

Κεφάλαιο 2ο

Το Στρώμα Σύνδεσης Δεδομένων (Data Link Layer)

Όπως είδαμε, το στρώμα 2 έχει σύμφωνα με την αρχιτεκτονική αναφοράς της ISO την αποστολή να υλοποιεί αξιόπιστες ενδιάμεσες ζεύξεις. Με τον όρο αξιόπιστες νοούνται εκείνες οι ζεύξεις στις οποίες ανιχνεύονται και διορθώνονται τα σφάλματα του φυσικού στρώματος αντί να περνάνε στο τρίτο στρώμα. Λόγω του θορύβου και των παραμορφώσεων του καναλιού και άλλων ατελειών, οι συνδέσεις του φυσικού στρώματος δεν μπορεί να θεωρηθούν αξιόπιστες. Παρ' ότι η εισαγωγή των οπτικών ινών έχει ελαττώσει τους ρυθμούς σφαλμάτων, αυτά δεν μπορούν να αγνοηθούν. Επί πλέον το στρώμα ζεύξης πραγματοποιεί έλεγχο ροής, δηλαδή διαθέτει μηχανισμούς για να διαμορφώνει τον ρυθμό εκπομπής σε τρόπο που να προλαβαίνει να τα επεξεργάζεται το σύστημα λήψης. Τέλος επειδή η μετάδοση στο φυσικό στρώμα είναι σειριακή το στρώμα ζεύξης επιφορτίζεται και με την λειτουργία της πλαισίωσης (framing), δηλ., της οριοθέτησης της αρχής και τέλους των PDU.

Σημείωση. Μέσα στα τερματικά ή κομβικά συστήματα, οι ανταλλαγές μεταξύ υπο-μονάδων γίνονται κατά κανόνα με παράλληλους διαύλους (parallel buses), αν και τελευταία εμφανίστηκαν και εσωτερικοί σειριακοί δίαυλοι. Εκτός από τα πολλά ταυτόχρονα σήματα για κάθε bit δεδομένων, ένας παράλληλος δίαυλος διαθέτει και άλλα σήματα ελέγχου. Ένα από αυτά μπορεί να σηματοδοτεί την αρχή της SDU (π.χ. να γίνεται ένα μόνο κατά την διάρκεια του πρώτου οκτέτου ενός διαδρόμου πλάτους ενός byte) λύνοντας εύκολα το πρόβλημα της οριοθέτησης. Έξω από τις συσκευές η σειριακοί δίαυλοι κυριαρχούν και μόνο σε αποστάσεις ολίγων μέτρων συμφέρει χρήση παράλληλης μετάδοσης (π.χ. σύνδεση εκτυπωτή σε υπολογιστή)

Έτσι το 2ο στρώμα προσφέρει στα σημεία πρόσβασης υπηρεσίας (SAP) του στρώματος 3 τις εξής υπηρεσίες

- Εγκατάσταση και κατάργηση αξιόπιστων συνδέσεων ζεύξης δεδομένων.
- Μετάδοση δεδομένων που παραδίδονται από το Στρώμα 3 μέσω των στοιχείων υπηρεσίας (SDU) στο απέναντι στρώμα 2 μέσω των PDU του στρώματος 2 και με χρήση των πρωτοκόλλων του 2^{ου} στρώματος. Τα δεδομένα παραδίδονται στο 3^ο στρώμα στο απέναντι σύστημα μέσω της SDU.
- Διατήρηση της σειράς μετάδοσης των πακέτων.
- Ανίχνευση και όπου είναι δυνατόν διόρθωση σφαλμάτων μέσω διαδικασιών αναμετάδοσης. (Δεν χρησιμοποιούνται κώδικες διόρθωσης λαθών). Αυτό γίνεται με διαδοχική αρίθμηση των εκπεμπόμενων πλαισίων για ανίχνευση απολεσθέντων πλαισίων πέραν της ανίχνευσης επιμέρους λαθών. Αντίστοιχη αρίθμηση τηρείται και στον δέκτη.
- Ειδοποίηση των διαδικασιών του στρώματος δικτύου στην περίπτωση ύπαρξης σφαλμάτων που δεν μπορούν να διορθωθούν.
- Έλεγχο της ροής των δεδομένων ώστε να αποφεύγεται τυχόν συμφόρηση του δέκτη λόγω υπέρβασης του μέγιστου ρυθμού λήψης δεδομένων.

Η υλοποίηση αξιόπιστων συνδέσεων απαιτεί την ύπαρξη μηχανισμών ανίχνευσης λαθών. Μεγάλα επιτεύγματα των μαθηματικών σε συνδυασμό με την πρόοδο των ψηφιακών κυκλωμάτων έχουν δώσει αξιοθαύμαστους τρόπους ανίχνευσης λαθών μετάδοσης (αλλοίωση bits) με χρήση πολύ απλών κυκλωμάτων με βάσει καταχωρητές μετατόπισης και πύλες XOR. Περισσότερα για την ανίχνευση και διόρθωση λαθών δίδονται στις εργαστηριακές ασκήσεις. Η διόρθωση βασίζεται κατά κανόνα στην τεχνική ARQ (Automatic Retransmission reQuest)

δηλαδή στην αίτηση επαναποστολής από τον δέκτη. Για μικρές συχνότητες λαθών bit (BER=Bit Error Rate) της τάξεως 10^{-6} 10^{-9} που είναι οι συνήθεις τιμές στις σύγχρονες ζεύξεις, η αναμετάδοση είναι αποδοτικότερη από την διόρθωση βάσει πλεονασματικής πληροφορίας. Η τεχνική ARQ δεν διαφέρει από την συνήθη στην ζωή πρακτική να ζητάμε να μας ξαναπουν κάτι που δεν ακούσαμε καθαρά.

Εκτός από λάθη Μετάδοσης (Transmission) αναγνωρίζονται και λάθη Δομής πλαισίου (Frame structure), Πρωτοκόλλου (Protocol), καθώς και παραβίασης χρόνου επιβεβαίωσης πλαισίων (Excessive Acknowledgement time). Το πως επιτυγχάνονται αυτά θα δούμε στη συνέχεια χρησιμοποιώντας σαν παράδειγμα το πιο τυπικό και διαδεδομένο πρωτόκολλο του στρώματος ζεύξης το HDLC.

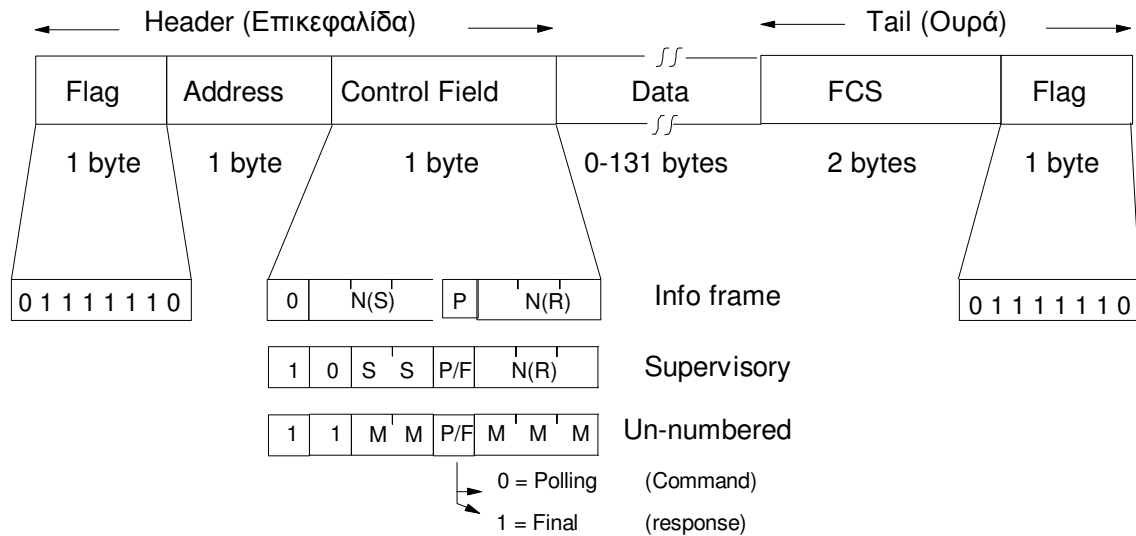
Πρωτόκολλα Στρώματος Σύνδεσης Δεδομένων (Data Link Layer): HDLC/LAPB

Στο Στρώμα 2 κυριαρχεί το πρωτόκολλο HDLC (High Level Data Link Control) της ISO και οι παραλλαγές του. Ελάχιστες διαφορές έχει και το πρότυπο ADCCP (Advanced Data Communication Procedures) του Αμερικανικού Ινστιτούτου Εθνικών Προτύπων (American National Standards Institute) το ANSI X3.66. Και τα δύο έχουν βασισθεί στο παρόμοιο πρωτόκολλο SDLC (Synchronous Data Link Control) της IBM που χρησιμοποιήθηκε στα δίκτυα SNA.

Σε δίκτυα που έχουν μόνο συνδέσεις σημείου προς σημείο όπως το X.25, γίνεται χρήση της παραλλαγής του HDLC που καλείται LAPB (Link Access Procedure Balanced). Ο όρος Balanced (ισόρροπη) αναφέρεται στην ισοτιμία των σταθμών (πομποδεκτών) μιας ζεύξης ως προς τις διαδικασίες του πρωτοκόλλου. Σε αντιδιαστολή, είναι δυνατόν να έχουμε σε κοινόχρηστο μέσο (π.χ. στριμμένα ζευγάρια ή ομοαξονικό καλώδιο) πολλούς σταθμούς συνδεδεμένους. Το HDLC διαθέτει για την περίπτωση αυτή και μηχανισμούς διευθυνσιοδότησης των σταθμών ώστε να λειτουργεί και με πρωτόκολλα διαιτησίας πρόσβασης συνήθως τύπου αφέντη-σκλάβου (master-slave). Δηλαδή λειτουργεί σε αυτή την περίπτωση μία μη ισόρροπη διαδικασία κατά την οποία οι σταθμοί διακρίνονται σε ένα πρωτεύοντα σταθμό, ο οποίος έχει την πρωτοβουλία στην εκτέλεση του πρωτοκόλλου (master), και σε ένα (ή περισσότερους) δευτερεύοντες σταθμούς (slaves) οι οποίοι διακρίνονται βάσει της διεύθυνσής που τους διατίθεται. Δεν συμβαίνει αυτό στην LAPB που χρησιμοποιείται όταν έχουμε δύο ισότιμους σταθμούς τον ένα απέναντι στον άλλο. Συγγενές προς το HDLC και μάλιστα την ισόρροπη βαριάντα του πρέπει να θεωρείται και το LLC (Logical Link Control) το οποίο συναντάται στα τοπικά δίκτυα πάνω από το υπο-στρώμα MAC και το οποίο περιγράφεται στο σχετικό κεφάλαιο.

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε ταυτόχρονα το HDLC και το LAPB δίδοντας τα κοινά στοιχεία και επισημαίνοντας τις διαφορές τους.

Το στρώμα ζεύξης παραλαμβάνει την συνεχή ροή bits από το φυσικό στρώμα και τα οργανώνει σε ενότητες δεδομένων που ονομάζονται πλαίσια (frames). Κατά την άλλη κατεύθυνση το δεύτερο στρώμα παραλαμβάνει τα πλαίσια του 3ου στρώματος και προσθέτει στα άκρα του πλαισίου τα πεδία με τις πληροφορίες ελέγχου του πρωτοκόλλου HDLC (ή LAPB) δηλ. το PCI σύμφωνα με την αρχιτεκτονική OSI. Τα πλαίσια έχουν την ακόλουθη δομή:



Σχήμα 2-1. Ο μορφότυπος του πλαισίου HDLC/LAPB

Τα επιμέρους πεδία έχουν την παρακάτω σημασία:

Σημαία (flag): Είναι ένας σχηματισμός δυαδικών ψηφίων (01111110) που οριοθετεί το πλαίσιο επιτρέποντας στον δέκτη να εντοπίζει την θέση κάθε πεδίου, πράγμα απαραίτητο για τη λειτουργία των μηχανισμών του πρωτοκόλλου LAPB. Εάν δεν υπάρχει χρήσιμη πληροφορία για αποστολή, τότε το DTE και DCE εκπέμπουν συνεχώς σημαίες. Αν υπάρχουν συνεχώς πλαίσια για εκπομπή, τότε μόνο μία σημαία απαιτείται μεταξύ των διαδοχικών πλαισίων.

