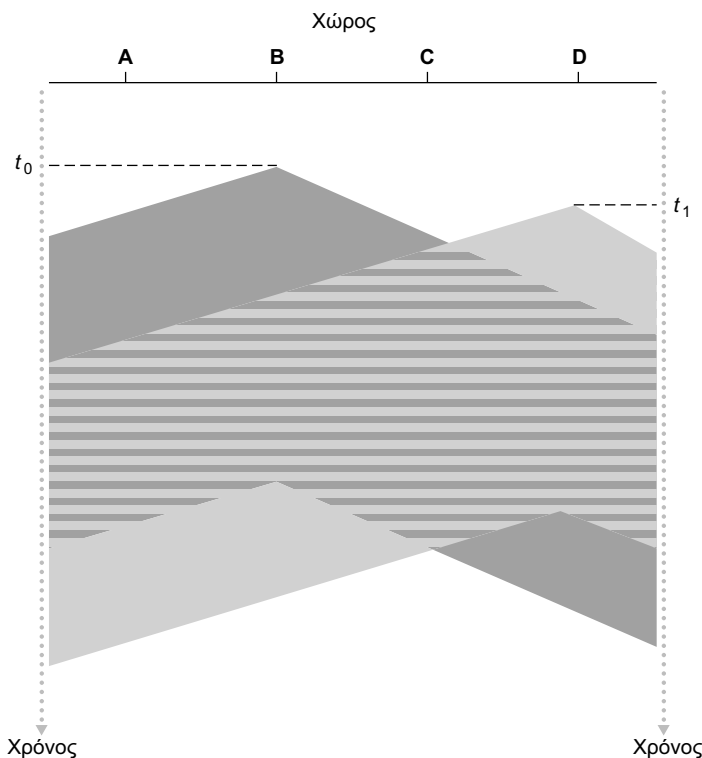
Ο Norm Abramson, ένας διδάκτορας μηχανικός, είχε πάθος για το σέρφινγκ και ενδιαφερόταν για τη μεταγωγή πακέτων. Ο συνδυασμός των ενδιαφερόντων του τον έφερε στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης το 1969. Η Χαβάη αποτελείται από πολλά ορεινά νησιά και έτσι είναι δύσκολο να εγκατασταθούν και να λειτουργήσουν επίγεια δίκτυα. Όταν δεν έκανε σέρφινγκ, ο Abramson σκεπτόταν πώς να σχεδιάσει ένα δίκτυο, το οποίο να κάνει μεταγωγή πακέτων μέσω ραδιοκυμάτων. Το δίκτυο που σχεδίασε είχε έναν κεντρικό κόμβο και αρκετούς δευτερεύοντες κόμβους διασκορπισμένους στα νησιά της Χαβάης. Το δίκτυο είχε δύο κανάλια, με το καθένα να χρησιμοποιεί μία διαφορετική ζώνη συχνοτήτων. Το συρρευματικό κανάλι εξέπεμπε πακέτα απ' τον κεντρικό υπολογιστή προς τους δευτερεύοντες υπολογιστές και το αντιρευματικό κανάλι έστελνε πακέτα απ' τους δευτερεύοντες υπολογιστές στον κεντρικό υπολογιστή. Εκτός της αποστολής πακέτων πληροφοριών, ο κεντρικός υπολογιστής έστελνε επίσης στο συρρευματικό κανάλι μία επιβεβαίωση για κάθε πακέτο το οποίο είχε λάβει επιτυχώς απ' τους δευτερεύοντες υπολογιστές.

Επειδή οι δευτερεύοντες υπολογιστές μετέδιδαν πακέτα μ' έναν αποκεντρωμένο τρόπο, ήταν αναπόφευκτο να υπάρχουν συγκρούσεις στο αντιρευματικό κανάλι. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε τον Abramson να εφεύρει το καθαρό πρωτόκολλο ALOHA, όπως το περιγράψαμε σε αυτό το κεφάλαιο. Στη δεκαετία του 1970, με συνεχιζόμενη χρηματοδότηση απ' την ARPA, ο Abramson συνέδεσε το ALOHAnet του με το ARPAnet. Η δουλειά του Abramson είναι σημαντική όχι μόνον επειδή ήταν το πρώτο παράδειγμα δικτύου μετάδοσης ραδιο-πακέτων, αλλά επίσης επειδή ενέπνευσε τον Bob Metcalfe. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Metcalfe τροποποίησε το πρωτόκολλο ALOHA προκειμένου να δημιουργήσει το πρωτόκολλο CSMA/CD και το Ethernet LAN.

