

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟΥ

ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ ΜΕΣΟΥ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα βιομηχανικά δίκτυα βασίζονται στο “περιορισμένο” OSI Μοντέλο Αναφοράς τριών επιπέδων, που αποτελεί την “περιορισμένη” έκδοση του γνωστού πλήρους OSI-RM των επτά επιπέδων. Στα πλαίσια αυτού του μοντέλου αναφοράς, το υποεπίπεδο MAC, το οποίο καθορίζει επακριβώς το πρωτόκολλο προσπέλασης των σταθμών στο δίκτυο, είναι αυτό που εξασφαλίζει κατ’ αρχήν την δυνατότητα επικοινωνιακής απόκρισης σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου, στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιασθούν και θα αναλυθούν τεχνικές και μέθοδοι υλοποίησης προτύπων και μή πρωτοκόλλων επικοινωνίας υποεπιπέδου Ελέγχου Προσπέλασης Μέσου (MAC) για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

2.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ MAC-ΕΠΙΠΕΔΟΥ

Οι ορισμοί των εννοιών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και αξιολόγηση των MAC πρωτοκόλλων έχουν ως εξής:

- *Φορτίο, Απόδοση (Throughput, S)*

Ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των *επιτυχώς* μεταδιδόμενων πληροφοριακών πακέτων / μηνυμάτων στη μονάδα του χρόνου. Ουσιαστικά, εκφράζει το τμήμα του εύρους ζώνης του καναλιού που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση χρήσιμης πληροφορίας. Είναι καθαρός αριθμός και σε δίκτυα που δεν έχουν δυνατότητα ταυτόχρονων μεταδόσεων, δεν ξεπερνάει τη μονάδα ($0 < S < 1$).

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι ο ρυθμός γένεσης ή παραγωγής πληροφοριακών πακέτων / μηνυμάτων από τις επί μέρους εφαρμογές, S_{in} , θα πρέπει να είναι ίσος με το φορτίο που μεταδίδεται από το δίκτυο, S , έτσι ώστε να μη παρατηρείται κόρος στις ουρές μετάδοσης των σταθμών.

- *Συνολικό Φορτίο (Total Load, G)*

Είναι ο ρυθμός της συνολικά μεταδιδόμενης (*επιτυχημένα και μή*) πληροφορίας στο επικοινωνιακό κανάλι. Εκφράζεται σε πακέτα (μηνύματα) /sec και μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.

- *Χωρητικότητα Πρωτοκόλλου (Capacity, $C_{protocol}$)*

Είναι η μέγιστη τιμή του S ($C_{protocol} = \text{Max}(S)$) που μπορεί να προσφέρει ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο MAC-επιπέδου.

- *Καθυστέρηση Ουράς (Queueing Delay, D_q):*
Είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή της δημιουργίας ενός πακέτου / μηνύματος από μία εφαρμογή και την είσοδο του στην τελευταία κενή θέση της ουράς μετάδοσης του αντίστοιχου κόμβου, έως την στιγμή που το πακέτο / μήνυμα αυτό θα φθάσει στη πρώτη θέση της ουράς, οπότε και θα αρχίσει η διαδικασία μετάδοσης του.
- *Καθυστέρηση Εξυπηρέτησης (Service Delay, D_s):*
Είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη χρονική στιγμή της άφιξης του πακέτου / μηνύματος στη πρώτη θέση της ουράς μετάδοσης, έως τη στιγμή που θα αρχίσει η επιτυχής μετάδοση του στο κανάλι επικοινωνίας, κάτι που επιτυγχάνεται από την εξυπηρέτηση που προσφέρει το MAC πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται.
- *Καθυστέρηση Πακέτου / Μηνύματος (Packet / Message Delay, D):*
Είναι το χρονικό διάστημα από τη χρονική στιγμή της δημιουργίας ενός πακέτου έως το τέλος της επιτυχούς μετάδοσής του. Στην περίπτωση της μεταγωγής πακέτου, το D δίνεται συνήθως σε κανονικοποιημένη μορφή, ως προς τον απαιτούμενο χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου / μηνύματος. Είναι προφανές ότι ισχύει $D=D_q+D_s+P_s$, όπου $P_s=B_l/W$ και B_l ο συνολικός αριθμός bits στο μεταδιδόμενο πληροφοριακό πακέτο / μήνυμα, W = το εύρος ζώνης του καναλιού.
- *Φράγμα Καθυστέρησης (Delay Bound):*
Είναι ένας όρος που δηλώνει την ύπαρξη άνω ορίου για την καθυστέρηση D .

Από αυτό το σημείο θα αναφερόμαστε μόνο σε πληροφοριακά πακέτα σταθερού μήκους P_s , δεδομένου ότι η τεχνική μεταγωγής πακέτου θεωρείται επικρατούσα σε σχέση με αυτήν της μεταγωγής μηνύματος.

Τα βασικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη σχεδίαση ενός MAC πρωτοκόλλου είναι συνοπτικά τα εξής:

- *Το είδος των εφαρμογών που θα υποστηριχθούν:*
Αρχικά, πρέπει να προσδιοριστούν όλες οι πιθανές εφαρμογές που θα τρέχουν στο δίκτυο, ώστε να γίνει μία εκτίμηση των απαιτήσεων ως προς το εύρος ζώνης καναλιού, το μέγιστο μήκος δικτύου, το μέγιστο αριθμό σταθμών, το είδος και το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων, το μέγιστο επιτρεπτό χρόνο καθυστέρησης πακέτου, κ.λ.π. Επίσης, οι πιθανές εφαρμογές δίνουν τον χαρακτηρισμό της μορφής της κίνησης, δηλ. σταθερό ή καταϊγιστικό φορτίο, φορτίο πραγματικού ή μη χρόνου κλπ.
- *Αξιολόγηση της συμπεριφοράς του πρωτοκόλλου για όλο το εύρος των εφαρμογών:*
Η απόδοση ενός πρωτοκόλλου για συμβατικές δικτυακές εφαρμογές δεδομένων, εκτιμάται συνήθως ως προς τη χωρητικότητα και τη σχέση του φορτίου ως προς τη μέση καθυστέρηση πακέτου. Αντίθετα, ένα πρωτόκολλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου υπόκειται σε αυστηρότερους περιορισμούς, που εντοπίζονται κυρίως στο μέγιστο χρόνο απόκρισης και στην ύπαρξη δικτυακής κίνησης με διαφορετικές προτεραιότητες. Έτσι, όπως ήδη αναφέρθηκε, η κίνηση αυστηρού πραγματικού χρόνου προϋποθέτει ένα ανώτατο όριο στη μετάδοση κάθε πακέτου, ενώ η μετάδοση πακέτων χαμηλότερης προτεραιότητας, απαιτεί κατά βάση μία όσο το δυνατόν βέλτιστη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση γι' αυτό το είδος της κίνησης. Συνεπώς, η αξιολόγηση πρωτοκόλλων πραγματικού χρόνου πρέπει να γίνεται ως προς τη σχέση φορτίου - μέγιστης καθυστέρησης πακέτου, για υψηλής προτεραιότητας πακέτα, παρά ως προς τις μέσες τιμές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της κίνησης χαμηλής προτεραιότητας.