Γεννάται το ερώτημα πώς θα διακρίνει ο δέκτης την σημαία από μία τυχαία εμφάνιση του σχηματισμού 01111110 μέσα στα δεδομένα, πράγμα όχι ιδιαίτερα σπάνιο αφού ο σχηματισμός της σημαίας είναι ένας από τους 256 ισοπίθανους σχηματισμούς των 8 bits. Χρησιμοποιείται ο εξής διαφανής για το στρώμα 3 μηχανισμός. Κατά την αποστολή των διαδοχικών bit εάν εμφανισθούν πέντε διαδοχικά 1 τότε ο πομπός προσθέτει πάντα ένα 0. Αντίστοιχα στη λήψη απομακρύνεται κάθε 0 που βρίσκεται μετά από 5 διαδοχικά 1 και έτσι ο μηχανισμός καθίσταται διαφανής με αποκατάσταση της αρχικής ακολουθίας. Η διαδικασία αυτή που ονομάζεται **παρεμβολή δυαδικών ψηφίων (bit stuffing)** δεν εφαρμόζεται όταν ο πομπός γνωρίζει ότι εκπέμπει σημαία. Αντίστοιχα, όταν ο δέκτης λαμβάνει 6 διαδοχικά 1, γνωρίζει ότι μπορούν να εμφανιστούν μόνο στη σημαία.

Παράδειγμα

Έστω ότι πρέπει να σταλεί ο σχηματισμός: 01111110 1011111 0101Θα σταλεί στη γραμμή: 011111{0}101011111{0}0101 όπου εντός αγκύλης σημειώνονται τα stuffing bits. Στο δέκτη θα αφαιρεθούν τα μηδενικά που βρίσκονται μετά 5 άσσους και θα ξαναπάρουμε: 011111 101011111 0101

Διεύθυνση (address): Το πεδίο αυτό έχει σπουδαιότερο ρόλο στις μη ισόρροπες παραλλαγές του HDLC όπου ένας κύριος σταθμός μπορεί να επικοινωνεί με πολλούς δευτερεύοντες σταθμούς σε διατάξεις σημείου - πολλαπλών σημείων. Τότε η διεύθυνση είναι πάντα αυτή του δευτερεύοντος σταθμού είτε είναι αποστολέας είτε προορισμός. Στην περίπτωση της ισόρροπης λειτουργίας του LAPB, τότε το πεδίο διεύθυνσης χρησιμοποιείται για να ξεχωρίζουν οι εντολές από τις αποκρίσεις στα πλαίσια επίβλεψης. Έτσι χρησιμοποιούνται μόνο δύο διευθύνσεις, η δεκαεξαδική 01 (διεύθυνση B) για το DCE και η δεκαεξαδική 03 (διεύθυνση A) για το DTE. Στα πλαίσια που είναι πλαίσια εντολής (command) τίθεται η διεύθυνση του προορισμού. Στα πλαίσια

απόκρισης (response) τίθεται η διεύθυνση του αποστολέα. Τα πλαίσια I φέρουν πάντα την διεύθυνση του προορισμού. Έτσι έχουμε τις περιπτώσεις:

Εντολές από DTE προς DCE περιέχουν διεύθυνση B.

Εντολές από DCE προς DTE περιέχουν διεύθυνση A.

Εντολές από DTE προς DCE περιέχουν διεύθυνση A.

Εντολές από DCE προς DTE περιέχουν διεύθυνση B

Πεδίο ελέγχου (control field): Το πεδίο ελέγχου είναι το βασικό εργαλείο υλοποίησης των μηχανισμών του στρώματος ζεύξης. Το πρωτόκολλο κωδικοποιεί τρεις τύπους πλαισίων: πλαίσια επίβλεψης (supervisory), πληροφορίας (information) και άνευ αρίθμησης (unnumbered). Το πεδίο αυτό θα αναλυθεί λεπτομερώς πιο κάτω κατά την περιγραφή των λειτουργιών του πρωτοκόλλου.

Πεδίο δεδομένων: Το πεδίο δεδομένων περιέχει τα δεδομένα (data field). Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από το στρώμα 3 και έχουν διαβιβασθεί μέσω του σημείου πρόσβασης υπηρεσίας μεταξύ 2 και 3. Τα δεδομένα περικλείουν και τα δεδομένα του χρήστη της εφαρμογής αλλά αυτό δεν συμβαίνει πάντα αφού είναι δυνατόν κάποιο ανώτερο στρώμα να ανταλλάσσει δικά του δεδομένα για λόγους ελέγχου. Το ανώτερο στρώμα είναι χρήστης των υπηρεσιών που προσφέρει το στρώμα 2. Το μήκος του πεδίου δεδομένων ποικίλει από 0 έως 131 bytes. Τα περιεχόμενα αυτού του πεδίου συνιστούν το ωφέλιμο φορτίο για το δεύτερο στρώμα, ενώ όλα τα άλλα πεδία είναι το αναγκαίο απόβαρο για την λειτουργία του πρωτοκόλλου το οποίο στην ορολογία του OSI αποκαλείται όπως είδαμε PCI (πληροφορία ελέγχου πρωτοκόλλου).

Πεδίο Ελέγχου Σφαλμάτων (FCS-Frame Control Sequence): Βασίζεται σε ιδιότητες των κυκλικών κωδικών για την ανίχνευση αλλοιώσεων που μπορεί να συνέβησαν κατά τη μεταφορά των δεδομένων. Αποτελείται από δύο bytes που περιέχουν το σύνδρομο που προκύπτει από την εκτέλεση του αλγορίθμου διαίρεσης κατάλληλων πολωνύμων. Ο δέκτης εκτελεί ξανά την διαίρεση και εάν δεν βρει ίδιο αποτέλεσμα, κάποια bit έχουν αλλοιωθεί. Καλύπτει όλο το πλαίσιο πλην των σημαιών. Μετά την ανίχνευση λάθους το πλαίσιο απορρίπτεται και για τη διόρθωση απαιτείται αναμετάδοση. Αυτή βασίζεται στην διαδοχική αρίθμηση N(S) των εκπεμπόμενων πλαισίων. Αντίστοιχα υπάρχει και μια διαδοχική αρίθμηση N(R) στο δέκτη. Στην αρίθμηση όπως θα δούμε βασίζεται ο μηχανισμός των ολισθαινόντων παραθύρων, που υποστηρίζει την αναμετάδοση.

Πεδίο ελέγχου-Τύποι πλαισίων

Το πεδίο ελέγχου όπως ελέγχθη είναι το βασικό για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου και θα εξετασθεί διεξοδικά πιο κάτω. Το πρώτο bit (ιδέ σχήμα 2-1) χαρακτηρίζει τον τύπο του πλαισίου, δηλ. πλαίσιο πληροφορίας (εάν είναι 0) ή ένας από τους άλλους δύο τύπους (εάν είναι 1). Οι άλλοι δύο τύποι χαρακτηρίζονται περαιτέρω από το δεύτερο bit. Τιμή 0 δηλώνει πλαίσιο επίβλεψης, ενώ τιμή 1 δηλώνει μη-αριθμημένο πλαίσιο. Τα πλαίσια επίβλεψης χρησιμεύουν για να διεκπεραιώνουν λειτουργίες του πρωτοκόλλου σχετικές με την ροή της πληροφορίας ενώ τα μη-αριθμημένα μεταφέρουν εντολές ελέγχου του πρωτοκόλλου. Οι λεπτομέρειες θα γίνουν αντιληπτές κατά την περιγραφή της λειτουργίας.

Πλαίσιο πληροφορίας I (information frame)

Περιλαμβάνει δύο τριηγήφια πεδία αρίθμησης των πλαισίων με τα οποία υλοποιείται ο μηχανισμός παραθύρων ολίσθησης:

N(S): Είναι ο αύξων αριθμός πλαισίων πομπού (το bit 2 είναι το λιγότερο σημαντικό).

N(R): Είναι ο αύξων αριθμός πλαισίων δέκτη (το bit 6 είναι το λιγότερο σημαντικό).

Η αρίθμηση των πλαισίων είναι απαραίτητη για τον έλεγχο λαθών σε συνδυασμό και με το πεδίο ελέγχου σφάλματος. Έτσι μπορεί να ανιχνευθεί η απώλεια πλαισίων αλλά και να ειδοποιηθεί ο πομπός ποια πλαίσια να ξαναστείλει όταν ανιχνευθούν λάθη. Επίσης αυτά τα πεδία υποβοηθούν τον έλεγχο ροής (μέσω του μηχανισμού του παραθύρου) ο οποίος έχει σκοπό να προλαμβάνει υπερχειλίση του ταμιευτήρα (μνήμη) προσωρινής αποθήκευσης του δέκτη. Σύμφωνα με τη σύμβαση του πρωτοκόλλου, ο αριθμός $N(R)$ που αποστέλλει ο δέκτης έχει διπλή σημασία: δηλώνει ότι το επόμενο πλαίσιο που αναμένει και μπορεί να δεχθεί σαν έγκυρο είναι αυτό με τον αριθμό $N(R)$ και ότι όλα τα πλαίσια μέχρι και συμπεριλαμβανόμενου του $N(R)-1$ ελήφθησαν σωστά. Δεδομένων των 3 διαθέσιμων bit, η αρίθμηση των $N(S)$ και $N(R)$ κυλιέται από το 0 έως το 7 και μετά αναδιπλώνεται στο 0 ξανά. Δηλαδή ακολουθεί αρίθμηση modulo 8.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρότυπο προβλέπει και δυνατότητα αρίθμησης με 7 bit (από 0 μέχρι το 127) και στην περίπτωση αυτή τα πλαίσια I και S διαθέτουν πεδίο ελέγχου μήκους δύο οκτέτων. Αυτή η λειτουργία λέγεται εκτεταμένη (extended) και χρησιμοποιείται σε μακριές ζεύξεις (π.χ. δορυφορικές)

Το bit P (Poll bit) χρησιμοποιείται για βολιδοσκόπηση (polling). Με $P=1$ σημειώνεται ότι το πλαίσιο δεδομένων έχει και ρόλο ερώτησης για την οποία αναμένεται απόκριση (polling). Η απόκριση ωστόσο αυτή δεν έρχεται ποτέ σε πλαίσιο πληροφορίας αλλά σε πλαίσιο επίβλεψης (RR, RNR, REJ) και φέρει το αντίστοιχο bit F (=1).

Μόνο τα πλαίσια I (Information) χρησιμεύουν για την αποστολή δεδομένων που παραδίδονται για μετάδοση στο σημείο πρόσβασης μεταξύ Στρωμάτων 2 και 3. Τα πλαίσια I φέρουν πάντα την διεύθυνση του προορισμού.

Πλαίσιο επίβλεψης S (*Supervisory frame*)

Τα πλαίσια S (Supervisory) χρησιμεύουν στον έλεγχο της εξέλιξης της μετάδοσης δεδομένων και περιέχουν διαδοχική αρίθμηση (sequencing) μόνον όμως για την πλευρά του δέκτη ($N(R)$). Με τα δύο ελεύθερα bit SS του πεδίου ελέγχου διαφοροποιούνται τέσσερα είδη τέτοιων πλαισίων αλλά στο LAPB χρησιμοποιούνται μόνο τρία από τα τέσσερα που δηλώνουν τα παρακάτω.

με $SS=00$ έχουμε πλαίσιο ετοιμότητας δέκτη RR (receiver ready).

με $SS=10$ έχουμε πλαίσιο ανετοιμότητας δέκτη RNR (receiver not ready).

με $SS=01$ έχουμε πλαίσιο απόρριψης REJ (reject).

