

Το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων

Μιλτιάδης Αναγνώστου

3 Απριλίου 2015

1/40

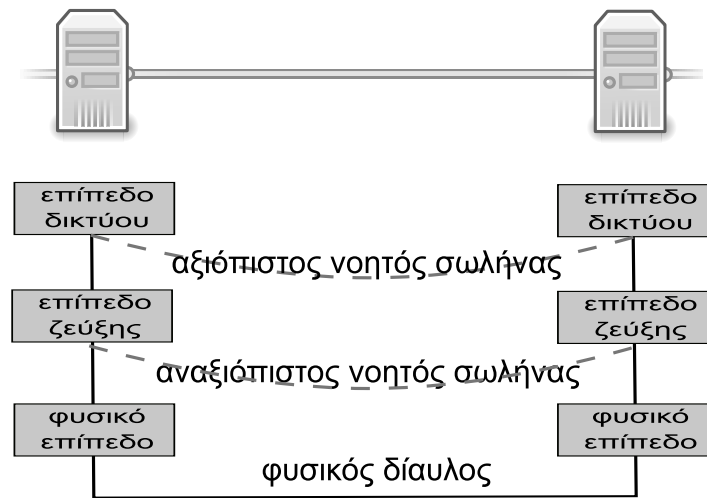
Λειτουργίες του επιπέδου ζεύξης
Βασικές λειτουργίες
Ανίχνευση πλαισίων

Σφάλματα και κωδικοποίηση
Επίδραση του θορύβου
Παραδείγματα

Πρωτόκολλα επαναμετάδοσης
Περιγραφή των πρωτοκόλλων
Πρωτόκολλα με κυλιόμενο παράθυρο
Επιδόσεις πρωτοκόλλων επαναμετάδοσης

2/40

Τι κάνει το επίπεδο ζεύξης ή συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων



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

3/40

Λειτουργίες & υπηρεσίες του επιπέδου ζεύξης

Οι βασικές λειτουργίες του επιπέδου ζεύξης είναι

- έλεγχος σφαλμάτων,
- δημιουργία πλαισίων,
- έλεγχος ροής

Το επίπεδο ζεύξης μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες των εξής κατηγοριών:

- Υπηρεσίες ασυνδειστρεφείς και χωρίς επιβεβαιώσεις (unacknowledged connectionless),
- υπηρεσίες ασυνδειστρεφείς, αλλά με επιβεβαιώσεις (acknowledged connectionless),
- υπηρεσίες συνδειστρεφείς και με επιβεβαιώσεις (acknowledged connection oriented)

Σε ποιο επίπεδο είναι σκόπιμο να γίνεται η διόρθωση;

4/40

Υπηρεσίες συνδεδειστροφείς με επιβεβαιώσεις

- ▶ Πηγή και προορισμός εγκαθιστούν μια σύνδεση πριν μεταδοθούν δεδομένα.
- ▶ Τα πλαίσια είναι αριθμημένα. Υπάρχει εγγύηση ότι φτάνουν όλα και με τη σωστή σειρά και μόνο μια φορά το καθένα.
- ▶ Με δυο λόγια η υπηρεσία αυτή παρέχει στο επίπεδο δικτύου ένα αξιόπιστο ρεύμα δεδομένων.

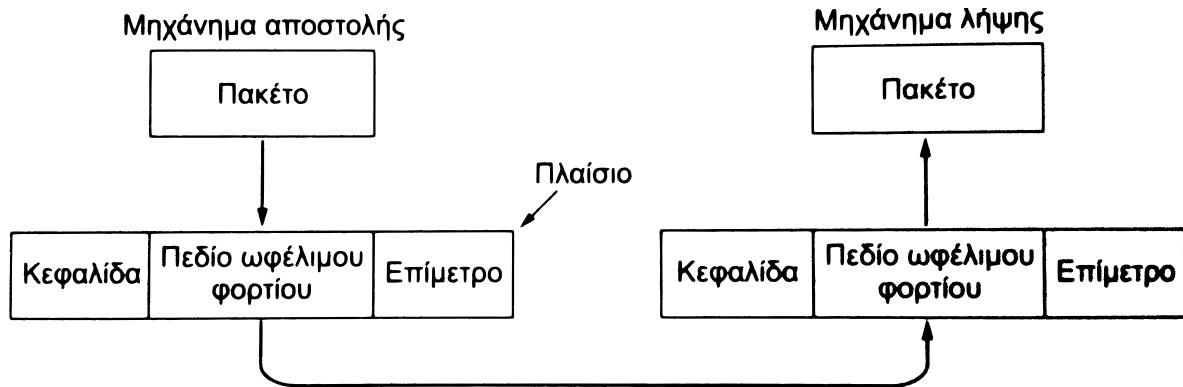
5/40

Πλαισίωση

- ▶ Το αρχικό ρεύμα από bits διασπάται σε κομμάτια, που τοποθετούνται σε πλαίσια.
- ▶ Τα πλαίσια εξυπηρετούν και τον σκοπό του ελέγχου λαθών με εισαγωγή επιπρόσθετων bits ελέγχου.