- *Η απαίτηση για ύπαρξη κεντροποιημένου ή κατανεμημένου ελέγχου:*
Όπως ήδη έχει αναφερθεί οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόφαση για ύπαρξη κεντροποιημένου ή κατανεμημένου ελέγχου είναι κυρίως η αξιοπιστία λειτουργίας, η εξασφάλιση ντετερμινιστικής απόκρισης και η απλότητα υλοποίησης.
- *Παράγοντες σχετικοί με την ευκολία υλοποίησης, τον τρόπο διαχείρισης της εισόδου / εξόδου σταθμών στο δίκτυο, τους αλγορίθμους χειρισμού των λαθών, την αξιοπιστία λειτουργίας, κ.λ.π.:*
Όλοι αυτοί οι παράγοντες δεν έχουν εμφανή επίδραση στην απόδοση του πρωτοκόλλου με βάση τα κριτήρια που αναλύθηκαν παραπάνω, γιατί η εκτίμηση της απόδοσης, με αναλυτικές μεθόδους ή με εξομοίωση, στηρίζεται στην υπόθεση της σταθερής κατάστασης (steady-state). Είναι όμως σημαντικοί, όταν υπάρχει η απαίτηση της συνολικά υψηλής απόδοσης κάτω από όλες τις συνθήκες λειτουργίας του δικτύου.

2.3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ MAC-ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟΥ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η διαχείριση της προσπέλασης στο μέσο επικοινωνίας επιτελείται από το MAC - υποεπίπεδο του επιπέδου DLL. Τα διάφορα MAC πρωτόκολλα, πραγματικού και μή χρόνου, μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε γενικές κατηγορίες, ανάλογα με την φιλοσοφία προσπέλασης του καναλιού επικοινωνίας. Οι κατηγορίες αυτές περιγράφονται συνοπτικά στην συνέχεια.

1. Πρωτόκολλα Τυχαίας Προσπέλασης του Καναλιού (Random Access Protocols)

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα πρωτόκολλα που παρέχουν ολόκληρο το εύρος του καναλιού στους χρήστες, οι οποίοι μεταδίδουν οποτεδήποτε έχουν

ένα πακέτο για μετάδοση (ALOHA) ή υπακούουν σε απλούς κανόνες ανίχνευσης του καναλιού πριν τη μετάδοση (Carrier Sense Multiple Access).

2. *Πρωτόκολλα Σταθερής Ανάθεσης του Καναλιού (Fixed Assignment Protocols)*

Τα πρωτόκολλα της κατηγορίας αυτής αναθέτουν το εύρος ζώνης (bandwidth) του καναλιού στους χρήστες με ένα στατικό τρόπο που είναι ανεξάρτητος της δραστηριότητάς τους. Τα πιο γνωστά από αυτά τα πρωτόκολλα είναι το TDMA (Time Division Multiple Access) και το FDMA (Frequency Division Multiple Access).

3. *Πρωτόκολλα Αίτησης Ανάθεσης του Καναλιού με Κεντρικοποιημένο Ελεγχό (Demand Assignment Protocols with Central Control)*

Οι δύο κατηγορίες πρωτοκόλλων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, αντιπροσωπεύουν τα δύο άκρα στον τρόπο ανάθεσης του εύρους ζώνης ενός καναλιού επικοινωνίας. Στο ένα άκρο υπάρχουν τα πρωτόκολλα σταθερής ανάθεσης που δεν προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των χρηστών και δεν κάνουν καλή χρήση του εύρους καναλιού όταν το φορτίο που δημιουργείται από τα πληροφοριακά πακέτα είναι χαμηλό και καταϊγιστικής μορφής.

Στο άλλο άκρο ευρίσκονται τα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης, που είναι εύκολο να υλοποιηθούν, ακολουθούν τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των χρηστών, αλλά δεν κάνουν καλή χρήση του καναλιού όταν ο ρυθμός των συνολικών μεταδόσεων αυξηθεί λόγω των συγκρούσεων από ταυτόχρονες μεταδόσεις πακέτων.

Τα πρωτόκολλα αυτής της τρίτης κατηγορίας βρίσκονται μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων κατηγοριών. Στα κεντρικοποιημένα δίκτυα, η ανάθεση του καναλιού σε κάποιο σταθμό γίνεται μόνο αφού ο συγκεκριμένος σταθμός απαιτήσει με κάποιους κανόνες το κανάλι για μετάδοση. Οι διαδικασίες ανάθεσης του καναλιού μπορεί να γίνουν είτε με polling τεχνικές, όπου ένας

κεντρικός σταθμός "ρωτάει" τους χρήστες αν έχουν κάποιο πακέτο για μετάδοση, ή με τεχνικές "κράτησης" (reservation) όπου ο κάθε χρήστης μπορεί να ζητήσει το κανάλι για αποστολή πληροφοριακού πακέτου. Και στις δύο περιπτώσεις, η ανάθεση του καναλιού στους χρήστες γίνεται από ένα κεντρικό σταθμό.

4. Πρωτόκολλα Αίτησης Ανάθεσης του Καναλιού με Κατανεμημένο Ελεγχο (*Demand Assignment Protocols with Distributed Control*)

Τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα αντίστοιχα κεντροποιημένου ελέγχου. Η μεγαλύτερη αξιοπιστία προκύπτει από το γεγονός ότι οι διαδικασίες ελέγχου της προσπέλασης δεν υλοποιούνται από ένα κεντρικό σταθμό αλλά από όλους τους σταθμούς, με αποτέλεσμα να μην εξαρτάται η λειτουργία ολόκληρου του δικτύου από ένα μοναδικό σταθμό (single point of failure). Σε όλα τα πρωτόκολλα κατανεμημένου ελέγχου, υπάρχει η ανάγκη ανταλλαγής (σαφώς ή ασαφώς) πληροφορίας ελέγχου μεταξύ των σταθμών έτσι ώστε, εκτελώντας όλοι τον ίδιο αλγόριθμο, να μπορούν να συντονίσουν τον τρόπο προσπέλασης στο κανάλι.