Τα δύο πρώτα περιέχουν εμμέσως επιβεβαίωση λήψης (ACK=acknowledgment) των προηγούμενων πλαισίων σύμφωνα με την τιμή του $N(R)$ του μηχανισμού παραθύρου ολίσθησης (sliding window). Το τρίτο αναφέρεται σε οποιοδήποτε από τα αποσταλέντα και μη εισέτι επιβεβαιωθέντα τα οποία σε περίπτωση απόρριψης πρέπει και να αποσταλούν ξανά όλα (ακόμα και αν αυτά έφθασαν σωστά) αρχίζοντας από αυτό του οποίου ο αύξων αριθμός δίδεται στο πεδίο $N(R)$ του πλαισίου REJ. Προς κάθε πλευρά μπορεί να εγερθεί μόνο μία κατάσταση REJ και μόνο μετά την εκκαθάριση της μπορεί να εγερθεί άλλη. η κατάσταση τερματίζεται με τη λήψη πλαισίου I με τιμή $N(S)$ ίση προς την τιμή $N(R)$ του πλαισίου REJ. Επίσης το REJ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τερματισμό κατάστασης κορεσμένου δέκτη που είχε αναγγελθεί με πλαίσιο RNR καθώς και για βολιδοσκόπηση της κατάστασης του απέναντι DTE ή DCE (όταν έχει $P=1$)

Ο τέταρτος τύπος πλαισίου επίβλεψης του HDLC με $SS=11$ δηλώνει επιλεκτική απόρριψη (selective reject) και έχει προβλεφθεί για την δυνατότητα υποστήριξης πρωτοκόλλων τύπου "SELECTIVE REPEAT" στα οποία αποφεύγεται η επαναποστολή άλλων πλαισίων πλην του περιέχοντος σφάλμα. Στην πράξη δεν επικράτησαν διότι απαιτούν εκταμίευση πλαισίων και

στον πομπό και στον δέκτη και λογική στον δέκτη για την αναδιάταξη της σειράς των πλαισίων. Όλα τα διαδεδομένα πρότυπα πρωτοκόλλων ζεύξης είναι τύπου: "GO BACK N" δηλ. "επανάλαβε N" (πλαίσια εννοείται). Τέτοιο είναι και το LAPB το οποίο δεν υποστηρίζει τον τέταρτο τύπο πλαισίου επίβλεψης δηλ. η απόρριψη συνεπάγεται επαναποστολή όλων των πλαισίων μετά το απορριπτόμενο έστω και αν αυτά ελήφθησαν σωστά.

P/F: Για τα πλαίσια S ή U η χρήση του P/F έχει ως εξής. Το bit 5 λειτουργεί σαν P (Poll) ή σαν F (Final) σε συνδυασμό με το περιεχόμενο του πεδίου διεύθυνσης. Με P=1 το DCE ή DTE δηλώνει ότι αναμένει απόκριση από το DTE ή DCE αντίστοιχα (τότε το πλαίσιο S ή U φέρει την διεύθυνση του προορισμού). Στην συνέχεια, το F=1 χρησιμοποιείται στην απόκριση για να γίνει δηλωθεί ακριβώς ότι πρόκειται για πλαίσιο απάντησης που έστειλε το DTE ή DCE αντίστοιχα, σαν αποτέλεσμα της αρχικής εντολής με P=1. Τότε το πλαίσιο S ή U φέρει F=1 και την διεύθυνση του αποστολέα ώστε να γίνει αντιληπτό ότι το πλαίσιο φέρει την απάντηση στην προηγηθείσα ερώτηση (polling). Π.χ. η απάντηση σε ένα πλαίσιο SABM or DISC με P=1 θα είναι ένα πλαίσιο UA ή DM με F=1.

ΠΡΟΣΟΧΗ οι λειτουργίες P και F του bit P/F είναι δύο εναλλακτικές και όχι δύο λογικά αντίθετες λειτουργίες δηλ. η F δεν είναι λογική άρνηση της P αλλά εναλλακτική ανάλογα με την φύση του πλαισίου. Έτσι όταν το bit είναι ένα έχουμε εφαρμογή βολιδοσκόπησης P στις εντολές (commands) και τελικό πλαίσιο F (final) στις αποκρίσεις (responses), ενώ όταν είναι μηδέν δεν έχουμε ούτε βολιδοσκόπηση ούτε τελικό πλαίσιο απόκρισης. (Πρέπει ωστόσο να τονισθεί ότι στο LAPB όλα τα πλαίσια απόκρισης είναι τελικά και τιμή του F=0 είναι σημασιολογικό λάθος πρωτοκόλλου και θα οδηγήσει σε απόρριψη του πλαισίου που το φέρει. Αποκρίσεις εκ πολλών πλαισίων μπορούν να συναντηθούν σε άλλες μη ισόρροπες παραλλαγές του HDLC όπου και έχουν έννοια τα μη τελικά πλαίσια απόκτησης. Φυσικά η τιμή P=0 έχει έννοια).

Όπως ανεφέρθη, στα πλαίσια I το bit 5 του πεδίου ελέγχου μπορεί να έχει μόνο ρόλο P (polling, δηλ ερώτηση) οπότε και φέρει P=1. Επειδή ένα πλαίσιο I ποτέ δεν είναι απόκριση (response), φέρει πάντα την διεύθυνση του προορισμού. Μπορούμε τώρα να συμπληρώσουμε ότι η απόκριση θα είναι ένα πλαίσιο επίβλεψης τύπου RR, RNR, REJ, ή τύπου U (π.χ. FRMR -ιδέ κατωτέρω) με το bit F=1. Εάν ωστόσο το πλαίσιο εστάλη κατά την φάση κατάργησης κλήσης, τότε η απόκριση θα είναι πλαίσιο DM με F=1.

Μη-αριθμημένο Πλαίσιο U (*Un-numbered frame*)

Τα πλαίσια U (unnumbered) ελέγχουν τη σύνδεση μεταξύ DCE και DTE. Δεν περιλαμβάνουν αρίθμηση (Sequence numbering) και ο ρόλος τους περιορίζεται μόνο κατά την εγκατάσταση και κατάργηση σύνδεσης στο στρώμα 2. Πιο συγκεκριμένα, αφού πραγματοποιηθεί η φυσική και ηλεκτρική σύνδεση (στρώμα 1), η ανταλλαγή κατάλληλων πλαισίων U μεταξύ των δύο άκρων επιβεβαιώνει ότι η σύνδεση είναι σε θέση να προσφέρει τις υπηρεσίες της.

Τα 5 bits (σημειούμενα με M) που είναι διαθέσιμα στο πεδίο ελέγχου κωδικοποιούν το διαχωρισμό των μη-αριθμημένων πλαισίων σε πολλά διαφορετικά είδη εντολών (μέχρι 32). Στο LAPB χρησιμοποιούνται οι εξής:

SNRM (Set Normal Response Mode). Αυτή είναι η αρχική εντολή του HDLC για κανονική λειτουργία σε μη ισόρροπες ζεύξεις πολλαπλών σημείων με ένα πρωτεύοντα (master) και πολλούς δευτερεύοντες (slaves) σταθμούς. Τυπική χρήση γίνεται κατά την σύνδεση πολλών τερματικών σε μεγάλους υπολογιστές. Σε αυτό τον τύπο λειτουργίας οι δευτερεύοντες δεν μπορούν να στείλουν παρά μόνο με εντολή του πρωτεύοντος σταθμού.

SNRME (Set Normal Response Mode Extended). Όπως η προηγούμενη αλλά με πεδία αρίθμησης 7bit (δηλ. μπορεί να χρησιμοποιηθούν τιμές μέχρι 127 και μεγάλα παράθυρα).

SARM (Set Asynchronous Response Mode). Αυτή είναι η αρχική εντολή για επίσης μη ισόρροπες ζεύξεις. Η διαφορά με την προηγούμενη είναι ότι οι δευτερεύοντες μπορούν να στείλουν και χωρίς εντολή του πρωτεύοντος σταθμού.

Στην πράξη στα δίκτυα ευρείας περιοχής συναντώνται πιο συχνά οι ζεύξεις σημείου προς σημείο όπου χρησιμοποιείται το LAPB το οποίο εκκινεί με μία από τις δύο ακόλουθες αρχικές εντολές που ορίζουν συμμετρικούς τρόπους λειτουργίας.

SABM (Set Asynchronous Balanced Mode) με πεδίο ελέγχου: 11-11 P 100. Αυτή η εντολή ταυτόχρονα δηλώνει πεδία N(S) και N(R) με 3bit

SABME (Set Asynchronous Balanced Mode Extended). Χρησιμοποιεί πεδία αρίθμησης 7bit (δηλ. μπορεί να χρησιμοποιηθούν τιμές μέχρι 127 και μεγάλα παράθυρα που δεν είναι δυνατά με το **SABM**). Χρησιμοποιείται όταν ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής είναι μεγάλος σε σχέση με το χρόνο μετάδοσης κάθε πακέτου π.χ. σε δορυφορικές ζεύξεις. Στην περίπτωση αυτή το πεδίο ελέγχου των πλαισίων I και S αποτελείται από 2 οκτέτα.

DISC (Disconnect). Είναι μία απαραίτητη εντολή που ανακοινώνει στην απέναντι πλευρά ότι η συσκευή θα βγει εκτός υπηρεσίας π.χ. για συντήρηση. Όταν η συσκευή ξανατροφοδοτηθεί με ρεύμα θα δώσει κάποια εντολή αρχικοποίησης SNRM, SNRME, SABM ή SABME κτλ. Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο.

UA (Un-numbered Acknowledge). Επειδή και τα πλαίσια ελέγχου μπορεί να χαθούν ή υποστούν σφάλματα που τα καθιστούν άχρηστα, υπάρχει αυτό το ειδικό πλαίσιο U που δηλώνει ότι το προηγούμενο πλαίσιο ελέγχου ελήφθη σωστά. Στα πλαίσια ελέγχου δεν επιτρέπεται περισσότερο από ένα να είναι σε εκκρεμότητα έτσι πάντα είναι σαφές σε ποιο πλαίσιο αναφέρεται το UA χωρίς κίνδυνο παρερμηνείας. Δηλαδή ως προς τα πλαίσια ελέγχου η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως τύπου "στάσου και περίμενε" (stop and wait).

FRMR (Frame Reject). Και αυτή η εντολή απαιτείται για την σωστή υλοποίηση της μηχανής καταστάσεων ενός τέτοιου πρωτοκόλλου. Χρησιμοποιείται όταν το πλαίσιο που ελήφθη έχει μεν σωστό πεδίο ελέγχου σφάλματος, αλλά δεν μπορεί να τύχει κάποιας ερμηνείας ως προς την διαδικασία του πρωτοκόλλου. Επί παραδείγματι, ένα πλαίσιο S με SS=11 (selective reject) στο LAPB που δεν προβλέπεται, ένα πλαίσιο με λιγότερα από 32 bit που επίσης δεν επιτρέπεται, ένα ACK για πλαίσιο που είχε σταλεί εκτός του παραθύρου, κλπ. Αξίζει να σημειωθεί ότι μία απλή απόρριψη τύπου NACK (SS=01) δεν αρκεί για να καθοδηγήσει τον πομπό στο τι να κάνει αφού η ερμηνεία της απόρριψης αυτής είναι μη σωστό σύνδρομο στο πεδίο ελέγχου σφάλματος. Το πλαίσιο FRMR διαθέτει ένα πεδίο από 24 bit που περιέχει την αιτία της απόρριψης. Αυτή μπορεί να είναι

- Τύπος πεδίου ελέγχου που δεν έχει ορισθεί ή υλοποιηθεί
- Λάθος μήκος πλαισίου S ή U. Πλαίσιο περιείχε πεδίο πληροφορίας που δεν επιτρέπεται σε τέτοιο τύπο πλαισίου
- Ο αριθμός N(R) δεν ήταν έγκυρος

DM (Disconnected Mode). Εκτός από την απόκριση UA σε εντολή ορισμού τρόπου λειτουργίας (δηλ. SABM) υπάρχει και η DM που γνωστοποιεί ότι η τερματική συσκευή είναι αποσυνδεδεμένη χωρίς να έχει δεχθεί εντολή DISC. Μία αποσυνδεδεμένη συσκευή παρακολουθεί την γραμμή και αποκρίνεται με DM σε όλες τις εντολές πλην της SABM ή SABME.

