

Πρωτόκολλα επαναμετάδοσης

Μιλτιάδης Αναγνώστου

28 Μαρτίου 2022

Λειτουργίες του επιπέδου ζεύξης

Βασικές λειτουργίες

Σφάλματα και κωδικοποίηση

Επίδραση του θορύβου

Πρωτόκολλα επαναμετάδοσης

Βασικά πρωτόκολλα επαναμετάδοσης

Πρωτόκολλα με κυλιόμενο παράθυρο

Ανάλυση πρωτοκόλλων

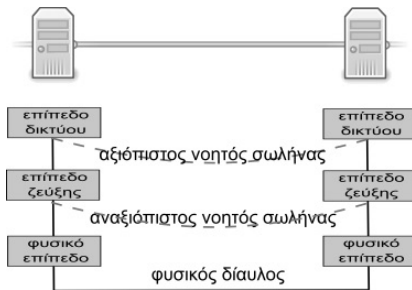
Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις

Ανάλυση διαπερατότητας

Τι κάνει το επίπεδο ζεύξης ή συνδέσμου (μετάδοσης) δεδομένων (data link)

- ▶ Σκοπός του επιπέδου ζεύξης είναι να εξασφαλίσει την αξιόπιστη και αποδοτική μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε δυο μηχανές που συνδέονται απ' ευθείας με μια ζεύξη (2).
- ▶ Οι δυσκολίες που έχει να αντιμετωπίσουν οι μηχανισμοί του επιπέδου ζεύξης (πρωτόκολλα) είναι κυρίως
 - τα λάθη κατά τη μετάδοση,
 - η περιορισμένη χωρητικότητα της ζεύξης,
 - η καθυστέρηση διάδοσης ενός bit από τη μια πλευρά στην άλλη.

Ποια είναι η σχέση του επιπέδου ζεύξης με τα υπόλοιπα επίπεδα



- ▶ Χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες του φυσικού επιπέδου, ήτοι την (ανασφαλή) μεταφορά δεδομένων, και παρέχει ασφαλή μεταφορά.

Λειτουργίες & υπηρεσίες του επιπέδου ζεύξης

Οι βασικές λειτουργίες του επιπέδου ζεύξης είναι

- ▶ να θέσει στη διάθεση του επιπέδου δικτύου μια καλά καθορισμένη διεπαφή,
- ▶ να υλοποιήσει τον έλεγχο σφαλμάτων και
- ▶ να προσαρμόσει την ταχύτητα του αποστολέα δεδομένων στις δυνατότητες του παραλήπτη.

Οι μηχανισμοί του επιπέδου ζεύξης διαχειρίζονται ακολουθίες από bits που ονομάζονται *πλαίσια* (frames).

Επίδραση του θορύβου στη μετάδοση – σφάλματα

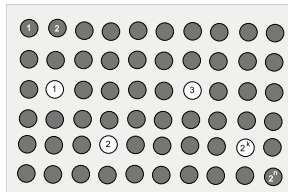
- ▶ Ο θόρυβος είναι ένα ανεπιθύμητο σήμα που προστίθεται στο μεταδιδόμενο σήμα και προκαλεί την αλλοίωσή του στον δέκτη. Στην περίπτωση του ψηφιακού σήματος αλλοιώνονται ορισμένα bits, δηλαδή το 1 εκλαμβάνεται ως 0 και αντίστροφα.
- ▶ Ο τύπος του Shannon $C = B \log_2(1 + S/N)$, όπου B είναι το εύρος ζώνης του μέσου και S/N είναι ο λόγος ισχύων του σήματος προς τον θόρυβο, προσδιορίζει τον ρυθμό μετάδοσης C , που αν δεν παραβιασθεί μπορούμε να εξασφαλίσουμε μετάδοση με αυθαίρετα μικρό ποσοστό λαθών.
- ▶ Για να εφαρμόσουμε το θεώρημα Shannon στην πράξη γνωρίζουμε δυο τρόπους αντιμετώπισης των σφαλμάτων,
 1. τη **διόρθωση** με κώδικες και
 2. την **επαναμετάδοση** (που προϋποθέτει τουλάχιστον κώδικες ανίχνευσης σφαλμάτων).