6/40

Σχέση μεταξύ πακέτων (επιπέδου δικτύου) και πλαισίων (επιπέδου ζεύξης)



7/40

Εντοπισμός των ορίων των πλαισίων

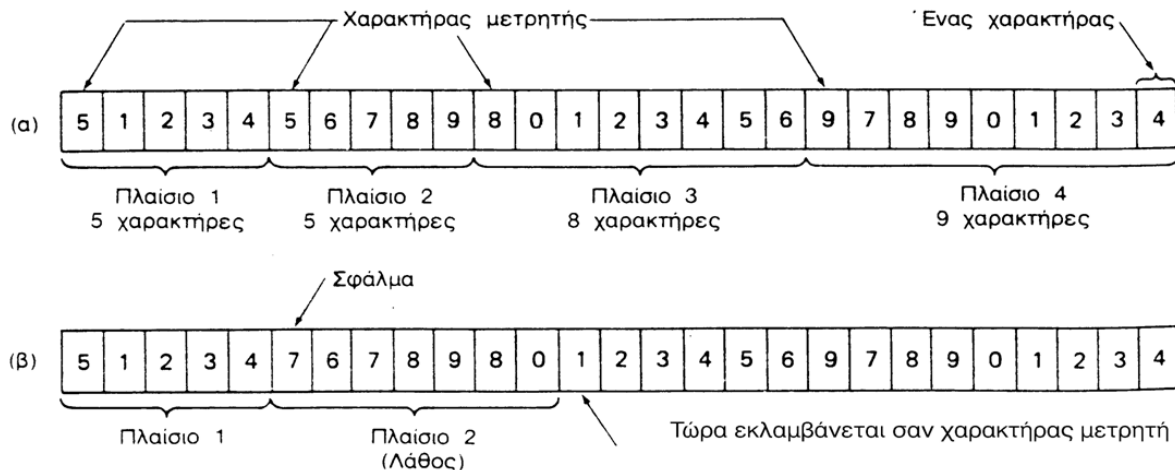
Για να ξεχωρίζουμε πού αρχίζει και πού τελειώνει ένα πλαίσιο χρησιμοποιούμε μια από τις ακόλουθες μεθόδους:

- ▶ Μέτρηση χαρακτήρων
- ▶ Χαρακτήρες αρχής και τέλους με παραγέμισμα χαρακτήρων
- ▶ Σημαίες αρχής και τέλους με παραγέμισμα με bits.
- ▶ Παραβιάσεις της κωδικοποίησης του φυσικού στρώματος.

8/40

Ανίχνευση πλαισίων με μέτρηση χαρακτήρων

Η μέτρηση χαρακτήρων βασίζεται στην ύπαρξη ενός δείκτη στην αρχή ενός πλαισίου, που δείχνει πόσοι χαρακτήρες ακολουθούν. Αν καταστραφεί χάνεται ο συγχρονισμός, π.χ.:



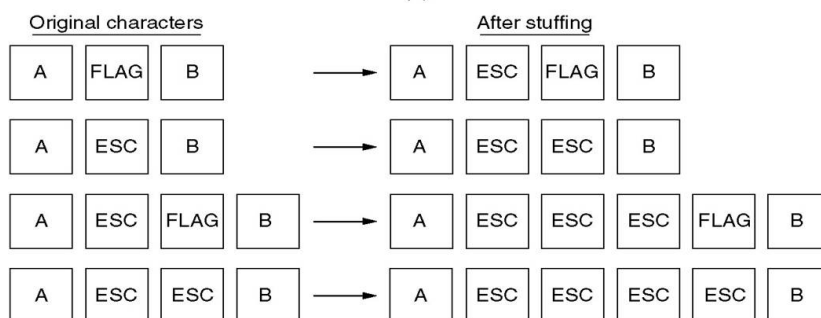
9/40

Ανίχνευση πλαισίων σε character oriented πρωτόκολλα με χρήση του χαρακτήρα FLAG

- Βασίζεται στην ύπαρξη ενός ειδικού χαρακτήρα στην αρχή και στο τέλος ενός πλαισίου.
- Ακολουθίες από bits στο τμήμα των δεδομένων που κατά τύχη μοιάζουν με FLAG επισημαίνονται με την πρόθεση ενός χαρακτήρα ESC.