Πλαίσια U	Πλαίσια I	Πλαίσια S
SABM (Set Asynchronous Balanced Mode)	Information πλαίσια	RR (Receive Ready)
UA (Unnumbered Acknowledgement)		RNR (Receive Not Ready)
DM (Disconnect Mode)		REJ (Reject)
DISC (Disconnect)		
FRMR (Frame Reject)		

Ο Μηχανισμός παραθύρου. Έλεγχος Ροής

Όλα τα πλαίσια πληροφορίας αριθμούνται διαδοχικά από τον εκπομπό κατά modulo 8 (ή 128 στην περίπτωση του εκτεταμένου τρόπου λειτουργίας) χρησιμοποιώντας το πεδίο N(S). Ο δέκτης επιβεβαιώνει ποια πλαίσια έχει λάβει σωστά επιστρέφοντας κατά την άλλη κατεύθυνση τον αριθμό N(R). Αυτή η αρίθμηση εξασφαλίζει την έγκαιρη ανίχνευση απώλειας πλαισίων από το DTE και DCE, και αποτελεί τη βάση της λειτουργίας του μηχανισμού του παραθύρου ολίσθησης ο οποίος επιτυγχάνει την διόρθωση (με αναμετάδοση) αλλοιωμένων πλαισίων και στον έλεγχο ροής. Όπως είδαμε τα σχετικά πεδία N(S) και N(R), μήκους το καθένα 3 bit, ευρίσκονται στην τρίτη οκτάδα της επικεφαλίδας του πακέτου data.

Ο αύξων αριθμός εκπομπής (send sequence number) N(S) είναι 0 στο πρώτο αποστέλλόμενο πλαίσιο μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης. Επειδή εάν ο πομπός περίμενε μετά από κάθε πλαίσιο που στέλνει να έλθει η επιβεβαίωση προτού στείλει το επόμενο θα είχαμε κακή χρήση του καναλιού και αργή επικοινωνία, το πρωτόκολλο HDLC επιτρέπει την αποστολή ενός αριθμού πλαισίων χωρίς ακόμα να έχουμε επιβεβαίωση. Ο μέγιστος αριθμός k των διαδοχικά αριθμούμενων πλαισίων I που μπορεί να στείλει το DTE ή DCE χωρίς περαιτέρω επιβεβαίωση της απέναντι πλευράς, ονομάζεται μήκος παραθύρου (window size). Το μήκος αυτό πρέπει οπωσδήποτε να είναι μικρότερο ή ίσο με 7 (ή 127). Το μήκος του παραθύρου είναι σταθερό και έχει οριστεί κατά την εγκατάσταση της ζεύξης.

Ο αύξων αριθμός λήψης έρχεται από την άλλη μεριά και δίνει τον αριθμό του πλαισίου πληροφορίας που αναμένεται σαν επόμενο. Ταυτόχρονα επιβεβαιώνει τη σωστή λήψη των πλαισίων με αριθμό μέχρι και N(R)-1. Η πλευρά (DTE ή DCE) που λαμβάνει το N(R) έχει δικαίωμα να προχωρήσει στην αποστολή μέχρι και του πλαισίου N(S) ίσο με το άθροισμα N(R) συν το μήκος του παραθύρου. Ο διαδοχικός αριθμός λήψης έρχεται με δύο τρόπους:

- με υπέρθεση (piggy-back) στο πεδίο N(R) των αντίθετα ερχόμενων πακέτων data (άρα οι αριθμοί N(S) και N(R) του ίδιου πακέτου είναι άσχετοι μεταξύ τους, καθώςσον αφορούν τη ροή σε δύο αντίθετες κατευθύνσεις).
- με ειδικό πλαίσιο ελέγχου ετοιμότητας δέκτη (RR), όταν δεν υπάρχει ροή πλαισίων πληροφορίας κατά την αντίθετη φορά ώστε να χρησιμοποιηθεί υπέρθεση.

Κάθε πλαίσιο μπορεί να επιβεβαιώνεται ιδιαίτερα, μπορεί όμως ο αριθμός N(R) να στέλνεται αραιότερα, επιβεβαιώνοντας έτσι τη λήψη μιας σειράς πλαισίων. Το πλήθος των

ανεπιβεβαίωτων πλαισίων δεν μπορεί φυσικά να υπερβαίνει αυτό του παραθύρου και πρέπει ο εκπομπός να σταματήσει μέχρι να λάβει κάποια επιβεβαίωση.

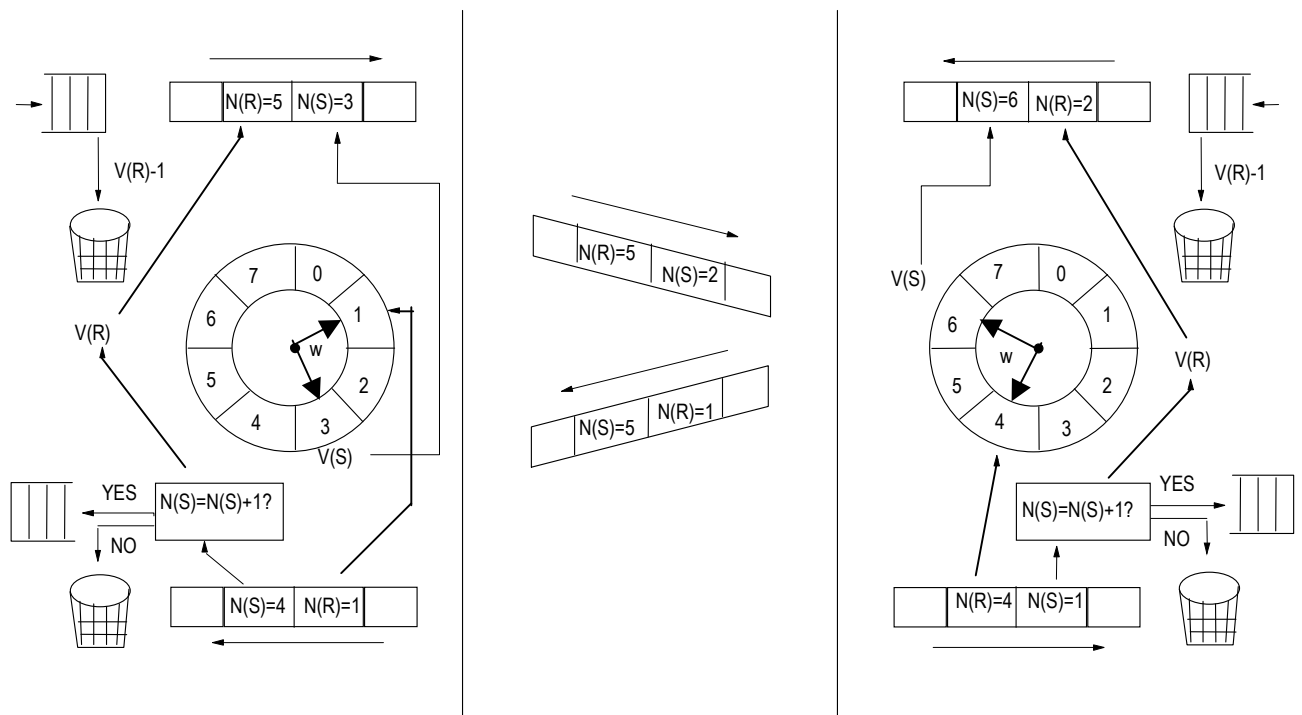
Η υλοποίηση του μηχανισμού του παραθύρου ολίσθησης βασίζεται στην τήρηση κάποιων μεταβλητών και την εκτέλεση κάποιων αλγορίθμων που χαρακτηρίζουν τη μηχανή καταστάσεων του μηχανισμού. Επειδή είναι ένα αρκετά τυπικό επικοινωνιακό πρωτόκολλο είναι χρήσιμο να δούμε λίγο λεπτομερέστερα την λειτουργία του. Οι τηρούμενες μεταβλητές είναι:

- **Μεταβλητή κατάστασης αποστολής (send state variable $V(S)$).** Η μεταβλητή αυτή παρακολουθεί την αρίθμηση των αποστελλόμενων πλαισίων και έχει ανά πάσα στιγμή την τιμή που θα μπει στο πεδίο $N(S)$ του επόμενου πλαισίου I που θα σταλεί. Αυξάνει κατά 1 με κάθε αποστελλόμενο πλαίσιο αλλά δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή $N(R)$ του τελευταίου ληφθέντος πλαισίου της απέναντι πλευράς κατά αριθμό μεγαλύτερο του παραθύρου k .
- **Μεταβλητή κατάστασης λήψης (receive state variable $V(R)$).** Παρακολουθεί τις τιμές αρίθμησης των αφικνούμενων πλαισίων και παίρνει την αμέσως μεγαλύτερη τιμή από αυτήν του τελευταίου εγκύρου $N(S)$ που έχει ληφθεί δηλ. έχει την τιμή που πρέπει κανονικά να έχει το επόμενο πλαίσιο που αναμένεται. Τα αντίστοιχα πλαίσια τότε σβήνονται από τον ταμιευτήρα αποστολής όπου παρέμεναν για το ενδεχόμενο επαναποστολής εάν συνέβαινε σφάλμα και απόρριψη. Η τρέχουσα τιμή της $V(R)$ επίσης είναι αυτή που μπαίνει στο πεδίο $N(R)$ του εκάστοτε αποστελλόμενου πλαισίου ως επιβεβαίωση προς την απέναντι πλευρά. *(Δηλ. ενώ η $V(S)$ τροφοδοτεί τον αποστελλόμενο $N(S)$ και αυξάνει με κάθε πλαίσιο που κατεβαίνει από το στρώμα δικτύου και αποστέλλεται, η $V(R)$ τροφοδοτείται από τον αφικνούμενο $N(S)$ και τροφοδοτεί τον αποστελλόμενο $N(R)$).*
- **Χρονιστής T1.** Χρησιμοποιείται για την τήρηση του μέγιστου χρόνου αναμονής μέχρι τη λήψη επιβεβαίωσης. Με την παρέλευση αυτού του χρόνου το πλαίσιο επανεκπέμπεται. Χωρίς τον χρονιστή αυτό ο αποστολέας θα περίμενε επ' άπειρον εάν το πλαίσιο χαθεί. Η τιμή του εξαρτάται από την υλοποίηση και το μήκος της ζεύξης και έχει τιμή ολίγων δευτερολέπτων.
- **Χρονιστής T2.** Χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση ότι ο δέκτης δεν θα αργήσει να στείλει την επιβεβαίωση για ληφθέν πλαίσιο και δεν θα προκαλέσει άσκοπη επανεκπομπή λόγω εκπνοής του T1. Η χρησιμότητά του έγκειται στο ότι απελευθερώνεται από την άλλη μεριά ο δέκτης από την υποχρέωση να στείλει αμέσως επιβεβαίωση με πλαίσιο RR και περιμένει μη τυχόν εμφανισθεί από τα ανώτερα στρώματα ανάγκη αποστολής πλαισίου I . Έτσι αποφεύγεται η σπατάλη αποστολής περιττών πλαισίων αφού η υπέρθεση του $N(R)$ σε πλαίσιο πληροφορίας είναι οικονομικότερη σε κατανάλωση εύρους του καναλιού. Ο χρόνος του T1 πρέπει φυσικά να είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο του T2 συν τον χρόνο διάδοσης μετ' επιστροφής, συν τον χρόνο επεξεργασίας και στις δύο πλευρές, συν τον χρόνο εκπομπής της επιβεβαίωσης. Σε αντίθετη περίπτωση θα προκαλούνται άσκοπες επανεκπομπές.
- **Χρονιστής T3.** Μετρά τον χρόνο αδράνειας ενός καναλιού προτού το γεγονός αναφερθεί στο ανώτερο στρώμα.
- **Μέγεθος παραθύρου k .** Είναι ο μέγιστος αριθμός διαδοχικών πλαισίων που μπορεί να είναι ανεπιβεβαίωτα.
- **Μέγιστος αριθμός bits σε ένα πλαίσιο $N1$**
- **Αριθμός προσπαθειών αποστολής πλαισίου $N2$.** Η παράμετρος αυτή καθορίζει πόσες φορές θα επαναποσταλεί ένα πλαίσιο επειδή δεν λαμβάνεται επιβεβαίωση πριν να κηρυχθεί η ζεύξη ανενεργή και να ειδοποιηθεί το σύστημα διαχείρισης βλαβών.

- Αριθμός N3 διαδοχικών λήψεων πλαισίων RNR πέραν των οποίων ο ανταποκριτής θεωρείται ανενεργός (λίγες δεκάδες).

Σημειωτέον ότι οι ανωτέρω παράμετροι ισχύουν για κάθε τύπο πλαισίου. Π.χ. η εντολή SABM ή SABME θα επαναληφθεί μετά χρόνο T1 και για N2 φορές προτού ειδοποιηθεί η διαχείριση.