Κωδικοποίηση

- ▶ Η διόρθωση λαθών μέσω κωδίκων βασίζεται στον πλεονασμό, όπως π.χ. αν σε μια λέξη της φυσικής γλώσσας αλλοιωθούν λίγα γράμματα συνήθως είμαστε σε θέση να την μαντέψουμε.
- ▶ Η κωδικοποίηση βασίζεται στην αύξηση του αριθμού των bits του μηνύματος, όπου η τελική αυξημένου μήκους ακολουθία προκύπτει με μοναδικό τρόπο από την αρχική.
- ▶ Αν συμβούν σφάλματα παράγονται ακολουθίες που δεν προβλέπονται από την παραπάνω διαδικασία.

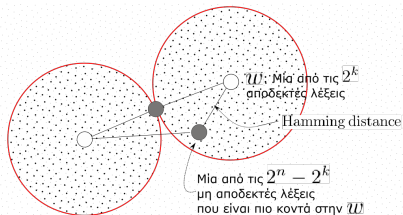
Κωδικοποίηση κατά τμήματα (block codes)

- ▶ Στην κωδικοποίηση κατά τμήματα μήκους k , για κάθε τμήμα παράγεται ένα νέο τμήμα μήκους n ($n > k$). Τα πρόσθετα $r = n - k$ bits λέγονται bits ελέγχου και προκύπτουν από συνδυασμό των προηγούμενων k .
- ▶ Έτσι από ένα σύνολο με αρχικά 2^k δυνατές «λέξεις» παίρνουμε 2^n δυνατές λέξεις (μήκους n). Από αυτές μόνο οι 2^k είναι οι αποδεκτές «κωδικές λέξεις», δηλ. ποσοστό $2^k / 2^n = 1 / 2^{n-k}$.



Διαδικασία ανίχνευσης ή διόρθωσης

- ▶ Αν συμβούν σφάλματα, η νέα λέξη θα πέσει με μεγάλη πιθανότητα σε μια από τις $2^n - 2^k$ μη αποδεκτές λέξεις και θα ανιχνευθεί ως εσφαλμένη.
- ▶ Η λαμβανόμενη λέξη θα «διορθωθεί» στην πιο κοντινή σωστή λέξη.
- ▶ Αν μια λέξη πέσει εξ ίσου κοντά σε δύο λέξεις του κώδικα θεωρείται ότι αντιστοιχεί μόνο σε ανίχνευση λάθους.



Πιο ισχυρή ανίχνευση ή διόρθωση;

- ▶ Ένας κώδικας με k αρχικά bits και $n - k$ επιπρόσθετα bits για τον έλεγχο σφαλμάτων έχει μια εγγυημένη ανιχνευτική ικανότητα d , δηλαδή μπορεί πάντοτε να ανιχνεύει την ύπαρξη λαθών όταν το πλήθος τους είναι το πολύ d , και μια εγγυημένη διορθωτική ικανότητα c , δηλαδή μπορεί να διορθώνει όλα τα λάθη όταν είναι το πολύ c .
- ▶ Προφανώς $c \leq d$.
- ▶ Για συγκεκριμένο ζεύγος (k, n) μπορεί κανείς να αυξήσει την ανιχνευτική ικανότητα θυσιάζοντας διορθωτική και αντιστρόφως.
- ▶ Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν υπάρχει δυνατότητα επαναμετάδοσης (π.χ. σε "Δ, σε διαστημικές επικοινωνίες).