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται όλα τα πρωτόκολλα που βασίζονται στην τεχνική του 'κουπονιού', στα οποία το δικαίωμα προσπέλασης παραχωρείται διαδοχικά από σταθμό σε σταθμό μέσω ενός ειδικού πακέτου ελέγχου ή "κουπονιού" (token) ή ενός χρόνου που αντικαθιστά το ειδικό αυτό πακέτο.

5. Προσαρμοζόμενα Πρωτόκολλα (*Adaptive Protocols*)

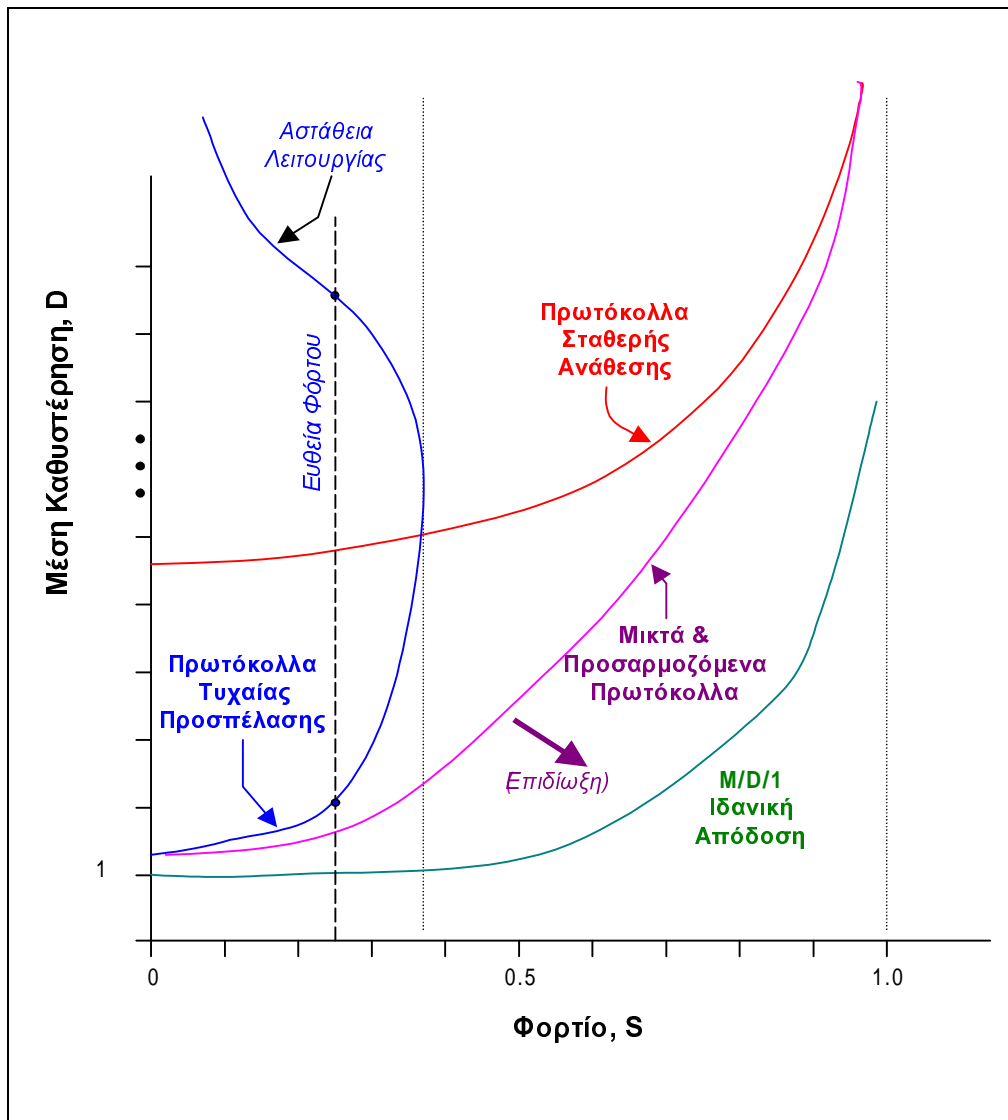
Είναι τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν τεχνικές προσπέλασης οι οποίες αλλάζουν σύμφωνα με το φορτίου του καναλιού και δεν υπάγονται ρητώς σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες. Τα πρωτόκολλα αυτά προσαρμόζονται στα μεταβαλλόμενα φορτία του δικτύου και συνήθως χρησιμοποιούν απλές τεχνικές τυχαίας προσπέλασης στα χαμηλά φορτία, σε συνδυασμό με

τεχνικές σταθερής ανάθεσης του καναλιού στα υψηλά φορτία, με σκοπό τη βέλτιστη απόδοση σε όλο το φάσμα των φορτίων. Λόγω της συνδυασμένης χρήσης τυχαίων και σταθερών τεχνικών προσπέλασης, τα πρωτόκολλα αυτά ονομάζονται και υβριδικά ή μικτά πρωτόκολλα.

Στο Σχ.2.1 παρουσιάζεται γενικά η απόδοση διαφόρων κατηγοριών πρωτοκόλλων. Στις επόμενες παραγράφους για λόγους πληρότητας θα περιγραφούν αφ' ενός ευρέως διαδεδομένα MAC πρωτόκολλα για τοπικά δίκτυα τοπολογίας δικατευθυντήριου απλού διαύλου, όπως τα πρότυπα MAC πρωτόκολλα CSMA/CD και Token Passing Bus και τα γνωστά de-facto πρότυπα πρωτόκολλα TDMA και Polling και αφ' ετέρου ειδικά MAC πρωτόκολλα σχεδιασμένα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

2.4. ΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ 1-persistent CSMA/CD ΚΑΙ TOKEN PASSING BUS

Τα πρότυπα πρωτόκολλα IEEE 802.3 1-persistent CSMA/CD και IEEE 802.4 Token Passing Bus αποτελούν σήμερα την βασική αναφορά για τις τεχνικές προσπέλασης τοπικών δικτύων. Τα πρωτόκολλα αυτά έχουν συμπληρωματική συμπεριφορά και απόδοση δεδομένου ότι το IEEE 802.3 ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων τυχαίας προσπέλασης του καναλιού, ενώ το IEEE 802.4 είναι ένα πρωτόκολλο αίτησης ανάθεσης του καναλιού με καταναμεμημένο έλεγχο.