Η λειτουργία του μηχανισμού παραθύρου φαίνεται εποπτικά στο Σχ. 2-2. Η μεταβλητή V(S) (η οποία αριθμεί τα αποστελλόμενα πλαίσια και μπαίνει στο πεδίο N(S)) εικονίζεται πάνω σε ένα κυκλικό δίσκο αρίθμησης modulo 8 όπου επίσης σημειώνεται με βέλος και η τιμή του αφικνούμενου N(R). Το άνοιγμα των δύο βελών w δείχνει το πλήθος των μη εισέτι βεβαιωθέντων πλαισίων και δεν μπορεί να υπερβεί το μέγεθος του συμφωνηθέντος παραθύρου k (π.χ. 3 στο παράδειγμα). Υπάρχει ένα πλαίσιο έτοιμο για αποστολή στο πάνω μέρος του κάθε σταθμού, ενώ μόλις έχει ληφθεί ένα άλλο στο κάτω μέρος. Επίσης από ένα ευρίσκεται καθ' οδόν. Υπενθυμίζεται ότι η κάθε κατεύθυνση ροής πλαισίων ακολουθεί την δική της ανεξάρτητη μέτρηση. Κάθε πλαίσιο φέρει τον αριθμό N(S) που αναφέρεται στην αρίθμηση της πλευράς απ' όπου προέρχεται και τον N(R) που αναφέρεται στην αρίθμηση της απέναντι πλευράς. Κάθε πλευρά αφ' ενός τηρεί το δικό της παράθυρο και αφ' ετέρου παρέχει τις επιβεβαιώσεις για την λειτουργία του παραθύρου της απέναντι πλευράς. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τα ζεύγη των αριθμών που συσχετίζονται με το παράθυρο της κάθε πλευράς είναι ο N(S) των εκπεμπομένων πλαισίων με τον N(R) των λαμβανομένων, και, *όχι οι αριθμοί που βρίσκονται μαζί στο πλαίσιο*. Βλέπουμε στο σχήμα ότι ο αριστερά ευρισκόμενος έχει στείλει τα πλαίσια 1,2, και ετοιμάζεται να στείλει το 3 παρότι η επιβεβαίωση για το πλαίσιο υπ' αριθ. 1 δεν έχει φθάσει από τον απέναντι (είναι έτοιμη να αποσταλεί ωστόσο) και μέχρι να ληφθεί δεν θα μπορεί να αποσταλεί το πλαίσιο 4 (παράθυρο=3). Ο δεξιά ευρισκόμενος ετοιμάζεται να στείλει το υπ' αριθ. 6 πλαίσιο αφού έχει ήδη λάβει επιβεβαίωση μέχρι και για το 3 με το N(R)=4. Δηλαδή ενώ η V(S) μπαίνει στο N(S) που θα αποσταλεί, η V(R) ενημερώνεται από το N(S) που μόλις έφθασε. Ανά πάσα στιγμή το μέγεθος του παραθύρου w είναι η διαφορά του V(S) μείον τον τελευταίο αφιχθέντα N(R) που περιέχει τον V(R) του απέναντι σταθμού.

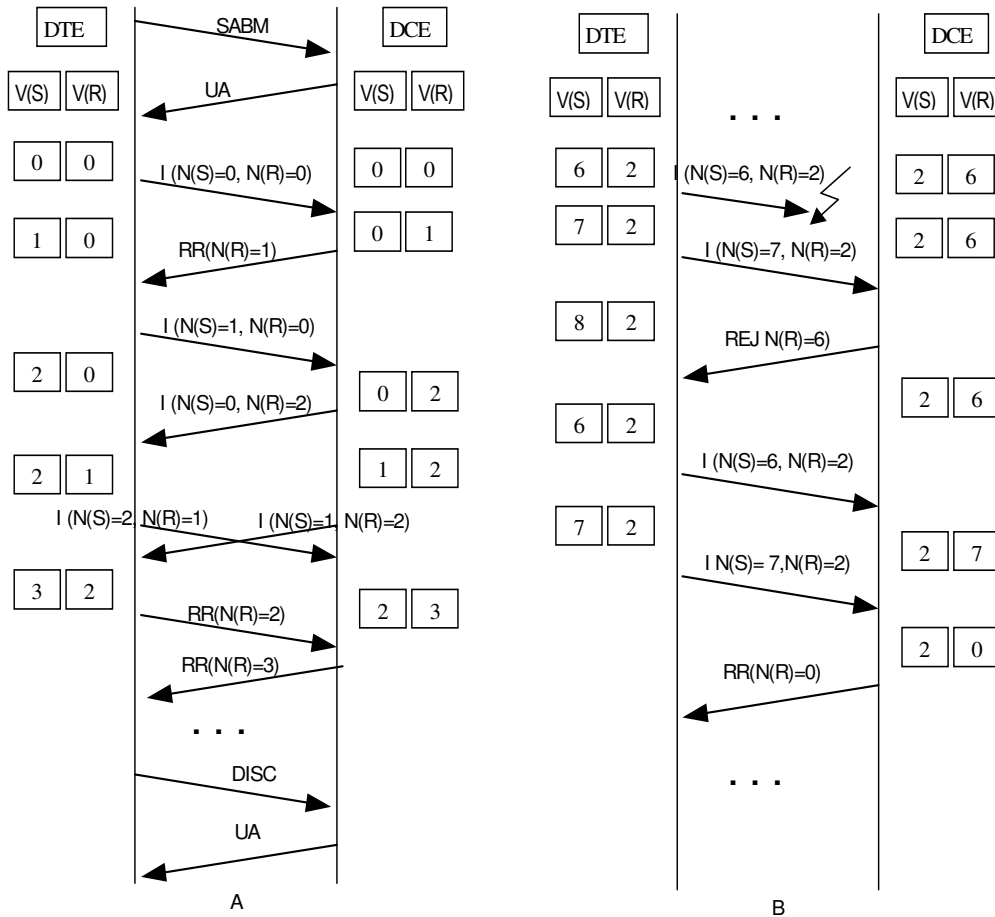


Σχήμα 2-2. Ο μηχανισμός παραθύρου ολίσθησης

Εάν για κάποιο λόγο (π.χ. πλήρης μνήμη προσωρινής αποθήκευσης) το DTE ή DCE αδυνατεί να δεχθεί πλαίσια, ειδοποιεί το άλλο μέρος με πακέτο ανετοιμότητας δέκτη (receiver not ready) RNR. Η κατάσταση αυτή (busy) αναιρείται με την αποστολή πάλι ενός πλαισίου RR με N(R) τον αριθμό του αναμενόμενου πλαισίου. **Αυτό αποτελεί και το βασικό μηχανισμό ελέγχου ροής.**

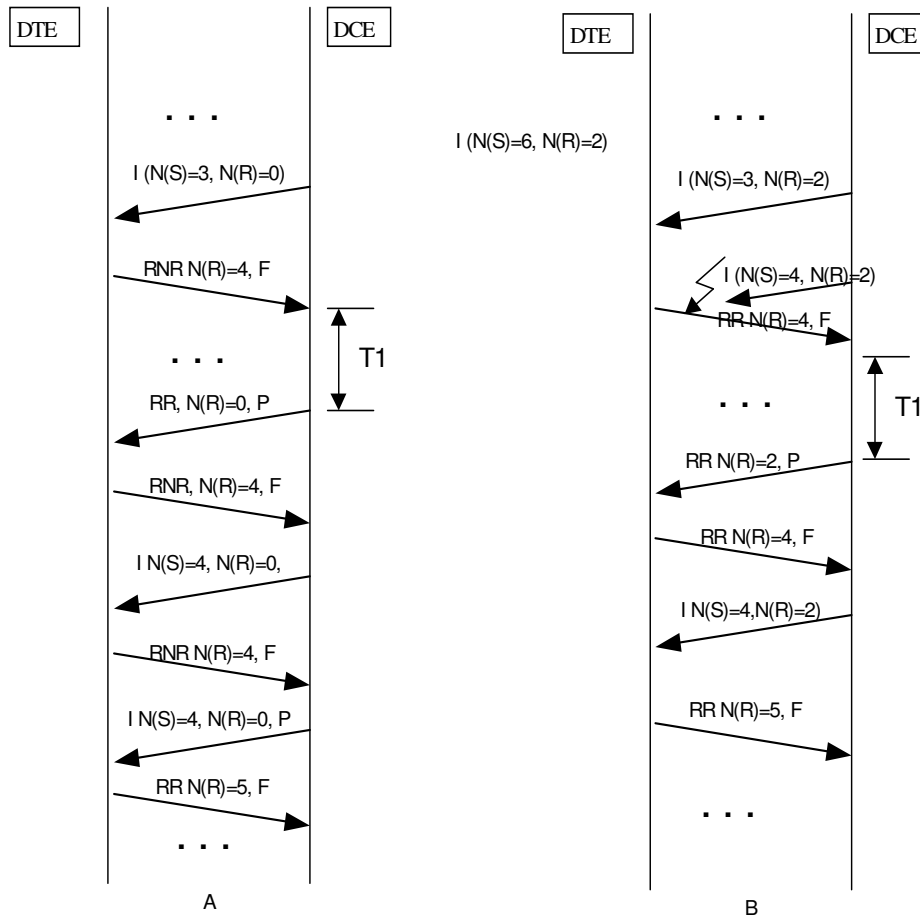
Αξιοσημείωτη είναι και η εξής περίπτωση: Η αποστολή ενός πλαισίου RR με P=1 θα προκαλέσει την αποστολή ενός πλαισίου S με F=1. Η διαδικασία αυτή λέγεται εισαγωγή σημείου ελέγχου (checkpointing). Ποια η χρησιμότητα του; Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελεγχθεί αν η ζεύξη είναι ζωντανή όταν έχει περάσει αρκετός χρόνος χωρίς να λάβουμε τίποτα, πράγμα που μπορεί να είναι φυσιολογικό εάν δεν υπήρχε τίποτα από απέναντι για αποστολή, μπορεί όμως και να μην είναι. Επίσης ένας τέτοιο σημείο ελέγχου μπορεί να επιβάλει μια βεβαιωμένη επιβεβαίωση ενός συγκεκριμένου πλαισίου πληροφορίας, ή να επιταχύνει την λήψη ενός REJ αποφεύγοντας την αναμονή μέχρι την εκπνοή του χρονιστή. Επίσης μπορεί να προετοιμάσει την αποσύνδεση της ζεύξης καθαρίζοντας εκκρεμείς επιβεβαιώσεις. Η διαδικασία αυτή είναι προαιρετική για τον υλοποιητή, δηλ. υπάρχουν υλοποιήσεις του LAPB που δεν την διαθέτουν.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του μηχανισμού παρουσιάζονται κάποια τυπικά σενάρια στα σχήματα 2-3 και 2-4. Στο σχήμα 2-3A φαίνεται ένα σενάριο ομαλής ανταλλαγής πλαισίων με τις επιβεβαιώσεις της άλλης πλευράς. Όταν κάποια πλευρά δεν έχει δεδομένα να στείλει αναγκάζεται να στείλει πακέτο επίβλεψης για να μην μπλοκάρει τον απέναντι σταθμό λόγω απουσίας θετικής επιβεβαίωσης σωστής λήψης (ACK) μέσω του αριθμού N(R). Αυτό δεν γίνεται με κάθε αφικνούμενο πλαίσιο αλλά μετά την πάροδο κάποιου χρόνου ή με την λήψη όλων των πακέτων που προβλέπονται από το παράθυρο. Στο σχήμα 2-3B φαίνεται μία περίπτωση αλλοίωσης ενός πλαισίου η οποία γίνεται αντιληπτή λόγω σωστής λήψης του επόμενου πλαισίου. (Αλλιώς ένα λάθος πλαίσιο δεν έχει αξιόπιστη αρίθμηση για να γνωρίζει ο ανταποκριτής ποίο ήτανε ώστε να στείλει πλαίσιο απόρριψης, έτσι αναγκάζεται να περιμένει μέχρι το επόμενο σωστό πλαίσιο ή την εκπνοή του χρονιστή). Στην συγκεκριμένη περίπτωση το λάθος αναγγέλλεται με πλαίσιο REJ που προκαλεί επαναποστολή και του ήδη αποσταλέντος επόμενου πακέτου. Η λειτουργία του πλαισίου REJ χαρακτηρίζεται και ως αρνητική επιβεβαίωση (NACK Negative Acknowledgement) σε αντιδιαστολή με την θετική επιβεβαίωση (ACK). Δηλαδή τα HDLC και LAPB κατατάσσονται στα πρωτόκολλα τύπου GO BACK N με θετική αποδοχή και αναμετάδοση (positive ACKnowledgement with retransmission) καθώς και αρνητική αποδοχή (negative ACK=NACK). Ως τύπου GO BACK N χαρακτηρίζονται τα πρωτόκολλα στα οποία η απόρριψη προκαλεί αναμετάδοση όλων των πλαισίων μετά το απορριπτόμενο (συμπεριλαμβανομένου). Έχουν το πλεονέκτημα ότι ο δέκτης δεν χρειάζεται να κάνει αναδιάταξη της σειράς των πλαισίων με τμήμα μία ανεπαίσθητη (όπως θα δούμε πιο κάτω στην αξιολόγηση των επιδόσεων) πτώση της αποδοτικότητας λόγω αναμετάδοσης και των σωστά ληφθέντων πλαισίων. Το ACK υλοποιείται μέσω του πλαισίου επίβλεψης RR ή με την απλή υπέρθεση του N(R) στα πλαίσια πληροφορίας. (Γι' αυτό το λόγω το N(R) πολλάκις αναφέρεται και ως ACK No). Το NACK πραγματοποιείται μέσω των πλαισίων REJ. Φυσικά η λειτουργία του NACK μπορεί να πραγματοποιηθεί εμμέσως από την απουσία ACK μέσα σε χρόνο T1 αλλά αυτό έχει το αρνητικό της απώλειας χρόνου και αποδοτικότητας. Ο έλεγχος ροής πραγματοποιείται κυρίως μέσω των πλαισίων RNR. Εμμέσως ελάττωση του ρυθμού αποστολής προκαλείται και από την αργή επιστροφή των ACK αλλά αυτός ο μηχανισμός δεν χρησιμοποιείται σκοπίμως από τον δέκτη διότι προκαλεί περιττές αναμεταδόσεις λόγω εκπνοής του χρονιστή.