Διόρθωση μαζί με επαναμετάδοση;

- ▶ Για να γίνει επαναμετάδοση χρειάζεται οπωσδήποτε ένας κώδικας με ανιχνευτική τουλάχιστον ικανότητα.
- ▶ Αν $c < d$ και συμβούν e σφάλματα,
 - ▶ θα γίνει διόρθωση χωρίς επαναμετάδοση αν $e \leq c$,
 - ▶ θα γίνει επαναμετάδοση αν $c < e \leq d$ και
 - ▶ αν $d < e$, η διάγνωση που θα βγάλει η αποκωδικοποίηση είναι αβέβαιη (π.χ. μπορεί να διαπιστωθεί ανάγκη για επαναμετάδοση ή, σπανιότερα, να καταλήξει σε λανθασμένη διόρθωση χωρίς επαναμετάδοση).
- ▶ Για δεδομένο (k, n) ένας κώδικας με μεγαλύτερη διορθωτική ικανότητα περιορίζει τις επαναμεταδόσεις, ανεβάζει όμως τον τελικό ρυθμό (διαφευγόντων) σφαλμάτων επειδή κατεβάζει την ανιχνευτική ικανότητα.

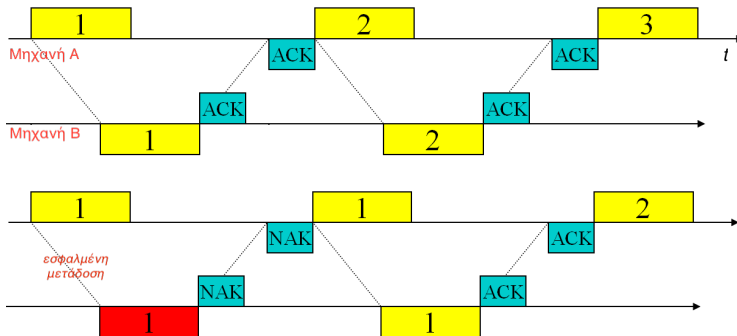
Επαναμετάδοση: Ερωτήματα και σχεδ. επιλογές, I

1. Ποια πλαίσια θα επαναμεταδίδονται; Αυτά που έφτασαν με λάθη ή και άλλα;
2. Ποια πλαίσια θα γίνονται δεκτά από τον παραλήπτη; Μόνο όσα είναι «σωστά» ή όχι;
3. Τα πλαίσια στα οποία έχουν ανιχνευθεί σφάλματα και έχουν προκαλέσει επαναμετάδοση μπορούν να αξιοποιηθούν για να συμβάλουν στην αποκωδικοποίηση του επόμενου αντιγράφου τους;
4. Θα έχουμε αρίθμηση στα πλαίσια και, αν ναι, bits θα διαθέσουμε;
5. Μήπως είναι καλό να γίνονται προκαταβολικές επαναμεταδόσεις όταν το κανάλι είναι σε αργία;

Επαναμετάδοση: Ερωτήματα και σχεδ. επιλογές, II

6. Πόσες φορές θα επαναλάβουμε τη μετάδοση ενός πλαισίου που συνεχίζει να παρουσιάζει λάθη; Πότε θα εγκαταλείψουμε;
7. Θα χρησιμοποιήσουμε εξειδικευμένα πλαίσια απάντησης ή θα ενσωματώνουμε τις απαντήσεις στα πλαίσια της αντίστροφης κίνησης;
8. Θα στέλνουμε απαντήσεις για κάθε πλαίσιο ή θα κάνουμε και ομαδικές επαληθεύσεις;
9. Δουλεύει ορθά το πρωτόκολλο επαναμετάδοσης;
10. Πόσο πολύπλοκο πρωτόκολλο αντέχουμε να «τρέξουμε»;
11. Σε ποιο επίπεδο θα υιοθετηθεί επαναμετάδοση; Μήπως να κάνουμε έλεγχο μόνο στα άκρα (end-to-end); (Βλ. και Κεφ. 3, Kurose-Ross (1))
12. Αν κάνουμε διόρθωση σφαλμάτων & επαναμετάδοση στο επίπεδο ζεύξης, χρειάζεται να κάνουμε και στο επίπεδο μεταφοράς; Αντίστροφα;