CSMA/CD. Εδώ, θα μελετήσουμε μερικά απ' τα πλέον σημαντικά και θεμελιώδη χαρακτηριστικά των CSMA και CSMA/CD.

Η πρώτη ερώτηση που μπορεί να κάνει κάποιος για το CSMA είναι γιατί γίνονται συγκρούσεις, εάν όλοι οι κόμβοι κάνουν ανίχνευση φέροντος; Στο κάτω-κάτω, ένας κόμβος θα αποφύγει να μεταδώσει όποτε ανιχνεύσει ότι μεταδίδει ένας άλλος κόμβος. Η απάντηση σ' αυτήν την ερώτηση μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα χρησιμοποιώντας διαγράμματα χώρου-χρόνου [Molle 1987]. Η Εικόνα 6.12 δείχνει ένα διάγραμμα χώρου-χρόνου τεσσάρων κόμβων (A, B, C, D) συνδεδεμένων σ' έναν γραμμικό δίαυλο εκπομπής. Ο οριζόντιος άξονας δείχνει τη θέση κάθε κόμβου στον χώρο· ο κατακόρυφος άξονας αναπαριστά τον χρόνο.

Τη χρονική στιγμή t_0 , ο κόμβος B ανιχνεύει ότι το κανάλι είναι αδρανές, αφού κανένας άλλος κόμβος δεν μεταδίδει εκείνη τη στιγμή. Ο κόμβος B αρχίζει λοιπόν να μεταδίδει, με τα bits του να διαδίδονται και προς τις δύο κατευθύνσεις κατά μήκος του μέσου εκπομπής. Η προς τα κάτω διάδοση των bits του B στην Εικόνα 6.12 με την αύξηση του χρόνου υποδεικνύει ότι απαιτείται μη μηδενικός χρόνος ώστε να διαδοθούν, στην πραγματικότητα, τα bits του B κατά μήκος του μέσου εκπομπής (μολονότι με σχεδόν την ταχύτητα του φωτός). Κατά την χρονική στιγμή t_1 (όπου $t_1 > t_0$), ο κόμβος D έχει ένα πλαίσιο να στείλει. Παρ' όλο που ο κόμβος B μεταδίδει αυτήν τη χρονική στιγμή t_1 , τα bits που μεταδίδονται απ' τον B δεν έχουν φθάσει ακόμη στον D και έτσι ο D ανιχνεύει ότι το κανάλι είναι αδρανές τη χρονική στιγμή t_1 .