Σχήμα 2-3. Σενάρια ζεύξης (A. χωρίς σφάλμα, B με σφάλμα)

Στο επόμενο σχήμα 2-4A δίδεται ένα τυπικό παράδειγμα κατάστασης κορεσμού (busy) του ανταποκριτή που βρίσκεται αριστερά (δηλ. Ο ταμιευτήρας του κοντεύει να γεμίσει) η οποία αναγγέλλεται με πλαίσιο RNR (έλεγχος ροής). Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι ο επεξεργαστής του συστήματος λήψης είναι αργός ή ότι η εφαρμογή που χρησιμοποιεί την επικοινωνία δεν μπορεί να αντεπεξέλθει στον ρυθμό αποστολής (π.χ. εκτυπωτής που απαιτεί σχετικά αργή μηχανική κίνηση.) Ο απέναντι σταθμός αναγκάζεται να σταματήσει για ένα διάστημα. Θέτει αμέσως σε ενέργεια τον μετρητή T1 και μετά την εκπνοή του χρόνου τον βολιδοσκοπεί ξανά με RR (και το bit P=1). Στην συνέχεια κατά διαστήματα T1, επιχειρεί ξανά να στείλει το επόμενο πακέτο με P=1 ενέργεια πιο αποδοτική από απλή βολιδοσκόπηση με χρήση RR διότι εάν τυχόν έχει λήξει η κατάσταση κορεσμού θα έχει σταλεί και το πακέτο με σημαντικό κέρδος χρόνου. Στην αντίθετη περίπτωση παίρνει πάλι πίσω RNR όπως εξάλλου θα είχε συμβεί εάν είχε σταλεί βολιδοσκόπηση με RR. Η κατάσταση λήγει με την αποστολή πλαισίου RR από τον έτοιμο πλέον να δεχθεί καινούργια πλαίσια αριστερά ευρισκόμενο σταθμό.



Σχήμα 2-4. Α Κατάσταση απασχολημένου τερματικού (busy)
 Β. Επανάκαμψη από σφάλμα με εκπνοή χρονιστή

Στο σχήμα 2-4B δίδεται ένα παράδειγμα όπου η χρήση του χρονιστή T1 αποτρέπει εμπλοκή του πρωτοκόλλου (timer recovery - ανάκαμψη από εκπνοή χρονιστή). Και εδώ ένα πλαίσιο αλλοιώνεται αλλά δεν είναι δυνατόν να ξέρει ο ανταποκριτής τι είδους πλαίσιο ήταν γιατί με την ανίχνευση του σφάλματος όλα τα ψηφία συμπεριλαμβανομένων και αυτών που χαρακτηρίζουν τον τύπο πλαισίου είναι ύποπτα. Έτσι δεν ξέρει με τι πλαίσιο πρέπει να αντιδράσει άρα δεν μπορεί να στείλει πακέτο REJ όπως έγινε στην περίπτωση του σχήματος 2-3β όπου είχε ακολουθήσει και άλλο πλαίσιο πληροφορίας κάνοντας σαφές ότι το προηγούμεν ήταν επίσης πλαίσιο πληροφορίας που έπρεπε να απορριφθεί. Περιμένει λοιπόν έως ότου από την άλλη μεριά ο ανταποκριτής, μετά την εκπνοή του χρονιστή T1 χωρίς άφιξη επιβεβαίωσης, προχωρήσει σε βολιδοσκόπηση (polling) με P=1. Αυτή θα τον εξαναγκάσει να στείλει την τελευταία έγκυρη επιβεβαίωση με πλαίσιο RR. Με αυτό τον τρόπο γίνεται αντιληπτή η απώλεια του προηγούμενου πλαισίου το οποίο ξαναστέλνεται και η ομαλή ροή αποκαθίσταται.

Τα ανωτέρω παραδείγματα διευκρινίζουν την λογική λειτουργίας των HDLC/LAPB πώς κατορθώνουν να πραγματοποιούν αξιόπιστες συνδέσεις εμπλουτίζοντας με υπηρεσίες διόρθωσης λαθών και ελέγχου ροής τα δεδομένα που λαμβάνουν από το φυσικό στρώμα.

Ειδικότερα τα λάθη που διορθώνονται είναι:

Transmission error (Λάθος μετάδοσης)

Ένα κατάλληλο κύκλωμα όπως αυτά του Παραρτήματος Β παράγει το FCS που καλύπτει τα πεδία διεύθυνσης, ελέγχου και δεδομένων. Το FCS (16 bits) μεταδίδεται στο τέλος του πλαισίου. Η ίδια μαθηματική λειτουργία, στην πλευρά της λήψης, επιτρέπει ανίχνευση των δυαδικών λαθών με σύγκριση του υπολογιζόμενου τοπικά FCS και του ληφθέντος. Σε κάθε περίπτωση αναντιστοιχίας το πλαίσιο αναμεταδίδεται κατόπιν αποστολής απόρριψης ή μη επιβεβαίωσης (NACK).

Frame structure error (Λάθος δομής πλαισίου)

Ο τύπος του κάθε πλαισίου ελέγχεται. Για παράδειγμα ελέγχονται :

- Το μήκος του πλαισίου αν είναι μεγαλύτερο από ή ίσο με 32 bits
- Ένα S frame δεν πρέπει να περιέχει ένα πεδίο δεδομένων
- Ο τύπος του πλαισίου, που δίδεται στο πεδίο ελέγχου, πρέπει να είναι υπαρκτός.
- Στο πεδίο διεύθυνσης υπάρχουν μόνο τιμές 00000001 ή 00000011.
- κτλ

Protocol error (Λάθος πρωτοκόλλου)

Ο διάλογος μεταξύ των τερματικών συστημάτων του δικτύου διευθύνεται από ένα σύνολο κανόνων που αποτελούν το πρωτόκολλο. Αυτό δείχνει μία σειρά καθορισμένων καταστάσεων (παράδειγμα: "idle", "dialog established", etc). Αλλαγή της κατάστασης επιτυγχάνεται μέσω καθορισμένων πλαισίων. Σε μία δεδομένη κατάσταση, ένα πλαίσιο το οποίο δεν είναι μέρος της σειράς, παράγει ένα λάθος πρωτοκόλλου. Οι παραβιάσεις πρωτοκόλλου διορθώνονται με μηχανισμούς επανεκκίνησης με χρήση μη αριθμημένων πλαισίων.

Παραβίαση χρόνου λήψης επιβεβαίωσης (Excessive acknowledgement time error)

Κάθε πλαίσιο ή εντολή που στέλνεται πρέπει να επιβεβαιώνεται μέσα σε ορισμένο χρόνο. Αλλιώς η επαναλαμβάνεται ακόμα και εάν έχει ληφθεί σωστά αφού δεν το ξέρει αυτό ο πομπός. Η χρήση χρονιστών αποφεύγει τα αδιέξοδα των πρωτοκόλλων (protocol deadlock) που θα προέκυπτε εάν κάποια απαραίτητη απάντηση δεν λαμβανόταν ποτέ.

Αποδοτικότητα πρωτοκόλλων ζεύξης

Η λεπτομερής ανάλυση των πρωτοκόλλων ζεύξης ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτού του βιβλίου. Θα δοθούν μόνο μερικές χονδρικές σχέσεις με σκοπό την περαιτέρω κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση. Θα δειχθεί πώς αυτές μπορούν να βελτιστοποιηθούν καταλήγοντας σε μια στοιχειώδη ποσοτική εκτίμηση των επιδόσεων του HDLC. Οι κυριότερες απλουστεύσεις στις οποίες καταφεύγουμε είναι ότι αγνοούμε τις αναμεταδόσεις λόγω λάθους, τον χρόνο επεξεργασίας, και την πιθανότητα σφάλματος των ACK. Επίσης θεωρούμε ότι όλα τα πλαίσια έχουν το ίδιο μήκος και η μετάδοση των ACK είναι συνεχής μέσω πλαισίων πληροφορίας της αντίθετης κατεύθυνσης. (Στην πραγματικότητα εάν ο απέναντι πομπός δεν έχει τι να στείλει δεν μπορεί να κάνει υπέρθεση οπότε θα στείλει ACK σε πλαίσιο επίβλεψης αλλά μόνο όταν έχει δεχθεί ένα ορισμένο αριθμό πλαισίων k. Αυτό το ACK θα αναφέρεται συγκεντρωτικά σε όλα τα προηγούμενα πλαίσια. Και αυτός ο αριθμός k επηρεάζει την επίδοση και πρέπει να επιλεγεί ανάλογα με την απόσταση και τον ρυθμό της ζεύξης).

Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τα πρωτόκολλα ζεύξης είναι ο ρυθμός μετάδοσης της ζεύξης, ο χρόνος διάδοσης μετ' επιστροφής μέχρι την απέναντι πλευρά, το μήκος του πλαισίου και το μήκος του παραθύρου. Ο χρόνος μετάδοσης ενός πλαισίου εκφράζεται ως το γινόμενο του χρόνου για την εκπομπή ενός bit (δηλ. το αντίστροφο του ρυθμού της ζεύξης) επί το πλήθος των bit του πλαισίου. Ο ρυθμός εξαρτάται από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ενώ η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού ή οπτικού σήματος είναι τα 2/3 της ταχύτητας του φωτός και διαφέρει πολύ λίγο από μέσο σε μέσο δηλ. είναι περίπου 200000km/s ή 2×10^8 m/s ή 5ns/m. (Για την ακρίβεια στα ομοαξονικά καλώδια η ταχύτητα είναι λίγο υψηλότερη: $2,3 \times 10^8$ m/s). Έτσι ο χρόνος διάδοσης είναι αυστηρά ανάλογος της απόστασης π.χ. για 200km είναι 1ms ενώ για μία δορυφορική ζεύξη 2x80000km είναι 0.8s.

Μεγάλη επίδραση έχει όπως θα εξηγηθεί πιο κάτω η επιλογή του μήκους του παραθύρου. Κατ' αρχήν το μήκος του παραθύρου πρέπει να είναι μικρότερο τουλάχιστον κατά ένα από το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μέγεθος αύξοντος αριθμού πλαισίων N(S) (που είναι 8 στο απλό και 128 με επέκταση στο SABME). Δηλαδή το παράθυρο δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 7 στην πρώτη και 127 στην δεύτερη περίπτωση. Αυτό είναι προφανές διότι λόγω της κυκλικής αρίθμησης (modulo 8 ή 128) δεν θα ξέρει ο πομπός εάν η αποδοχή σωστής λήψης N(R) μετά από 8 πλαίσια αναφέρεται μόνο στο πρώτο από τα 8 ή και στα 8 προηγούμενα. Αυτός είναι εξάλλου ο λόγος για την ύπαρξη της επέκτασης του N.