Πρωτόκολλο Stop-and-Wait



- ▶ Εναλλακτικά αντί της απάντησης μπορεί να υπάρχει προθεσμία.
- ▶ Ποια είναι η ελάχιστη δυνατή αρίθμηση;

Αρίθμηση πλαισίων και «παράθυρα»

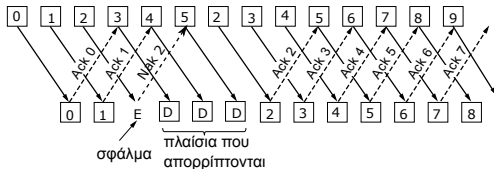
- ▶ Συνήθως σε ένα πλαίσιο ορίζεται ένα πεδίο μήκους b bits για την αρίθμηση των πλαισίων. Αυτό επιτρέπει την αρίθμηση 2^b πλαισίων (από 0 ως $2^b - 1$).
- ▶ Ωστόσο μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει μόνο τους πρώτους N αριθμούς $0, \dots, M - 1$, όπου $1 \leq M \leq 2^b$.
- ▶ Η πλευρά αποστολής πλαισίων διατηρεί ανά πάσα στιγμή ένα υποσύνολο του $\{0, 1, \dots, M - 1\}$ και επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει ένα εξ αυτών (συνήθως τον «μικρότερο» κυκλικά) για να στείλει το επόμενο (νέο) πλαίσιο. Αυτό λέγεται *παράθυρο αποστολής* (sending window) και το «μήκος» του παραθύρου είναι ο μέγιστος πληθικός αριθμός του υποσυνόλου.
- ▶ Η πλευρά λήψης διατηρεί επίσης ένα υποσύνολο του $\{0, 1, \dots, M\}$ και δέχεται ένα πλαίσιο μόνον εφόσον ανήκει σ' αυτό το υποσύνολο. Αυτό λέγεται *παράθυρο λήψης* (receiving window).

Πρωτόκολλο Go-Back-N με ACK/NAK



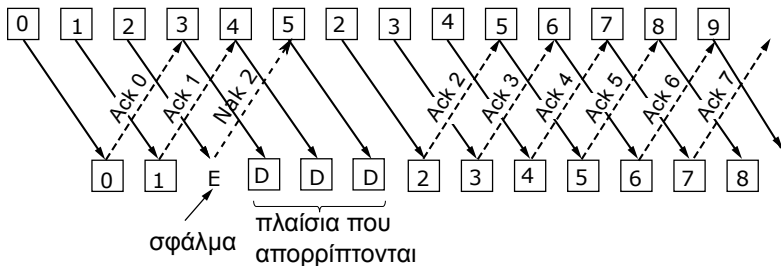
- ▶ Στο παράδειγμα του σχήματος φαίνεται η εξέλιξη ενός πρωτοκόλλου Go-Back-N.
- ▶ Ο αποστολέας επιστρέφει στο πλαίσιο που μεταδόθηκε εσφαλμένα επαναμεταδίδοντας το ίδιο και τα επόμενά του που είχε ήδη στείλει. Λόγω της καθυστέρησης μέχρι να φτάσει η απάντηση ισχύει $N = 3$.
- ▶ Ο παραλήπτης μετά από ένα εσφαλμένο πλαίσιο καταστρέφει και τα επόμενά του μέχρι να παραλάβει σωστά το εσφαλμένο.