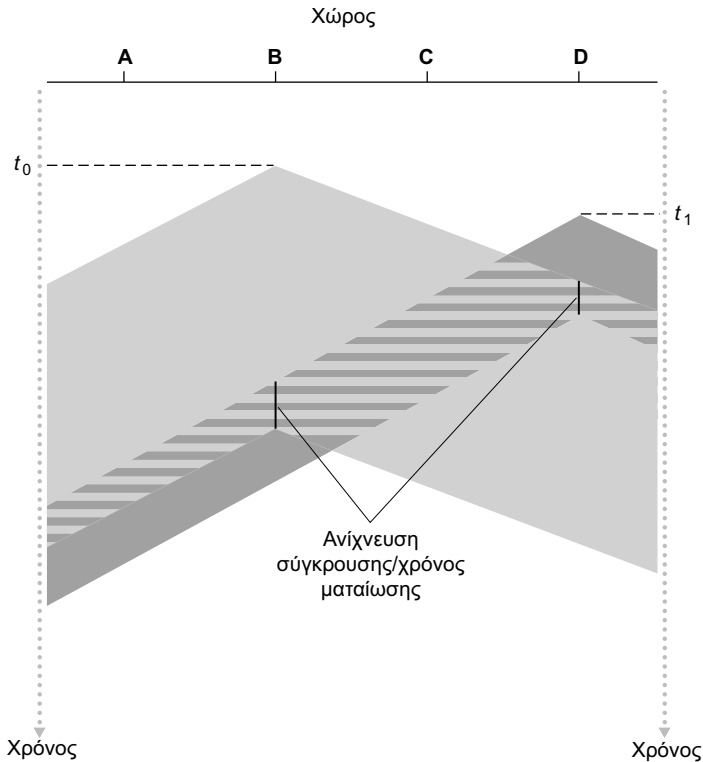


Εικόνα 6.12 ♦ Διάγραμμα χώρου-χρόνου δύο κόμβων CSMA με συγκρουόμενες μεταδόσεις

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο CSMA, ο D αρχίζει επομένως να μεταδίδει το πλαίσιό του. Μετά από λίγο, η μετάδοση του B αρχίζει να αλληλοεπικαλύπτεται με τη μετάδοση του D στον D. Απ' την Εικόνα 6.12, γίνεται εμφανές ότι η από-άκρο-σε-άκρο **καθυστέρηση διάδοσης καναλιού (channel propagation delay)** σ' ένα κανάλι εκπομπής – ο χρόνος που χρειάζεται ένα σήμα για να διαδοθεί από έναν κόμβο σε έναν άλλον – παίζει έναν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της απόδοσής του. Όσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση διάδοσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα ένας κόμβος με ανίχνευση φέροντος να μην είναι ακόμη σε θέση να ανιχνεύσει μία μετάδοση, που έχει ήδη αρχίσει σ' έναν άλλον κόμβο μέσα στο δίκτυο.

Πολλαπλή Προσπέλαση με Ανίχνευση Φέροντος και με Ανίχνευση Συγκρούσεων (CSMA/CD)

Στην Εικόνα 6.12, οι κόμβοι δεν πραγματοποιούν ανίχνευση συγκρούσεων· αμφότεροι οι B και D συνεχίζουν να μεταδίδουν ολόκληρα τα πλαίσιά τους, παρ' όλο που έχει συμβεί σύγκρουση. Όταν ένας κόμβος κάνει ανίχνευση συγκρούσεων, τότε αυτός διακόπτει τη μετάδοση μόλις ανιχνεύσει μία σύγκρουση. Η Εικόνα 6.13 δείχνει το ίδιο σενάριο μ' αυτό της Εικόνας 6.12, με τη διαφορά ότι οι δύο κόμβοι ματαιώνουν αμφότεροι τη μετάδοσή



Εικόνα 6.13 ♦ CSMA με ανίχνευση συγκρούσεων

τους λίγο χρόνο μετά την ανίχνευση μίας σύγκρουσης. Είναι σαφές ότι η προσθήκη ανίχνευσης συγκρούσεων σε ένα πρωτόκολλο πολλαπλής προσπέλασης θα βοηθήσει την απόδοση του πρωτοκόλλου, με το να μη μεταδίδεται στην ολότητά του ένα άχρηστο, χαλασμένο πλαίσιο (απ' την αλληλοεπικάλυψη μ' ένα πλαίσιο άλλου κόμβου).

Πριν αναλύσουμε το πρωτόκολλο CSMA/CD, ας συνοψίσουμε τη λειτουργία του απ' τη σκοπιά ενός προσαρμογέα (σ' έναν κόμβο), συνδεδεμένου σε ένα κανάλι εκπομπής:

1. Ο προσαρμογέας παίρνει ένα δεδομένογράμμα απ' το επίπεδο δικτύου, προετοιμάζει ένα πλαίσιο επιπέδου ζεύξης και το τοποθετεί στον ενταμιευτή του προσαρμογέα.
2. Εάν ο προσαρμογέας ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι αδρανές (δηλ., δεν υπάρχει ενέργεια σήματος, που να εισέρχεται στον προσαρμογέα απ' το κανάλι), αυτός αρχίζει να μεταδίδει το πλαίσιο. Εάν, απ' την άλλη, ο προσαρμογέας ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι απασχολημένο, περιμένει μέχρι να ανιχνεύσει ότι δεν υπάρχει ενέργεια σήματος και μετά αρχίζει να μεταδίδει το πλαίσιο.
3. Ενώσω μεταδίδει, ο προσαρμογέας παρακολουθεί για την παρουσία ενέργειας σήματος, προερχόμενης από άλλους προσαρμογείς που χρησιμοποιούν το κανάλι εκπομπής.