Σχ.2. 1. Ενδεικτικές χαρακτηριστικές καμπύλες απόδοσης φορτίου – μέσης καθυστέρησης (S-D) διαφόρων κατηγοριών MAC πρωτοκόλλων

2.4.1.ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ 1-PERSISTENT CSMA/CD (IEEE 802.3)

Ο αλγόριθμος μετάδοσης πακέτου σύμφωνα με το πρότυπο 1-persistent CSMA/CD (IEEE 802.3) πρωτόκολλο βασίζεται στην τεχνική p-persistent CSMA/CD με $p=1$ και συνίσταται από τα παρακάτω βήματα:

- Ο χρόνος του καναλιού χωρίζεται σε χρονικές σχισμές (time slots) με εύρος ίσο με την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση διάδοσης του φυσικού μέσου επικοινωνίας.
- Κάθε σταθμός που έχει ένα πακέτο προς αποστολή, αρχίζει την διαδικασία μετάδοσης αφού συγχρονισθεί με την αρχή της επόμενης χρονικής σχισμής.
- Ο σταθμός παρακολουθεί το κανάλι κατά την διάρκεια αυτής της χρονικής στιγμής, υλοποιώντας στην ουσία μια διαδικασία (αρνητικής) ανάδρασης .
- Εάν ο σταθμός διαπιστώσει ότι το κανάλι είναι αδρανές μεταδίδει το πακέτο του με πιθανότητα $p=1$. Εάν και κάποιος άλλος σταθμός ενεργώντας κατά τον ίδιο τρόπο μεταδώσει το πακέτο του τότε θα υπάρξει σύγκρουση. Στην περίπτωση αυτή οι σταθμοί τερματίζουν τις μεταδόσεις τους στέλνοντας ένα ειδικό σήμα (Jam signal) για να γνωστοποιήσουν την σύγκρουση στο δίκτυο. Τα πακέτα που συγκρούστηκαν πρέπει να αναμεταδοθούν σύμφωνα με ένα back-off αλγόριθμο αναμετάδοσης. Συγκεκριμένα, το κάθε πακέτο που συγκρούστηκε θα μεταδοθεί μετά από ένα ακέραιο πολλαπλάσιο, r , του SlotTime (=512 bit times). Ο αριθμός r επιλέγεται ως ένας ομοιόμορφα κατανομημένος τυχαίος ακέραιος στην περιοχή $0 < r \leq 2^n$, όπου $n = \min(c, 10)$ και c ο αύξων αριθμός της προσπάθειας αναμετάδοσης του συγκεκριμένου πακέτου. Μετά από αυτό το διάστημα το σταθμός επαναλαμβάνει το αλγόριθμο για την μετάδοση του πακέτου.

Σημειώνεται ότι η σύγκρουση αναγνωρίζεται από τους σταθμούς σε ένα χρόνο CDT (collision detection time), που είναι γενικά μικρότερος από το εύρος του πληροφοριακού πακέτου, με αποτέλεσμα να σταματά τότε η μετάδοση των συγκρουόμενων πακέτων και έτσι να μειώνεται η απώλεια εύρους ζώνης.

- Εάν ο σταθμός διαπιστώσει την ύπαρξη σήματος φορέα στο κανάλι δεν μεταδίδει το πακέτο του, δεδομένου ότι υπάρχει ήδη κάποια μετάδοση στο κανάλι. Στην περίπτωση αυτή, ο σταθμός συνεχίζει να παρακολουθεί το κανάλι για να διαπιστώσει πότε αυτό θα επανέλθει στην αδράνεια, οπότε και επαναλαμβάνει τον αλγόριθμο μετάδοσης.

Τα αποτελέσματα της μελέτης της συμπεριφοράς του πρωτοκόλλου αυτού μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Το πρωτόκολλο έχει πολύ καλή απόδοση ως προς τη σχέση φορτίου - μέσης καθυστέρησης πακέτου, για χαμηλά φορτία και σχετικά μικρή τιμή του λόγου χρόνου διάδοσης του καναλιού προς μέγεθος πακέτου ($a = \tau/P_s$), ακόμα και για πολλούς σταθμούς. Εντούτοις, στα μεσαία και υψηλά φορτία, η στατιστική συμπεριφορά του πρωτοκόλλου, οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της μέσης καθυστέρησης πακέτου και μείωση του αποδοτικού φορτίου (αστάθεια λειτουργίας).
- Το CSMA/CD μπορεί να λειτουργήσει σε δίκτυα ελαστικού πραγματικού χρόνου, χωρίς καμία τροποποίηση στον αλγόριθμο προσπέλασης και λύσης της σύγκρουσης, εφ' όσον το φορτίο δεν ξεπερνάει μία ανώτατη τιμή που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η τιμή αυτή είναι το οριακό σημείο, μετά το οποίο η μέση καθυστέρηση των πακέτων αυξάνεται τόσο που οδηγεί σε μη ορθή λειτουργία της εφαρμογής.
- Η χρήση του CSMA/CD σε δίκτυα αυστηρού πραγματικού χρόνου είναι απαγορευτική λόγω της μη ντετερμινιστικής συμπεριφοράς του πρωτοκόλλου. Συγκεκριμένα, η λύση της σύγκρουσης μεταξύ δύο ή περισσότερων σταθμών γίνεται με ένα back-off αλγόριθμο ο οποίος δεν εγγυάται την μετάδοση πακέτου μέσα σε ένα μέγιστο χρονικό όριο. Συνεπώς, υπάρχει η πιθανότητα ένα πακέτο να υποστεί ανεπίτρεπτα μεγάλη καθυστέρηση στη μετάδοσή του,

ενώ η μέση συνολική καθυστέρηση όλων των πακέτων να βρίσκεται κάτω από το κρίσιμο οριακό σημείο. Με άλλα λόγια, το CSMA/CD είναι ένα πρωτόκολλο που δεν εγγυάται φραγμένη καθυστέρηση πακέτου. Παρ' όλα αυτά, το πρωτόκολλο CSMA/CD χρησιμοποιείται ως το MAC πρωτόκολλο του γνωστού δικτύου πεδίου LON (LonTalk), με μια τροποποίηση του back-off αλγορίθμου που εξασφαλίζει ένα βαθμό προσαρμοστικότητας του πρωτοκόλλου στο μεταβαλλόμενο φορτίο του καναλιού. Η προσαρμοστικότητα αυτή εξασφαλίζεται με την δυνατότητα του πρωτοκόλλου να "προβλέπει" το αναμενόμενο φορτίο του καναλιού και ανάλογα να μεταβάλλει δυναμικά την πιθανότητα μετάδοσης p του πακέτου αν το κανάλι είναι αδρανές. Η αναλυτική περιγραφή αυτού του τροποποιημένου p -persistent CSMA/CD πρωτοκόλλου θα γίνει στην Παρ.2.6.2.1.