(a)

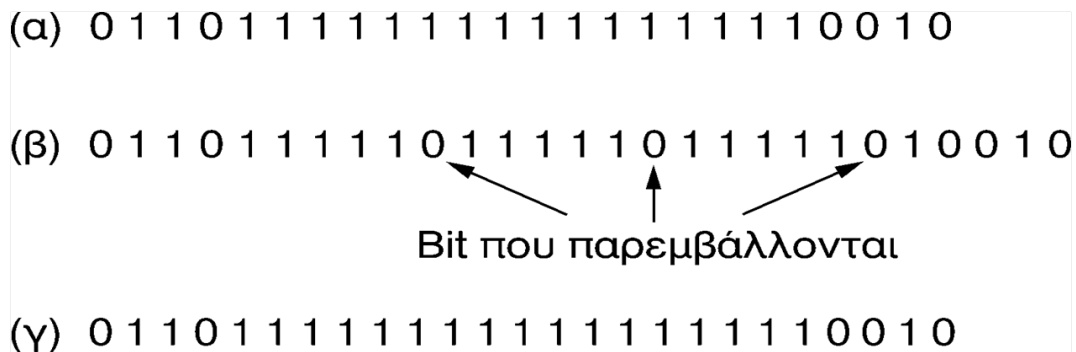


(b)

10/40

Ανίχνευση πλαισίων σε bit oriented πρωτόκολλα με χρήση σημαίας

- ▶ Βασίζεται στην ύπαρξη μιας ειδικής ακολουθίας από bits στην αρχή και στο τέλος ενός πλαισίου: 01111110
- ▶ Σε ακολουθίες από bits δεδομένων που κατά τύχη περιέχουν πέντε «1» στη σειρά προστίθεται κατόπιν ένα «0».



11/40

Εκμετάλλευση της κωδικοποίησης του φυσικού στρώματος

- ▶ Χρησιμοποιείται μόνο όταν η κωδικοποίηση στο φυσικό στρώμα έχει κάποιο πλεονασμό.
- ▶ Π.χ. όταν το φυσικό στρώμα χρησιμοποιεί κωδικοποίηση δύο παλμούς ανά bit, π.χ. υψηλό-χαμηλό για το «1» και χαμηλό-υψηλό για το «0», μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συνδυασμοί υ-υ ή χ-χ για την αρχή ή το τέλος ενός πλαισίου.

12/40

Επίδραση του θορύβου στη μετάδοση

- ▶ 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 βιτς, 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 το (θερμικό) θόρυβο, προσδιορίζει τον ρυθμό μετάδοσης C , που αν δεν παραβιασθεί μπορούμε να εξασφαλίσουμε μετάδοση με αυθαίρετα μικρό ποσοστό λαθών.
- ▶ Το θεώρημα Shannon δεν εξηγεί πώς η παραπάνω ποιότητα μετάδοσης θα επιτευχθεί, αλλά σήμερα γνωρίζουμε δυο τρόπους αντιμετώπισης των σφαλμάτων, τη διόρθωση με κώδικες και την αναμετάδοση (αφού χρησιμοποιηθούν κώδικες ανίχνευσης σφαλμάτων).

13/40

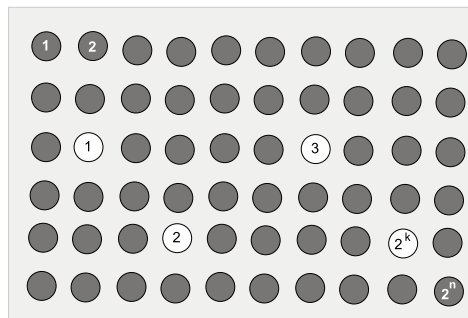
Κωδικοποίηση

- ▶ 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.

14/40

Κωδικοποίηση κατά τμήματα (block codes)

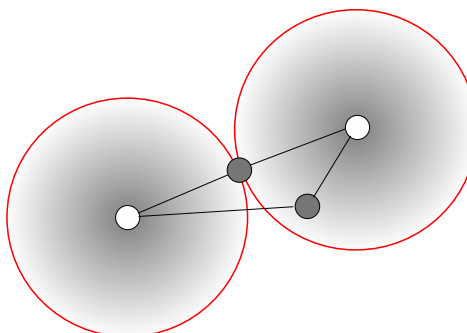
- ▶ Στην κωδικοποίηση κατά τμήματα μήκους k , για κάθε τμήμα παράγεται ένα νέο τμήμα μήκους n ($n > k$). Τα πρόσθετα $r = n - k$ bits λέγονται bits ελέγχου και προκύπτουν από συνδυασμό των προηγούμενων k .
- ▶ Έτσι από ένα σύνολο με αρχικά 2^k δυνατές «λέξεις» παίρνουμε 2^n δυνατές λέξεις (μήκους n).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



15/40

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 εσφαλμένη λέξη θα «διορθωθεί» στην πιο κοντινή σωστή λέξη.