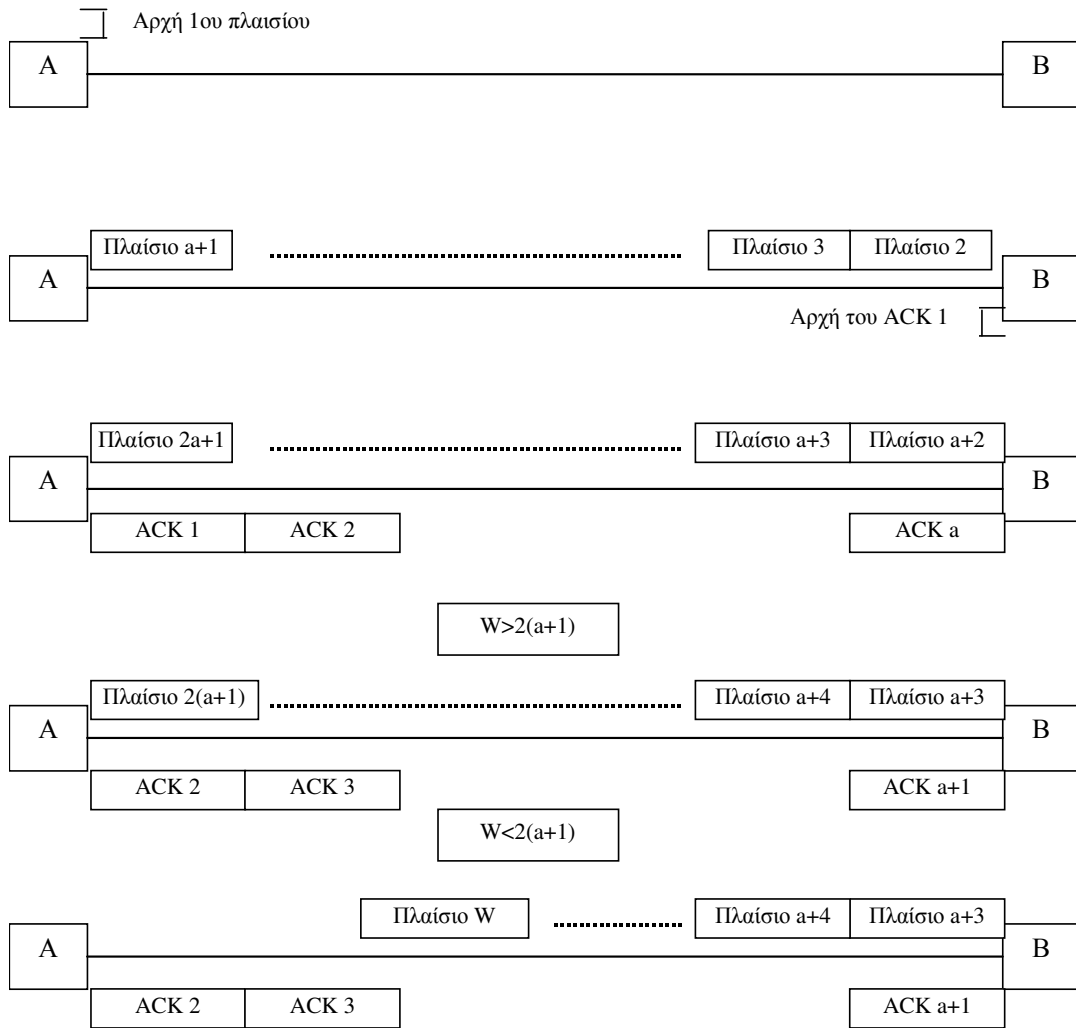
Ας εξετάσουμε κάποια ποσοτικά στοιχεία σχετικά με την απόδοση των πρωτοκόλλων ζεύξης.

Η απόδοση ορίζεται ως το πηλίκο του χρόνου μετάδοσης ωφέλιμης πληροφορίας δια του συνολικού χρόνου απασχόλησης της ζεύξης για την επιτυχή αποστολή αυτής της πληροφορίας, δηλ. συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων και του χρόνου μετάδοσης πλεονασματικής πληροφορίας. Η απόδοση πολλές φορές αναφέρεται και ως χρησιμοποίηση και ισούται με την κανονικοποιημένη παροχέτευση δηλαδή την παροχέτευση διαιρεμένη δια της χωρητικότητας της ζεύξης.

Αυτό που κυρίως επηρεάζει την απόδοση είναι ο αριθμός των πλαισίων που βρίσκονται καθ' οδόν σε σχέση με την τιμή του παραθύρου. Το a εκφράζεται από τον λόγο του χρόνου διάδοσης D προς αυτόν της μετάδοσης του πλαισίου T ($a=D/T$). Ας υποθέσουμε ότι το μέγεθος παραθύρου είναι W . Ο πομπός στέλνει W πλαίσια σε χρόνο $T \times W$ δευτερόλεπτα. Στο σχήμα 2-5 παρακολουθούμε την εξέλιξη του απλοποιημένου σεναρίου που θα βοηθήσει στην επισήμανση του ρόλου των παραμέτρων και κυρίως του μεγέθους του παραθύρου στην απόδοση των πρωτοκόλλων ζεύξης. Θεωρούμε ότι για να ξεκινήσει το πρώτο ACK από τον B σταθμό πρέπει να έχει γίνει η λήψη και του τελευταίου bit του 1ου πλαισίου οπότε έχει ολοκληρωθεί από τον πομπό A η αποστολή του πλαισίου $a+1$. Το πρώτο ACK θα έχει ληφθεί και ακαριαία υποστεί επεξεργασία όταν θα ξεκινά το πλαίσιο $2(a+1)$ μετά χρόνο $2(a+1)$ υπό τον όρο ότι δεν εξαντλήθηκε το παράθυρο. Αυτό θα συμβεί μόνο εάν ισχύει $W \geq 2(a+1)$. Στην αντίθετη περίπτωση η ζεύξη θα μείνει αχρησιμοποίητη για χρόνο $2(a+1)-W$.

Η απόδοση λοιπόν του πρωτοκόλλου GO-BACK-N είναι:

$$\begin{cases} 1 \text{ δηλ. } 100\% \text{ για } W \geq 2(a+1) \\ \frac{W}{2(a+1)} \text{ για } W < 2(a+1) \end{cases} \quad (2-1)$$

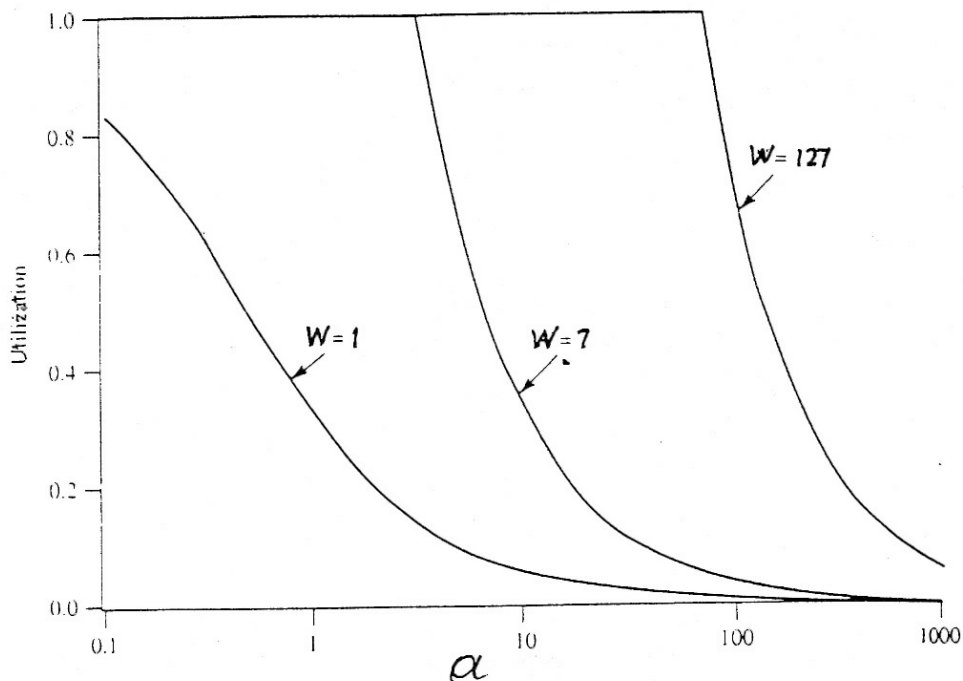


Σχήμα 2-5. Σενάριο για την μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων στην αποδοτικότητα της ζεύξης

Στο σχήμα 2-6 φαίνεται η χρησιμοποίηση (utilization) δηλ. η απόδοση της ζεύξης (το ποσοστό του χρόνου που μεταδίδει με τον ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης) για διάφορες τιμές του a και για τρεις τιμές του παραθύρου: $W=1, 7, 127$. Στην πρώτη περίπτωση το πρωτόκολλο εκφυλίζεται σε τύπου STOP-AND-WAIT το οποίο έχει μεν το πλεονέκτημα της απλότητας αλλά δεν είναι αποδοτικό παρά για πολύ βραχείες και αργές ζεύξεις. Το παράθυρο των 3bit ($W=7$) είναι κατάλληλο για πολλές ζεύξεις εκτός από τις διηπειρωτικές και τις δορυφορικές όπου χρησιμοποιείται πεδίο 7 Bit ($W=127$). Ας σημειωθεί ότι η απόδοση του πρωτοκόλλου selective repeat δεν διαφέρει σε τίποτα αφού κάναμε την απλουστευτική παραδοχή απουσίας σφαλμάτων οπότε η διαφορά στην αντιμετώπιση των αναμεταδόσεων δεν εμφανίζεται.

Για να δοθεί κάποια αίσθηση της σημασίας αυτών των ποσοτικών σχέσεων ας εξετάσουμε μερικές τυπικές τιμές. Έστω κάποια ζεύξη μήκους 20km με ρυθμό μετάδοσης 64kbps. Ας θεωρήσουμε μήκος πλαισίου 1000bits. Έχουμε $D=20\text{km}/2 \times 10^5 \text{ km/s} = 100 \times 10^{-6}$. Ο χρόνος αυτός εκπεφρασμένος σε bits είναι: $(100 \times 10^{-6}) \times (64 \times 10^3) = 6.4\text{bit}$ (δηλαδή ώσπου να μεταδοθούν 6.4 bit, το πρώτο έχει φθάσει απέναντι). Άρα το $a=D/T=6.4/100=6.4 \times 10^{-3}$. Η απόδοση λοιπόν είναι: $w/2(a+1)$ και επειδή το a είναι πολύ μικρότερο από το 1 και μπορεί να αγνοηθεί, η απόδοση είναι περίπου 50% για $w=1$ και γίνεται περίπου 100% για $w=2$ ή περισσότερο. Αν ωστόσο κάνουμε την υπόθεση ότι τα ACK επιστρέφονται με πλαίσια επίβλεψης ασήμαντου

μήκους τότε και με $w=1$ η απόδοση πλησιάζει το 100%. Στο παράδειγμα αυτό η απόσταση και ο ρυθμός είναι πολύ μικρά μεγέθη και η απόδοση κυριαρχείται από τον χρόνο ολοκλήρωσης της λήψης για την αποστολή ACK.