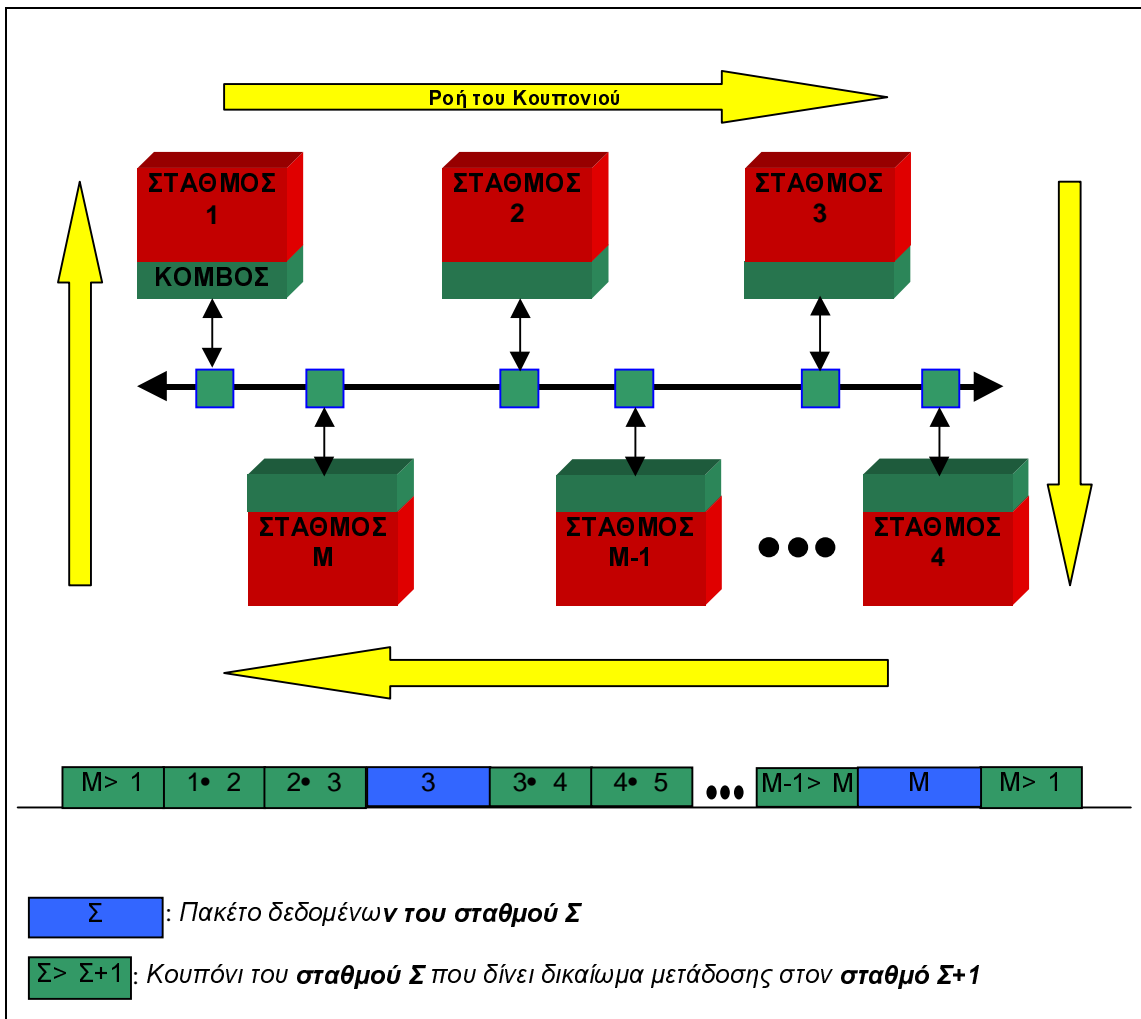
- Το CSMA/CD δεν παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης κίνησης με διαφορετικές προτεραιότητες. Συνεπώς, η ταυτόχρονη διεκπεραίωση κίνησης διαφορετικών απαιτήσεων (πχ. δεδομένα / φωνή) προϋποθέτει τροποποιήσεις στον αλγόριθμο προσπέλασης ή / και στον αλγόριθμο λύσης των συγκρούσεων.

2.4.2. ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ TOKEN PASSING BUS (IEEE 802.4)

Το Token Passing Bus (IEEE 802.4) πρωτόκολλο ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων αίτησης ανάθεσης του καναλιού με καταναμημένο έλεγχο. Σύμφωνα με αυτό, η προσπέλαση των σταθμών στο κανάλι επιτυγχάνεται μέσω ενός ειδικού πακέτου ελέγχου ή "κουπονιού", το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο σταθμό που το κατέχει, να μεταδώσει ένα ή περισσότερα πακέτα. Μετά τη λήξη του χρόνου που έχει ανατεθεί στο συγκεκριμένο σταθμό ή το τέλος της μετάδοσης όλων των πακέτων που περιμένουν στην(ις) ουρά(ες) του σταθμού, το κουπόνι περνάει κυκλικά στον επόμενο σταθμό του δικτύου, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός λογικού δακτυλίου, όπως φαίνεται στο Σχ.2.2.

Το πρωτόκολλο αυτό, σε αντίθεση με το CSMA/CD, υποστηρίζει προτεραιότητες. Η προτεραιότητα κάθε πακέτου περνάει από το LLC στο MAC υπο-επίπεδο ταυτόχρονα με το προς μετάδοση πακέτο. Το MAC υπο-επίπεδο προσφέρει τέσσερα επίπεδα προτεραιοτήτων, που ονομάζονται τάξεις προσπέλασης (*access_classes*) και είναι τα 0, 2, 4, 6, με το 0 να αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη και το 6 στη χαμηλότερη προτεραιότητα. Σε κάθε επίπεδο προτεραιότητας υπάρχει μία διαφορετική ουρά πακέτων προς μετάδοση. Κάθε τάξη προσπέλασης λειτουργεί, ουσιαστικά, σαν ένας διαφορετικός υποσταθμός, αφού το token περνάει διαδοχικά από όλες τις ουρές πακέτων (0-6) πριν μεταδοθεί προς τον επόμενο σταθμό.