16/40

Παράδειγμα 1: Ανίχνευση λαθών με bits ισοτιμίας

- ▶ Η δυνατότητα ενός κώδικα για ανίχνευση λαθών είναι μεγαλύτερη από τη δυνατότητα διόρθωσης.
- ▶ Αντί για k bits στέλνουμε $k + 1$ bits, όπου το τελευταίο bit προκύπτει από την δυαδική πρόσθεση των προηγούμενων, π.χ. αντί για 00101 στέλνουμε 001010 και αντί για 10011 στέλνουμε 100111.
- ▶ Αν συμβεί μόνο ένα λάθος (ή περιττό πλήθος) έχουμε ανίχνευση.

17/40

Παράδειγμα 2: Διόρθωση λαθών με τετραγωνικό κώδικα

- ▶ Έστω $k = 9$. Μπορούμε να υλοποιήσουμε ένα κώδικα με $r = 6$, δηλαδή αντί του $abcdefghi$ να μεταδοθεί $abcdefghijlmno$, όπου $j = a + b + c$, $k = d + e + f$, κλπ. δηλαδή

a	b	c	j
d	e	f	k
g	h	i	l
m	n	o	

- ▶ Ανιχνεύεται σίγουρα το πολύ ένα λάθος.

Σημείωση: Στην πράξη τέτοιοι κώδικες δεν χρησιμοποιούνται επειδή είναι πολύ χαμηλών επιδόσεων. Εδώ αυτός ο κώδικας παρατίθεται μόνο για διδακτικούς λόγους.

18/40

Επαναμετάδοση: Ερωτήματα και σχεδ. επιλογές, σελ. I

1. Ποια πλαίσια θα ξαναμεταδίδονται; Αυτά που έφτασαν με λάθη ή και άλλα;
2. Ποια πλαίσια θα γίνονται δεκτά από τον παραλήπτη; Όλα όσα είναι «σωστά» ή όχι;
3. Θα έχουμε αρίθμηση στα πλαίσια και τι είδους;
4. Είναι καλό να γίνονται προκαταβολικές επαναμεταδόσεις (δηλαδή επαναμεταδόσεις πριν ο αποστολέας μάθει ότι έγινε σφάλμα);
5. Πόσες φορές θα επαναλάβουμε τη μετάδοση ενός δεδομένου πλαισίου; Πότε θα καταφύγουμε σε άλλη λύση;
6. Πόσο σίγουροι μπορούμε να είμαστε ότι θα δουλέψει σωστά ένα πολύπλοκο πρωτόκολλο επαναμετάδοσης;

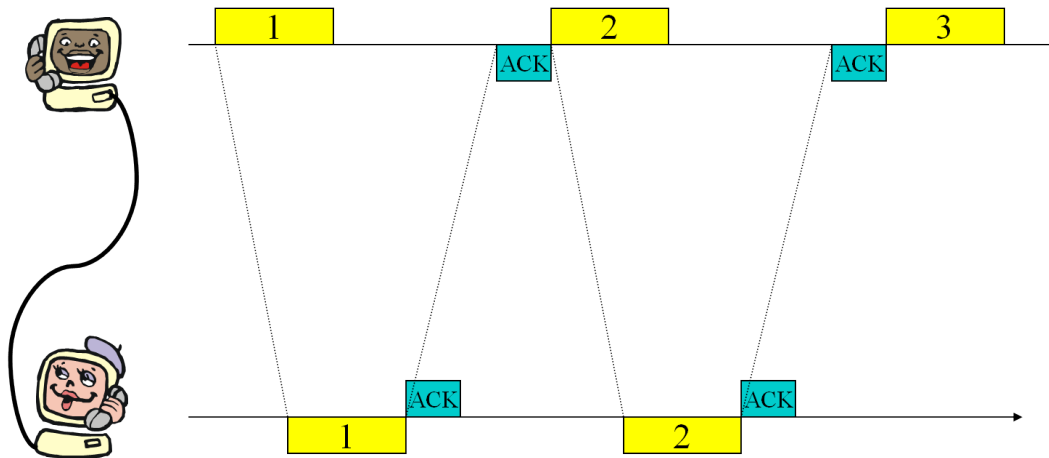
19/40

Επαναμετάδοση: Ερωτήματα και σχεδ. επιλογές, σελ. II

7. Πόσο πολύπλοκο πρωτόκολλο μπορούμε να «τρέξουμε» πάνω στο υλικό (hardware) μας; Πόσος χρόνος είναι ανεκτός για την εκτέλεση του πρωτοκόλλου;
8. Τι υλικό απαιτείται για την υποστήριξη ενός πρωτοκόλλου; Πόσο υλικό είμαστε διατεθειμένοι να ξοδέψουμε;