Άσκηση: Παράθυρα στο πρωτόκολλο Go-Back-N

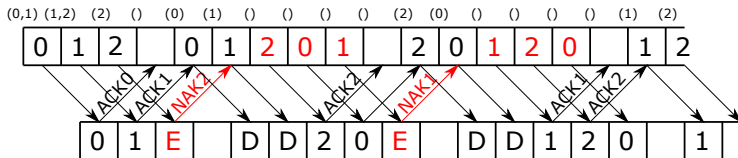


- ▶ Στο παράδειγμα του σχήματος έστω $M = 16$.
- ▶ Το παράθυρο αποστολής έστω ότι έχει μήκος 10, δηλαδή ο αποστολέας θα χρησιμοποιήσει τον πρώτο (κυκλικά) από τους δέκα το πολύ διαθέσιμους αριθμούς.
- ▶ Το μήκος για το παράθυρο παραλαβής έχει ορισθεί ίσο με 1.
- ▶ Να καταγράψετε το παράθυρο αποστολής και λήψης πριν και μετά την αποστολή κάθε πακέτου και το παράθυρο λήψης πριν και μετά την λήψη κάθε πακέτου.

Άσκηση: Παράθυρα στο πρωτόκολλο Go-Back-N

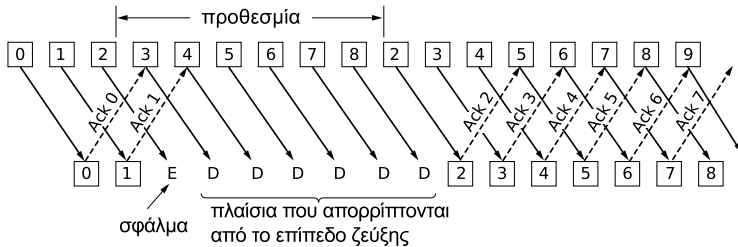


Παράδειγμα: Παράθυρα στο πρωτόκολλο Go-Back-N



- ▶ Στο παράδειγμα του σχήματος έστω $M = 3$, δηλ. τα πλαίσια αριθμούνται μέσα από το σύνολο $\{0, 1, \dots, 2\}$.
- ▶ Το παράθυρο αποστολής έστω ότι έχει μήκος 2.

Παραλλαγή: Πρωτόκολλο Go-Back-N με προθεσμία

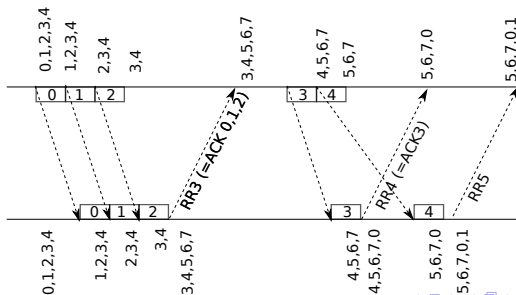


Πρωτόκολλο επιλεκτικής επαναμετάδοσης (Selective Repeat)



Πρωτόκολλα με επωμισμό και κυλιόμενο παράθυρο

- ▶ Σε σχετικά ισορροπημένη αμφίδρομη επικοινωνία πληροφορίας μια επιλογή είναι να φορτώνονται οι απαντήσεις στα πακέτα της αντίθετης κατεύθυνσης («επωμισμός», piggybacking).
- ▶ Παράδειγμα: Κυλιόμενο παράθυρο μήκους 5 με αρίθμηση τριών bits



Απαιτήσεις από το πρωτόκολλο

- ▶ Για κάθε πρωτόκολλο καθορίζουμε απαιτήσεις και προσπαθούμε να διαπιστώσουμε αν ικανοποιούνται.
- ▶ Οι ιδιότητες ενός πρωτοκόλλου και οι αντίστοιχες απαιτήσεις, προδιαγραφές κ.λπ. διακρίνονται (κατά κανόνα) σε δύο ευρείες κατηγορίες:
 - *Λειτουργικές ιδιότητες*: Έχουν να κάνουν με το πώς λειτουργεί το πρωτόκολλο προκειμένου να επιτύχει τους πρωτεύοντες στόχους του, π.χ. αν υπάρχουν ακολουθίες εισόδου και εξωτερικές συνθήκες κάτω από τις οποίες το σύστημα παύει να λειτουργεί.
 - *Επιδόσεις*: Περιγράφουν πόσο γρήγορα, αποδοτικά κ.λπ. επιτυγχάνει τους στόχους του.
- ▶ Οι δύο κατηγορίες ιδιοτήτων εξετάζονται με διαφορετικές μεθόδους και διαφορετικά εργαλεία.