Σύμφωνα με αυτόν τον μηχανισμό προτεραιοτήτων, όταν ένας σταθμός λάβει το token, επιτρέπεται να μετάδοση πακέτα της μέγιστης προτεραιότητάς του, για χρόνο που δε θα υπερβαίνει το *hi_pri_token_hold_time* (T_s), που έχει καθοριστεί από το επίπεδο διαχείρισης του σταθμού (*station management*). Ο χρόνος αυτός εμποδίζει τη μονοπώληση του καναλιού από ένα σταθμό. Μετά τη μετάδοση των πακέτων της μέγιστης προτεραιότητας, αρχίζει η εξυπηρέτηση της επόμενης τάξης προσπέλασης. Σε κάθε μία από τις υπόλοιπες τρεις χαμηλότερες τάξεις προσπέλασης έχει ανατεθεί ένας *target_rotation_time*. Για κάθε τάξη προσπέλασης, ο σταθμός μετράει το χρόνο περιστροφής του token στο λογικό δακτύλιο. Αν το token επιστρέψει στην ουρά, σε χρόνο λιγότερο από το *target_rotation_time*, ο σταθμός επιτρέπεται να μετάδοση πακέτα της συγκεκριμένης τάξης προσπέλασης έως ότου λήξει ο *target_rotation_time*. Αν ο χρόνος αυτός λήξει πριν το token ληφθεί από τη συγκεκριμένη τάξη προσπέλασης, ο σταθμός δεν επιτρέπεται να στείλει πακέτα αυτής της τάξης.



Σχ.2. 2. Ο λογικός δακτύλιος του δικτύου Token Bus με M σταθμούς

Το τμήμα του εύρους ζώνης που παραχωρείται σε κάθε τάξη και η καθυστέρηση που υπόκεινται τα πακέτα μίας τάξης, εξαρτώνται από τους $hi_pri_token_hold_times$ και $target_rotation_times$ των διαφορετικών τάξεων. Εντούτοις, σε ένα συμμετρικό δίκτυο, κάτω από όλα τα πιθανά φορτία, μόνο δύο τάξεις προσπέλασης έχουν εγγυημένο εύρος ζώνης, δηλαδή η τάξη της μέγιστης προτεραιότητας και η τάξη με το υψηλότερο $target_rotation_time$.

Το Token Bus έχει γίνει ευρέως αποδεκτό, ως πρότυπο για δίκτυα πεδίου εργοστασιακού περιβάλλοντος, κυρίως λόγω της σταθερότητας, της αξιοπιστίας και της δυνατότητάς του για υποστήριξη κίνησης με διαφορετικές προτεραιότητες. Η χρήση του σε βιομηχανικά δίκτυα, όπως το MAP (Manufacturing Automation Protocol), το MiniMAP και το PROFIBUS (για την επικοινωνία των κύριων κόμβων), καταδεικνύει την καταλληλότητά του για βιομηχανικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Όμως το πρωτόκολλο Token Bus έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, τα βασικότερα των οποίων είναι:

- Σχετικά υψηλή απώλεια εύρους ζώνης (overhead) ειδικά σε χαμηλά φορτία, λόγω της περιστροφής του κουπονιού σε όλους τους σταθμούς, ανεξαρτήτως αν είναι ενεργοί ή αδρανείς, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη καθυστέρηση στη μετάδοση των πακέτων, συγκριτικά με τα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης, ειδικά αν το μήκος του πακέτου δεδομένων είναι μικρό.
- Πολύπλοκοι αλγόριθμοι για την είσοδο και έξοδο σταθμών στο δίκτυο, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη σχετική απώλεια εύρους ζώνης και δεν επιτρέπουν άμεση προσπέλαση στο μέσο μετάδοσης, όπως συμβαίνει στα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης.
- Η εξάρτηση της προσπέλασης από την κατοχή του token οδηγεί σε περιόδους "απροσπελασιμότητας" (inaccessibility periods), οποτεδήποτε υπάρξει απώλεια ή πολλαπλότητα του κουπονιού. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη τιμή καθυστέρησης στη μετάδοση ενός πακέτου μπορεί να υπερβεί τη μέγιστη θεωρητική τιμή, η οποία έχει υπολογιστεί για τη σταθερή λειτουργία του δικτύου.

2.4.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ CSMA/CD ΚΑΙ TOKEN PASSING BUS

Τα δύο πρότυπα πρωτόκολλα έχουν συμπληρωματική συμπεριφορά. Το καθένα υπερέρχει σε συγκεκριμένα σημεία, που το διαφοροποιούν ως προς το εύρος των εφαρμογών που μπορεί να υποστηρίξει. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι:

- Το CSMA/CD (IEEE 802.3):
 - Είναι απλό στην υλοποίησή του.
 - Δεν απαιτεί ειδικούς αλγόριθμους εισόδου / εξόδου των σταθμών στο / από το δίκτυο.
 - Έχει χαμηλότερη καθυστέρηση (συγκριτικά με τα ντετερμινιστικά πρωτόκολλα όπως το Token Bus) στο μικρό φορτίο, δηλαδή ισχύει,

$$Mean(D_{csma}) \rightarrow 1 \text{ για } S \rightarrow 0 \quad (2.1)$$

- Όταν το φορτίο αυξάνεται η καθυστέρηση πακέτου δεν έχει προβλέψιμη (ντετερμινιστική) συμπεριφορά λόγω των αυξανόμενων συγκρούσεων και η χωρητικότητα του πρωτοκόλλου είναι μειωμένη, δηλαδή $C_{csma} < 1$.
 - Η απόδοσή του παρουσιάζει σημαντική μείωση με την αύξηση της καθυστέρησης διάδοσης του καναλιού επικοινωνίας του δικτύου ή / και τη μείωση του μήκους των πακέτων.
 - Δεν υποστηρίζει προτεραιότητες
- Το Token Bus (IEEE 802.4):
 - Απαιτεί πολύπλοκους αλγόριθμους για την είσοδο / έξοδο σταθμών και για τη διαχείριση λαθών.
 - Έχει μεγάλη καθυστέρηση σε μικρά φορτία, δηλαδή ισχύει,

$$Mean(D_{token}) \rightarrow (M/2) * (T_t/P_s) + 1 \text{ για } S \rightarrow 0 \quad (2.2)$$

όπου T_t και P_s οι χρόνοι μετάδοσης των πακέτων κουπονιού και δεδομένων.