20/40

Πρωτόκολλο Stop-and-Wait: Μετάδοση χωρίς σφάλματα

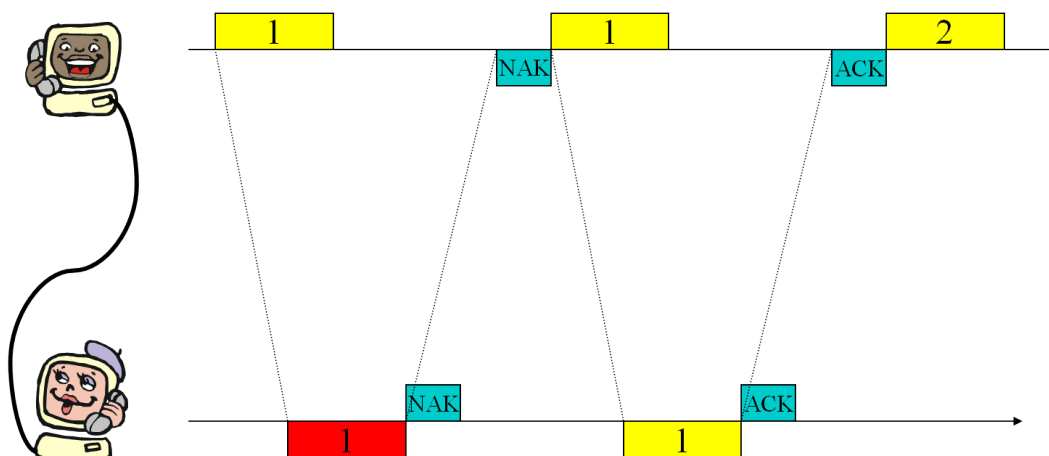


Είναι χρήσιμο ένα τέτοιο πρωτόκολλο όταν δεν γίνονται σφάλματα μετάδοσης;

21/40

Πρωτόκολλο Stop-and-Wait: Μη επιτυχής μετάδοση

Πρωτόκολλο με θετικές και αρνητικές απαντήσεις και αρίθμηση:



Παραλλαγές: Αν βάλουμε προθεσμία και μόνο θετικές απαντήσεις και παραλείψουμε την αρίθμηση είναι OK; Τι αρίθμηση χρειαζόμαστε;

22/40

[illegible]

Περιεχόμενα

Λειτουργίες του επιπέδου ζεύξης

Σφάλματα και κωδικοποίηση

Πρωτόκολλα επαναμετάδοσης

The diagram illustrates the Stop-and-Wait protocol. It shows a sequence of events between a sender and a receiver:

- The sender transmits packet 1.
- The receiver receives packet 1 and sends back a NAK (Negative Acknowledgment).
- The sender resends packet 1.
- The receiver receives packet 1 again and sends back an ACK (Acknowledgment).
- The sender then transmits packet 2.
- The receiver receives packet 2 and sends back an ACK.
- The sender then transmits packet 3.
- The receiver receives packet 3 and sends back an ACK.

The process ends with the sender having successfully transmitted all three packets.