Σχήμα 2-6 Σύγκριση της απόδοσης πρωτοκόλλων ζεύξης (BER=0)

Ας εξετάσουμε πως μεταβάλλεται η κατάσταση σε μία οπτική ζεύξη 200km και με ρυθμό 1Gbps. Πάλι θα θεωρήσουμε μήκος πλαισίου 1000bits. Έχουμε $D=200\text{km}/2 \times 10^5 \text{ km/s} = 1 \times 10^{-3}$. Ο χρόνος αυτός εκπεφρασμένος σε bits είναι: $(1 \times 10^{-3}) \times (1 \times 10^9) = 1 \times 10^6 \text{ bit}$ (δηλαδή όσπου να φθάσει το πρώτο bit απέναντι έχουν μεταδοθεί άλλο ένα εκατομμύριο bits, δηλαδή 1000 πλαίσια. Άρα το $a=D/T=1000$. Η απόδοση λοιπόν είναι: $w/2(a+1)$ και επειδή το a είναι πολύ μεγαλύτερο από το 1 το τελευταίο μπορεί να αγνοηθεί, ήτοι η απόδοση είναι $w/2a$ και για να γίνει περίπου 100% χρειάζεται παράθυρο w άνω του 2000 (Το παράδειγμα δεν συναντάται στην πράξη και εδόθη καθαρά για να γίνει αντιληπτό το πρόβλημα. Τιμή άνω του 128 δεν υποστηρίζεται από το HDLC. Σε τόσο υψηλές ταχύτητες δεν γίνεται διόρθωση λαθών με αναμετάδοση στο στρώμα ζεύξης αλλά ακόμα και αν χρησιμοποιείται πλαισίωση HDLC η διόρθωση με αναμετάδοση αφήνεται στα πρωτόκολλα μεταφοράς στα ακραία συστήματα όπου οι ταχύτητες είναι πολύ χαμηλότερες απ' ότι στις ζεύξεις του δικτύου κορμού).

Ας προχωρήσουμε τώρα στην εξέταση της απόδοσης για την περίπτωση μη μηδενικής πιθανότητας p να συμβεί σφάλμα στο πλαίσιο οπότε θα απαιτηθεί αναμετάδοση. (Εξακολουθούμε ωστόσο να υποθέτουμε ότι σφάλματα δεν συμβαίνουν στα ACK παραδοχή που θα έχει σχετικά μικρή επίδραση στην ακρίβεια των λογαριασμών διότι απ' ενός όσα στέλνονται με πλαίσια επίβλεψης έχουν πολύ μικρότερες πιθανότητες σφάλματος λόγω του μικρού μήκους, απ' ετέρου όσα υπερτίθενται σε πλαίσια πληροφορίας τα οποία φυσικά καταστρέφονται με τις ίδιες πιθανότητες με αυτές που λογαριάζουμε αλλά η καταστροφή τους έχει σχετικά μικρότερη επίπτωση στην λειτουργία ACK απ' ότι στην κύρια λειτουργία μεταφοράς πληροφορίας και αυτό λόγω του αθροιστικού χαρακτήρα των ACK).

Η απόδοση όπως ελέγχθη ισούται με τον χρόνο μετάδοσης ωφέλιμης πληροφορίας δια του συνολικού χρόνου απασχόλησης της ζεύξης για την επιτυχή αποστολή της (δηλ.

συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων και του χρόνου μετάδοσης πλεονασματικής πληροφορίας.) Μας ενδιαφέρει μόνο η σπατάλη λόγω λαθών άρα θα ακολουθήσουμε την συλλογιστική ότι η απόδοση με λάθη είναι όση ήταν χωρίς λάθη διαιρούμενη δια του μέσου αριθμού αναμεταδόσεων. Για την εύρεση του μέσου αριθμού απαιτούμενων αναμεταδόσεων ανά πλαίσιο προχωρούμε ως εξής: Η πιθανότητα να χρειασθεί μία προσπάθεια είναι ίση με την πιθανότητα να μη συμβεί σφάλμα δηλαδή $1-p$. Η πιθανότητα να χρειαστεί δεύτερη μετάδοση είναι $p \times (1-p)$, δηλαδή να συμβεί την πρώτη και να μη συμβεί την δεύτερη. Η πιθανότητα να χρειαστεί τρίτη είναι $p^2 \times (1-p)$ και τέλος η πιθανότητα να χρειασθούν i μεταδόσεις είναι $p^{i-1} \times (1-p)$. Συνεπώς Η μέση τιμή των μεταδόσεων ανά επιτυχώς αφικνούμενο πλαίσιο είναι:

$$N = \sum_{i=1}^{\infty} p^{i-1} (1-p) = \frac{1}{1-p}$$

Με βάση αυτή την τιμή μπορούμε να βρούμε τις προσεγγιστικές εκφράσεις για το SELECTIVE REPEAT. Διαιρώντας τις εκφράσεις (2-1) δια του μέσου αριθμού αναμεταδόσεων N που ευρέθη πιο πάνω, η απόδοση γίνεται:

$1-p$ για $W \geq 2(a+1)$

$W(1-p)/2(a+1)$ για $W < 2(a+1)$

Για το GO-BACK-N χρειάζεται λίγο πιο πολύπλοκη συλλογιστική. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τώρα κάθε λάθος γεννά την ανάγκη για k αναμεταδόσεις. Αναζητούμε πάλι τον μέσο αριθμό των αναμεταδόσεων N για κάθε πλαίσιο που φθάνει επιτυχώς. Για κάθε πλαίσιο που χρειάζεται να γίνουν i αναμεταδόσεις θα πρέπει να μεταδοθούν άλλα $(i-1)k$ πλαίσια δηλαδή συνολικά $1+(i-1)k=(1-k)+ki$. Η πιθανότητα να συμβεί αυτό είναι $p^{i-1} (1-p)$. Άρα οι αναμεταδόσεις N δίδονται από:

$$N = \sum_{i=1}^{\infty} ((1-k) + ki) p^{i-1} (1-p) \quad \text{η οποία σπάει σε :}$$

$$N = (1-k) \sum_{i=1}^{\infty} p^{i-1} (1-p) + k \sum_{i=1}^{\infty} i p^{i-1} (1-p)$$

Οι σειρές αυτές συγκλίνουν σε οριακές τιμές που μπορούν να υπολογισθούν βάσει του τύπου:

$$\sum_{i=0}^{\infty} p^i = \frac{1}{1-p}$$

Που επίσης δίνει και:
$$\sum_{i=1}^{\infty} p^{i-1} = \frac{1}{1-p}$$

Και του τύπου:

$$\sum_{i=1}^{\infty} i p^{i-1} = \frac{1}{(1-p)^2} \quad \text{Καταλήγοντας στην:}$$

$$N = 1 - k + \frac{k}{1-p} = \frac{1-p+kp}{1-p}$$

Από το σχήμα 2-5 μπορούμε να δούμε ότι κατά προσέγγιση το k είναι ίσο με $2(\alpha+1)$ για $W > 2(\alpha+1)$ και $k=W$ για $W < 2(\alpha+1)$ και έτσι διαιρώντας τις σχέσεις (2-1) της άνω σφαλμάτων περίπτωσης με το ανωτέρω υπολογισθέν N καταλήγουμε για το GO-BACK-N σε:

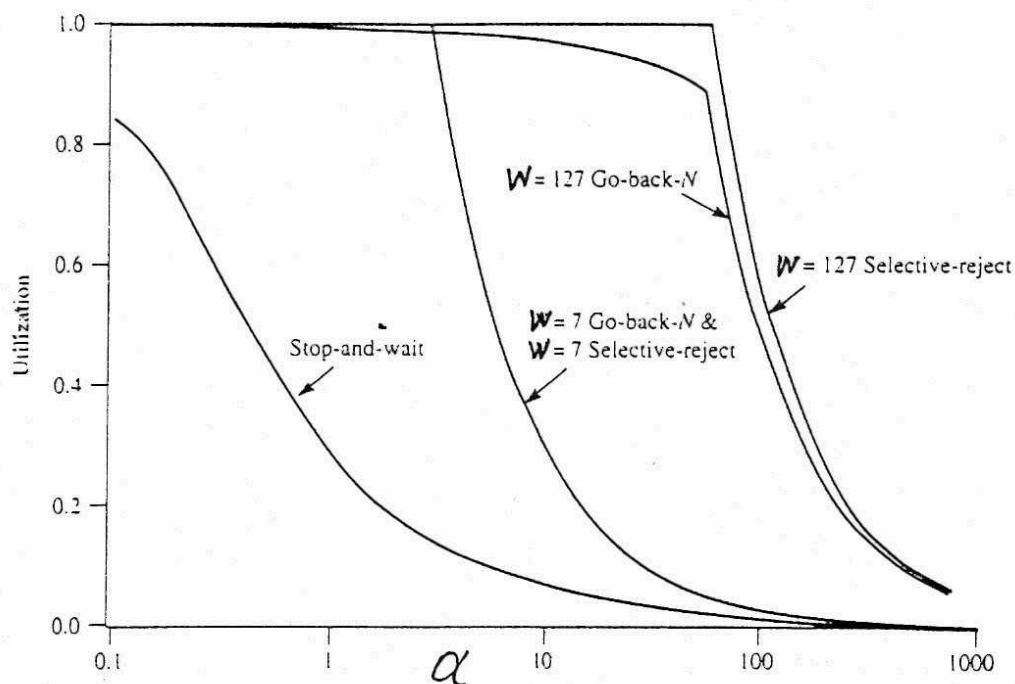
$$\begin{cases} \frac{1-p}{1+p+2ap} & \text{Για } W > 2(\alpha+1) \\ \frac{N(1-p)}{2(\alpha+1)(1-p+Wp)} & \text{Για } W < 2(\alpha+1) \end{cases}$$

Σημ. Σιωπηρά αγνοήσαμε την πιθανότητα σφαλμάτων στα αναμεταδιδόμενα k πλαίσια πράγμα που δεν είχαμε κάνει στην ανάλυση του selective repeat. Πάντως τα αναμεταδιδόμενα πλαίσια είναι κατά τάξεις μεγέθους λιγότερα μπροστά από τα πρωτο-μεταδιδόμενα και η αγνόησή τους όχι και τόσο σημαντική. Με $W=1$ (και $N=1$) παίρνουμε και από τους δύο τύπους για την απόδοση του STOP-AND-WAIT τον τύπο:

$$U = \frac{1-p}{2(\alpha+1)}$$

Για εποπτική σύγκριση εικονίζονται συγκριτικά οι καμπύλες χρησιμοποίησης (utilization) των τριών τύπων πρωτοκόλλων με σφάλματα στο σχήμα 2-7 και για $p=0.001$. Από τις καμπύλες του σχήματος φαίνεται ότι η απόδοση του selective repeat δεν είναι σημαντικά καλύτερη για $W=127$ και δεν διαφέρει καθόλου για $W=7$. Αυτό εξηγεί γιατί όλα τα διαδεδομένα στην πράξη πρότυπα είναι τύπου GO-BACK-N. Πιο ακριβής ανάλυση που λαμβάνει υπ' όψη διάφορα μεγέθη πλαισίων, τα λάθη στα ACK, στις αναμεταδόσεις κτλ., δεν δίνει μεγάλες διαφορές στην χρήσιμη περιοχή λειτουργίας διότι τα ενδεχόμενα που αγνοήσαμε είναι σπάνια και δεν επηρεάζουν σημαντικά τα μέσα μεγέθη της απόδοσης.

Παρά τις απλουστευτικές παραδοχές η ανωτέρω ανάλυση καταδεικνύει την σημασία του χρόνου διάδοσης και του ρυθμού μετάδοσης (δηλαδή του πλήθους των πλαισίων που «αποθηκεύει» η γραμμή) και την σημασία της σωστής επιλογής μεγέθους παραθύρου.



Σχήμα 2-7 Σύγκριση της απόδοσης πρωτοκόλλων ζεύξης ($BER=10^{-3}$)

Κλείνοντας την παρουσίαση της οικογένειας των πρωτοκόλλων τύπου HDLC αξίζει να παρατηρήσουμε το πόσο αποτελεσματικά εκτελούν τις απαιτούμενες λειτουργίες χρησιμοποιώντας μόνο λίγα bits πλεονασματικής πληροφορίας κατά τρόπο πολύ απλό ώστε να επιδέχεται κυκλωματική υλοποίηση μεγάλης ταχύτητας και λίγων ψηφιακών πυλών. Αυτό εξηγεί και την πλήρη κυριαρχία τους στο στρώμα ζεύξης το οποίο έχει πρωτεύοντα ρόλο στις ζεύξεις χαλκού. Στις οπτικές ζεύξεις οι υπηρεσίες του δευτέρου στρώματος χάνουν μέρος από την κρισιμότητά τους λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας τους (ρυθμοί BER της τάξεως του 10^{-9} που κάνουν εφικτή την στρατηγική της διόρθωσης λαθών μόνο στο τέταρτο στρώμα απ' άκρου εις άκρο.