Απαιτήσεις από το πρωτόκολλο

Απαιτήσεις επίδοσης

- Διαπερατότητα
- Καθυστέρηση
- Ρυθμός σφαλμάτων
- Ουρά

Εργαλεία:

- Θεωρία αναμονής
- Προσομοίωση

Λειτουργικές απαιτήσεις

- Ορθότητα
- Αντοχή

Εργαλεία:

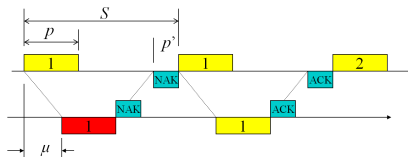
- Αυτόματα
- Λογισμοί διεργασιών
- Αλγόριθμοι
- Γραφοθεωρία

Πρωτόκολλα επαναμετάδοσης: Δείκτες επίδοσης

- ▶ Διαπερατότητα: Ποσοστό του χρόνου που αξιοποιείται το κανάλι.
- ▶ Καθυστέρηση: Μέσος συνολικός χρόνος παράδοσης ενός πακέτου.
- ▶ Ουρά: Αριθμός πακέτων που συσσωρεύονται προς μετάδοση.
- ▶ Τελικός ρυθμός σφαλμάτων (που δεν διορθώνονται).

Ποιόν ενδιαφέρει καθένας από τους παραπάνω δείκτες;

Stop and Wait: Παράμετροι εμπλεκόμενες στην εκτίμηση της επίδοσης



$p = (\text{μήκος πακέτου σε bits}) / (\text{ταχύτητα μετάδοσης καναλιού σε bps})$

$p' = (\text{μήκος επιβεβαίωσης}) / (\text{ταχύτητα μετάδοσης καναλιού σε bps})$

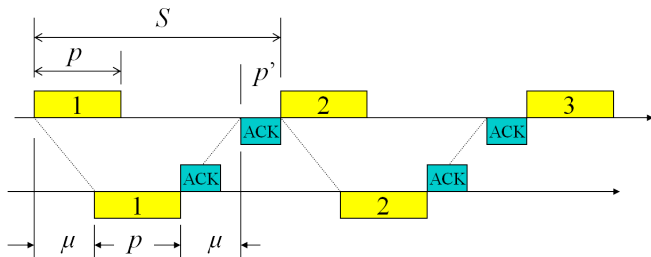
$\mu = \text{χρόνος διάδοσης από τον πομπό στο δέκτη} =$

$= (\text{απόσταση πομπού δέκτη}) / (\text{ταχ. διάδοσης } v \text{ στο μέσο})^1$

$S = \text{ελάχιστο χρονικό διάστημα μέχρι την επόμενη εκπομπή}$

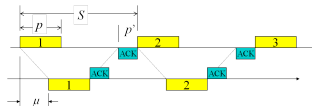
¹ $v = c/n$, όπου c η ταχ. φωτός στο κενό και n ο δείκτης διάθλασης του μέσου.

Stop and Wait: Απόδοση (διαπερατότητα) χωρίς σφάλματα



$$\eta = \frac{p}{S} = \frac{p}{2\mu + p + p'}$$

Παράδειγμα 1: Stop and Wait, διαπερατότητα χωρίς σφάλματα



Π.χ. για απόσταση 100 km, ασύρματη μετάδοση, ταχύτητα μετάδοσης 56 kbps, πακέτα μήκους 1000 bits, επιβεβαίωση 48 bits:

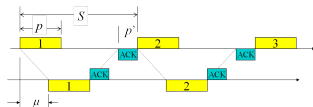
$$p = 1000 / (56 \times 10^3) = 17.86 \text{ msec}$$

$$p' = 48 / (56 \times 10^3) = 0.857 \text{ msec}$$

$$\mu = 100 \times 10^3 / (3 \times 10^8) = 0.33 \text{ msec}$$

$$\eta = \frac{p}{S} = \frac{p}{2\mu + p + p'} = 0.92 = 92\%$$

Παράδειγμα 2: Stop and Wait, διαπερατότητα χωρίς σφάλματα



Απόσταση 1 km, ασύρματη μετάδοση, ταχύτητα μετάδοσης 1 Gbps, πακέτα μήκους 1000 bits, επιβεβαίωση 48 bits:

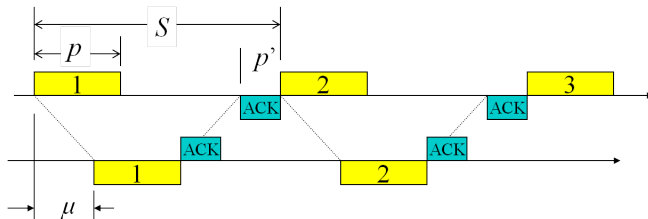
$$p = 1000/10^9 = 1 \mu\text{sec}$$

$$p' = 48/10^9 = 0.048 \mu\text{sec}$$

$$\mu = 10^3 / (3 \times 10^8) = 3.3 \mu\text{sec}$$

$$\eta = \frac{p}{S} = \frac{p}{2\mu + p + p'} = 0.13 = 13\%$$

Stop and Wait: Διαπερατότητα με σφάλματα



$$\eta_{sw} = \frac{p}{(\bar{N} + 1)s} = \frac{p}{(\bar{N} + 1)(2\mu + p + p')}$$

όπου \bar{N} είναι ο μέσος αριθμός εσφαλμένων μεταδόσεων ενός πακέτου.

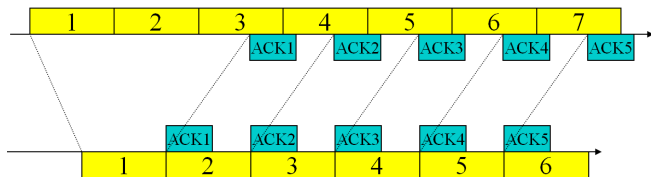
Πώς υπολογίζεται το μέσο πλήθος εσφαλμένων μεταδόσεων

Αν υποτεθούν ανεξάρτητα σφάλματα με πιθαν. e ανά μετάδοση:

$$\Pr\{N = k\} = (1 - e)e^k \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\bar{N} = \sum_{k=0}^{\infty} k \Pr\{N = k\} = \sum_{k=0}^{\infty} k(1 - e)e^k = \frac{e}{1 - e}$$

Go-Back-N, Selective Repeat: Επίδοση χωρίς σφάλματα.



$$\eta = 1$$

Go-Back-N: Επίδοση με σφάλματα.

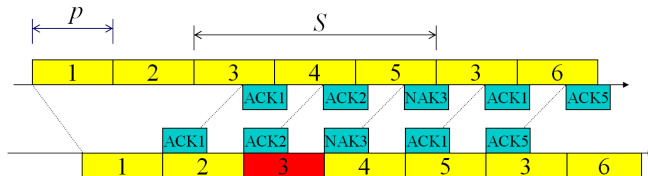


$$\eta_{\text{GBN}} = \frac{p}{\overline{N}S + p}$$

$$\eta_{\text{GBN}} > \eta_{\text{SW}} = \frac{p}{(\overline{N} + 1)S}$$

Selective Repeat: Επίδοση με σφάλματα ...

(... και μεγάλο παράθυρο)



$$\eta_{SR} = \frac{p}{Np + p} = \frac{1}{N + 1}$$

$$\eta_{SR} > \eta_{GBN} = \frac{p}{NS + p}$$

Βιβλιογραφία



Kurose, James F και Ross, Keith W. *Computer networking: a top-down approach*. Addison Wesley, 2016.



Tanenbaum, A.S. και Wetherall, D. *Computer Networks*. Pearson Prentice Hall, 2011.

Τελευταία ενημέρωση: 24 Μαρτίου 2022, 17:07