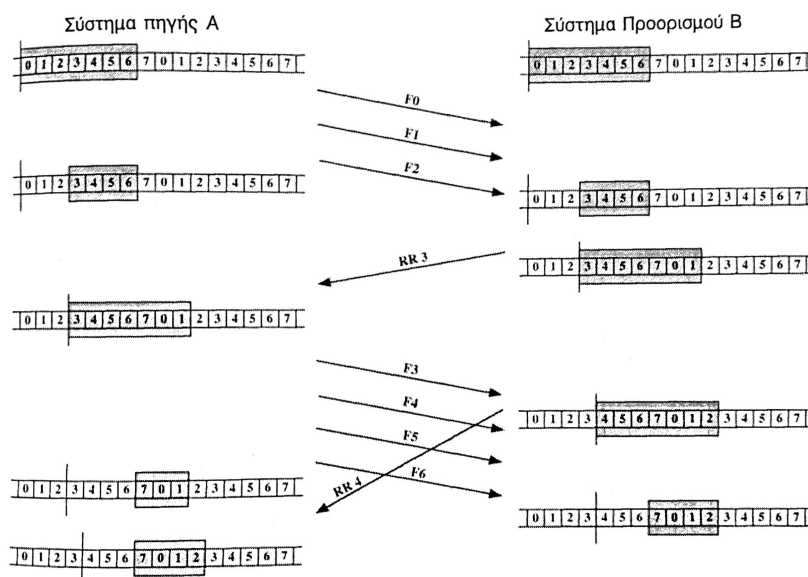
24/40

Πρωτόκολλα με κυλιόμενο παράθυρο

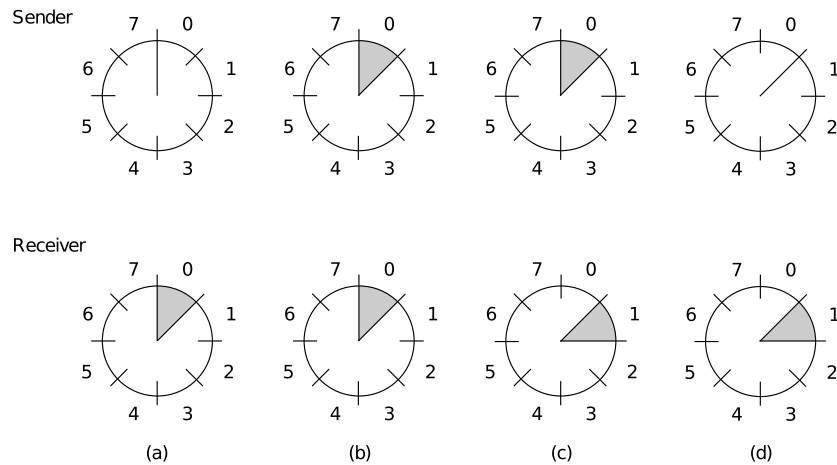
- ▶ Σε σχετικά ισορροπημένη αμφίδρομη επικοινωνία πληροφορίας μια επιλογή είναι να φορτώνονται οι απαντήσεις στα πακέτα της αντίθετης κατεύθυνσης (επωμισμός, piggybacking).
- ▶ Στα πρωτόκολλα κυλιόμενου παραθύρου συντηρούν ο κάθε αποστολέας πλαισίων συντηρεί μια συλλογή αριθμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πακέτα προς μετάδοση (παράθυρο αποστολής).
- ▶ Ομοίως ο αποδέκτης συντηρεί μια ακολουθία αριθμών που όταν φέρονται από εισερχόμενα πακέτα μπορούν να γίνουν δεκτά (παράθυρο παραλαβής).

25/40

Παράδειγμα 1: Κυλιόμενο παράθυρο μήκους 7



Παράδειγμα 2: Κυλιόμενο παράθυρο μήκους 1

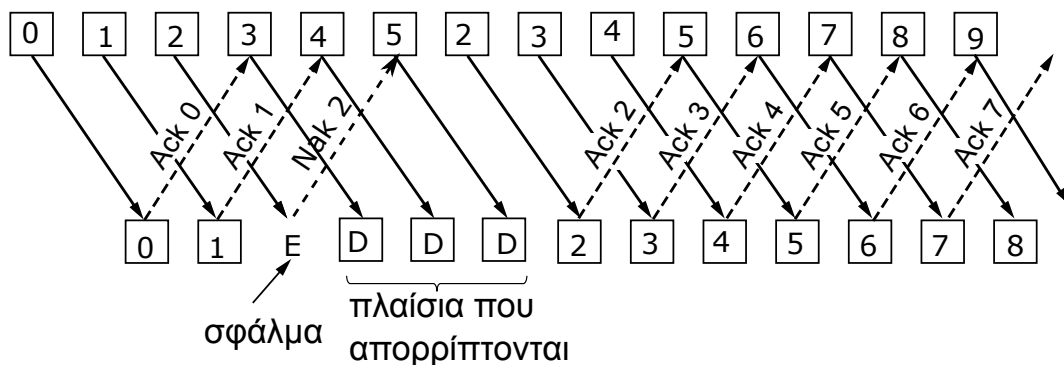


Κυλιόμενο παράθυρο μεγέθους 1 με αριθμούς τριών bit:

- (a) Αρχική κατάσταση.
- (b) Μετά τη αναχώρηση του πρώτου πλαισίου.
- (c) Μετά την άφιξη του πρώτου πλαισίου.
- (d) Μετά την παραλαβή της επιβεβαίωσης.

27/40

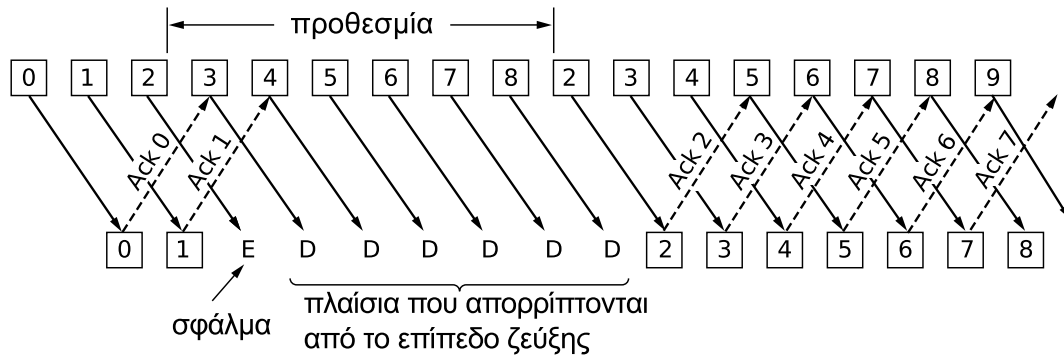
Πρωτόκολλο Go-Back-N με ACK/NAK



- Το παράθυρο αποστολής έχει άπειρο μήκος.
- Το παράθυρο παραλαβής έχει μέγεθος 1.
- Ο αποστολέας επιστρέφει στο πλαίσιο που μεταδόθηκε εσφαλμένα επαναμεταδίδοντας το ίδιο και τα επόμενά του.

28/40

Παραλλαγή: Πρωτόκολλο Go-Back-N με προθεσμία



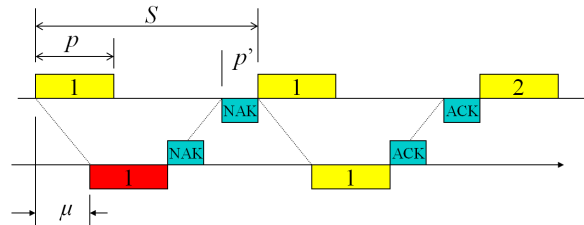
29/40

Πρωτόκολλο επιλεκτικής επαναμετάδοσης (Selective Repeat)



30/40

Stop and Wait: Παράμετροι εμπλεκόμενες στην εκτίμηση της επίδοσης



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

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

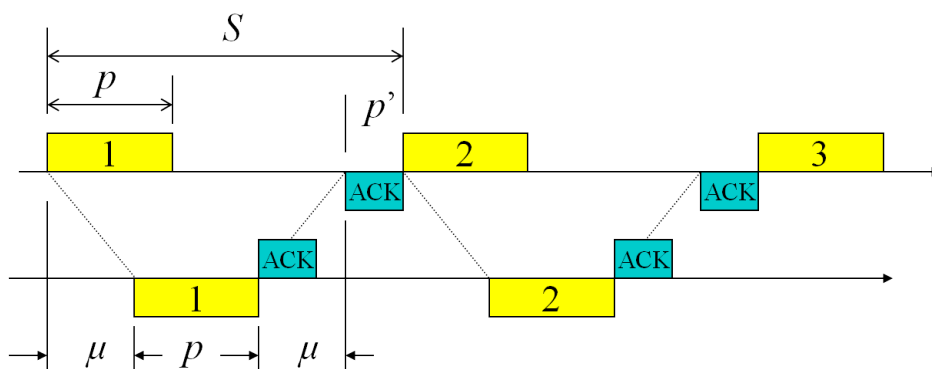
$\mu = \text{χρόνος διάδοσης από τον πομπό στο δέκτη} =$

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

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

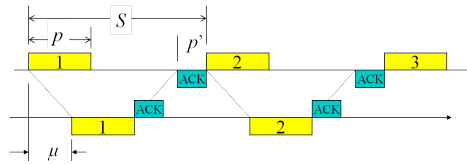
¹ Της τάξης μεγέθους της ταχύτητας του φωτός, π.χ. 2.3×10^8 m/sec.

Stop and Wait: Απόδοση (διαπερατότητα) χωρίς σφάλματα



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

Παράδειγμα: Stop and Wait, διαπερατότητα χωρίς σφάλματα



Π.χ. για απόσταση 100 km, ταχύτητα μετάδοσης 56 kbps, πακέτα μήκους 1000 bits, επιβεβαίωση 50 bits:

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

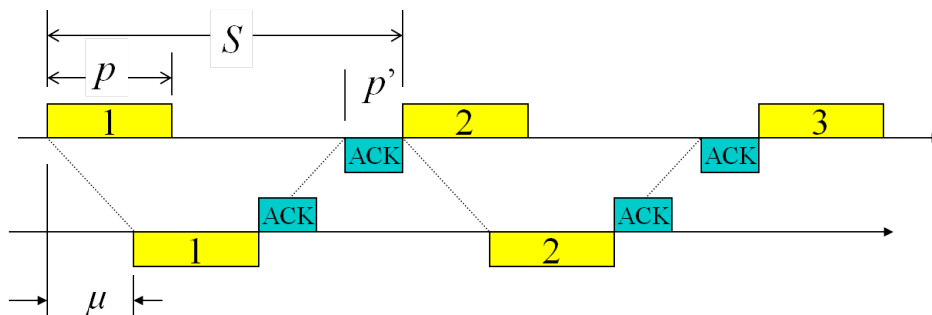
$$p' = 48/56 \times 10^3 = 0.857 \text{ msec}$$

$$\mu = 100 \times 10^3 / 2.8 \times 10^8 = 0.36 \mu\text{sec}$$

$$\eta = \frac{p}{S} = \frac{p}{2\mu + p + p'} = \frac{p}{p + p'} = \frac{1000}{1050} = 0.95$$

33/40

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.

34/40

Πώς υπολογίζεται το μέσο πλήθος εσφαλμένων μεταδόσεων

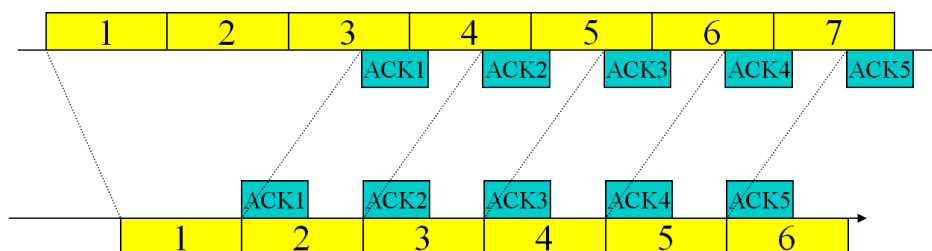
Αν υποτεθούν ανεξάρτητα σφάλματα με πιθ. e ανά μετάδοση:

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

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

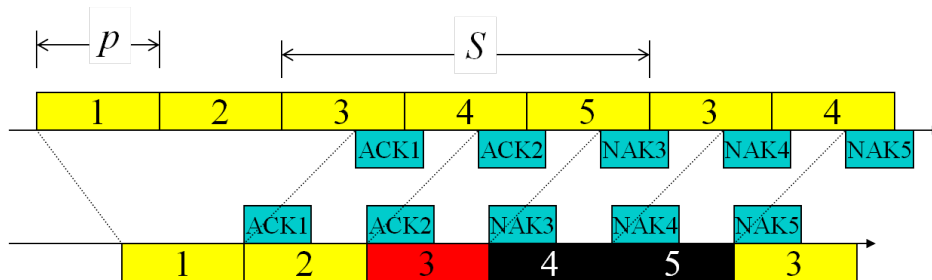
35/40

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



$$\eta = 1$$

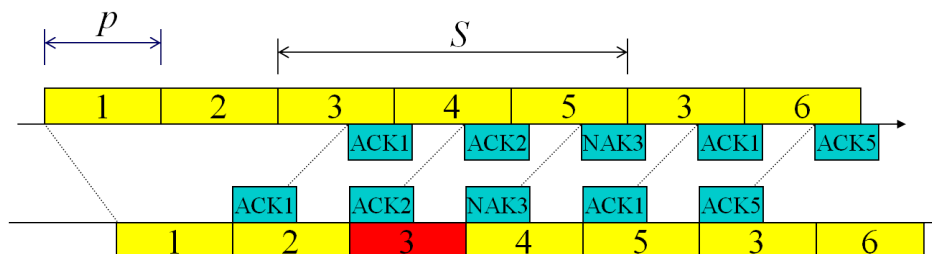
36/40



$$\eta_{\text{gbn}} = \frac{p}{NS + p}$$

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

Περιγραφή των πρωτοκόλλων
Πρωτόκολλα με κυλιόμενο παράθυρο
Επιδόσεις πρωτοκόλλων επαναμετάδοσης



$$\eta_{\text{sr}} = \frac{p}{\overline{N}p + p} = \frac{1}{\overline{N} + 1}$$

$$\eta_{\text{sr}} > \eta_{\text{gbn}} = \frac{p}{NS + p}$$

38/40

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;

39/40

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