- Πετυχαίνει μεγάλη απόδοση στο υψηλό φορτίο, ιδίως όταν $T_t \ll P_s$, δηλαδή ισχύει,

$$C_{token} \rightarrow P_s / (T_t + P_s) \text{ για } S \rightarrow 1 \quad (2.3)$$

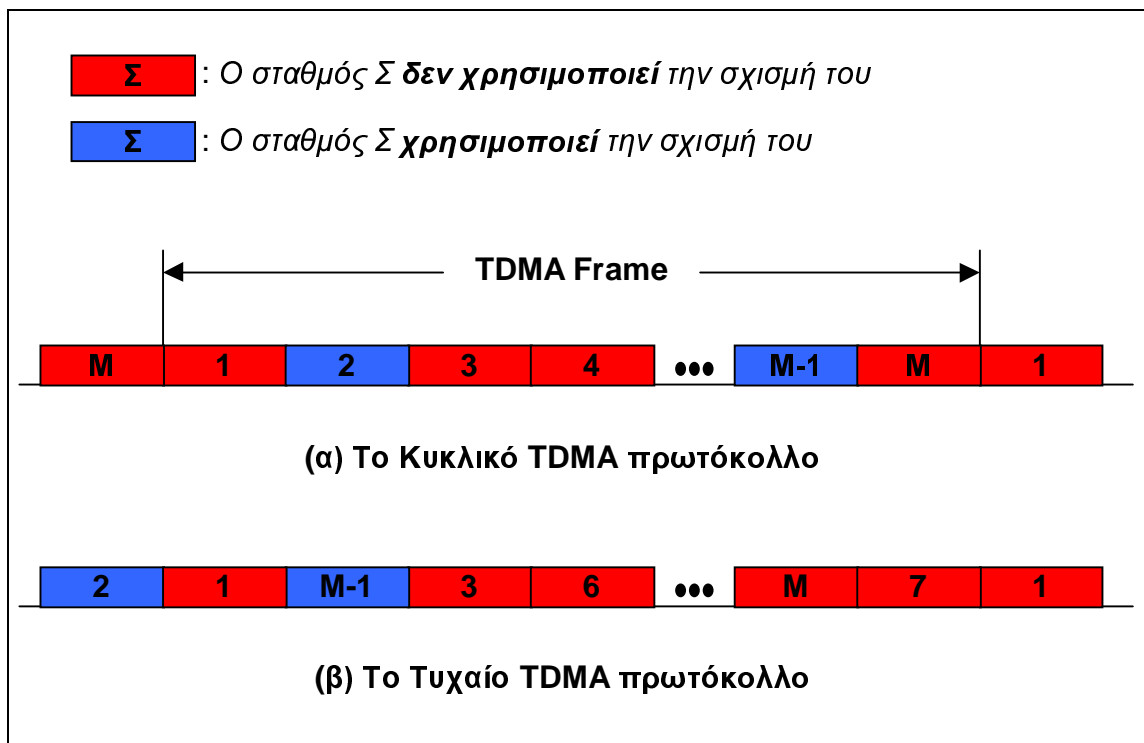
- Παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης κίνησης με διαφορετικές προτεραιότητες.
- Εγγυάται ένα ανώτατο όριο στην καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων υψηλής προτεραιότητας σε συνθήκες λειτουργίας σταθερής κατάστασης.
- Η απόδοσή του μειώνεται με την αύξηση του μήκους του δικτύου.
- Όταν ‘χαθεί’ το κουπόνι απαιτούνται πολύπλοκοι και δύσκολα υλοποιήσιμοι αλγόριθμοι αναδιαμόρφωσης του δικτύου που οδηγούν σε μεγάλες περιόδους απροσπελασιμότητας στο κανάλι.

2.5. ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ TDMA ΚΑΙ POLLING

2.5.1. ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ TDMA

Η τεχνική της πολλαπλής προσπέλασης με καταμερισμό του χρόνου του καναλιού (Time Division Multiple Access, TDMA) αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική σταθερής ανάθεσης του καναλιού. Η τεχνική αυτή, που εξασφαλίζει προσπέλαση των σταθμών στο δίκτυο χωρίς συγκρούσεις, σχεδιάστηκε για να εξυπηρετεί κυρίως *συνεχές* φορτίο, όπως πχ. αυτό που προέρχεται από την ψηφιακοποίηση φωνής και όχι *εκρηκτικό* (*bursty*), όπως αυτό που παράγεται από την μετάδοση απλών υπολογιστικών δεδομένων (data).

Ο χρόνος του καναλιού οργανώνεται σε χρονικές σχισμές εύρους ίσου με τον χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων P_s . Οι δύο βασικές TDMA τεχνικές είναι η κυκλική (round-robin) και η τυχαία (random). Όπως φαίνεται στο Σχ.2.3, στην κυκλική TDMA τεχνική, κάθε σχισμή “ανατίθεται” σε ένα σταθμό που επιλέγεται κυκλικά μεταξύ των συνολικά υπάρχοντων M στο δίκτυο. Στο τυχαίο TDMA η επιλογή του σταθμού στον οποίο ανήκει η κάθε σχισμή γίνεται με τυχαίο τρόπο, μέσω μιας ψευδοτυχαίας γεννήτριας.



Σχ.2.3. Τα TDMA πρωτόκολλα

Είναι φανερό ότι, λόγω της φιλοσοφίας ανάθεσης των σχισμών στα TDMA πρωτόκολλα, δεν υπάρχουν συγκρούσεις πακέτων, γεγονός που αποτελεί το σημαντικότερο πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου. Ως εκ τούτου, η απόδοση του TDMA είναι υψηλή όταν το φορτίο είναι υψηλό και συγκεκριμένα, $C_{tdma}=1$. Αντίθετα, όταν το φορτίο είναι χαμηλό, η απόδοση του TDMA πρωτοκόλλου

μειώνεται σημαντικά λόγω ακριβώς της σταθερής ανάθεσης των σχισμών στους σταθμούς, ανεξάρτητα από την τρέχουσα απαίτηση τους να μεταδώσουν ή όχι πακέτα δεδομένων.

Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι η μέση κανονικοποιημένη καθυστέρηση πακέτου στο χαμηλό φορτίο είναι,

$$Mean(D_{ra-tdma}) \rightarrow (M/2) + 1 \text{ για το κυκλικό TDMA } (S \rightarrow 0) \quad (2.4\alpha)$$

$$Mean(D_{ra-tdma}) \rightarrow M + 1 \text{ για το τυχαίο TDMA } (S \rightarrow 0) \quad (2.4\beta)$$

δηλαδή εξαρτάται από τον αριθμό M των σταθμών στο δίκτυο, κάτι που επιδρά αρνητικά στην απόδοση του πρωτοκόλλου, ιδίως για μεγάλες τιμές του M . Το πρωτόκολλο Token Bus, που παρουσιάσθηκε στην Παρ.2.4.2, αποτελεί εξέλιξη του κυκλικού TDMA μειώνοντας σε ένα βαθμό τα μειονεκτήματα του TDMA στο χαμηλό φορτίο με την χρήση του κουπονιού, μέσω του οποίου μειώνεται η “σπατάλη” των σχισμών και άρα του εύρους ζώνης του καναλιού.

2.5.2. ΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ POLLING

Τα πρωτόκολλα Polling αποτελούν τα πιο γνωστά πρωτόκολλα αίτησης ανάθεσης του καναλιού με κεντρικοποιημένο έλεγχο. Για την υλοποίηση των Polling πρωτοκόλλων χρησιμοποιούνται δύο βασικοί μηχανισμοί :

- *Roll-Call Polling*: Ο κύριος σταθμός διευθύνει με ένα polling πακέτο ένα εξαρτημένο (ή δευτερεύοντα) σταθμό και αυτός μεταδίδει τα μηνύματα του, πληροφορώντας επίσης τον κεντρικό για το τέλος της μετάδοσης του. Τότε ο κύριος σταθμός διευθύνει τον επόμενο στη ακολουθία polling εξαρτημένο σταθμό.
- *Hub Polling*: Ο κύριος σταθμός επικοινωνεί με έναν αρχικό εξαρτημένο σταθμό και αυτός μεταδίδει το μήνυμα του και στη συνέχεια ‘περνά’ τον

έλεγχο στον επόμενο εξαρτημένο σταθμό, πχ. με ένα go-ahead μήνυμα που περιέχει την διεύθυνση του επόμενου εξαρτημένου σταθμού. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι ενδιάμεσες ‘παρεμβολές’ του κεντρικού που υπάρχουν στην τεχνική roll-call.

Πολλά από τα μειονεκτήματα των πρωτοκόλλων CSMA/CD και Token Bus που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορούν να αποφευχθούν εάν χρησιμοποιηθεί ένα κεντροποιημένο πρωτόκολλο, όπως το Polling. Το πρωτόκολλο αυτό είναι απλό και ταυτόχρονα επιτρέπει ντετερμινιστική προσπέλαση στο επικοινωνιακό κανάλι, διασφαλίζοντας την απαίτηση της ύπαρξης φραγμένης καθυστέρησης. Επί πλέον, η απώλεια πακέτων μπορεί εύκολα να αντιμετωπισθεί. Όμως, το πρωτόκολλο αυτό έχει και ορισμένα μειονεκτήματα τόσο όσον αφορά στην απόδοση του στα χαμηλά φορτία συγκρινόμενο με το CSMA/CD, όσο και σε σχέση με θέματα ανοχής σε σφάλματα του συστήματος (fault tolerance). Παρ’ όλα αυτά, το Polling πρωτόκολλο, λόγω της συνολικά ικανοποιητικής του απόδοσης, χρησιμοποιείται σήμερα σε γνωστά δίκτυα πεδίου, όπως τα δίκτυα FIP, PROFIBUS και P-NET για την επικοινωνία του κύριου(ων) κόμβου(ων) με τους εξαρτημένους κόμβους.

2.6. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ MAC-ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Πέραν των προτύπων πρωτοκόλλων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, ένας μεγάλος αριθμός MAC πρωτοκόλλων έχει σχεδιασθεί και αναλυθεί ειδικά για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Λόγω του μεγάλου εύρους των εφαρμογών πραγματικού χρόνου, τίθενται συγκεκριμένα κριτήρια χαρακτηριστικά των περισσότερων από αυτές τις εφαρμογές, ώστε να γίνει παρουσίαση ορισμένων γνωστών αντιπροσωπευτικών πρωτοκόλλων, που πληρούν ένα ή περισσότερα από τα κριτήρια αυτά. Αναλυτικά, τα κριτήρια αυτά είναι:

- Εξασφάλιση φραγμένης καθυστέρησης μετάδοσης πακέτου ή ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης αυτής για υψηλής προτεραιότητας μηνύματα.
- Δυνατότητα υποστήριξης κίνησης διαφορετικών προτεραιοτήτων.
- Λειτουργία κάτω από τελείως καταναμημένο έλεγχο, σε δίκτυα τοπολογίας απλού δικατευθυντήριου διαύλου.

Ανάλογα με το μηχανισμό προσπέλασης, τα πρωτόκολλα πραγματικού χρόνου μπορούν να καταταγούν σε τέσσερις γενικές κατηγορίες:

1. Πρωτόκολλα με μηχανισμό *token passing* (κατηγορία πρωτοκόλλων αίτησης ανάθεσης του καναλιού με καταναμημένο έλεγχο)
2. Πρωτόκολλα βασισμένα σε τεχνικές τυχαίας προσπέλασης (τροποποιήσεις πρωτοκόλλων της κατηγορίας τυχαίας προσπέλασης)
3. Πρωτόκολλα παραθύρου (κατηγορία προσαρμοζόμενων πρωτοκόλλων)
4. Πρωτόκολλα με υβριδικές τεχνικές προσπέλασης (κατηγορία προσαρμοζόμενων πρωτοκόλλων)

Ακολουθεί μία παρουσίαση των αντιπροσωπευτικότερων πρωτοκόλλων της κάθε κατηγορίας, με ταυτόχρονη ανάλυση των αλγορίθμων προσπέλασης, εισαγωγής προτεραιοτήτων και περιορισμού του μέγιστου χρόνου καθυστέρησης στη μετάδοση των πακέτων.

2.6.1. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΚΟΥΠΟΝΙΟΥ

2.6.1.1. Πρωτόκολλα με ‘Σαφές’ Κουπόνι

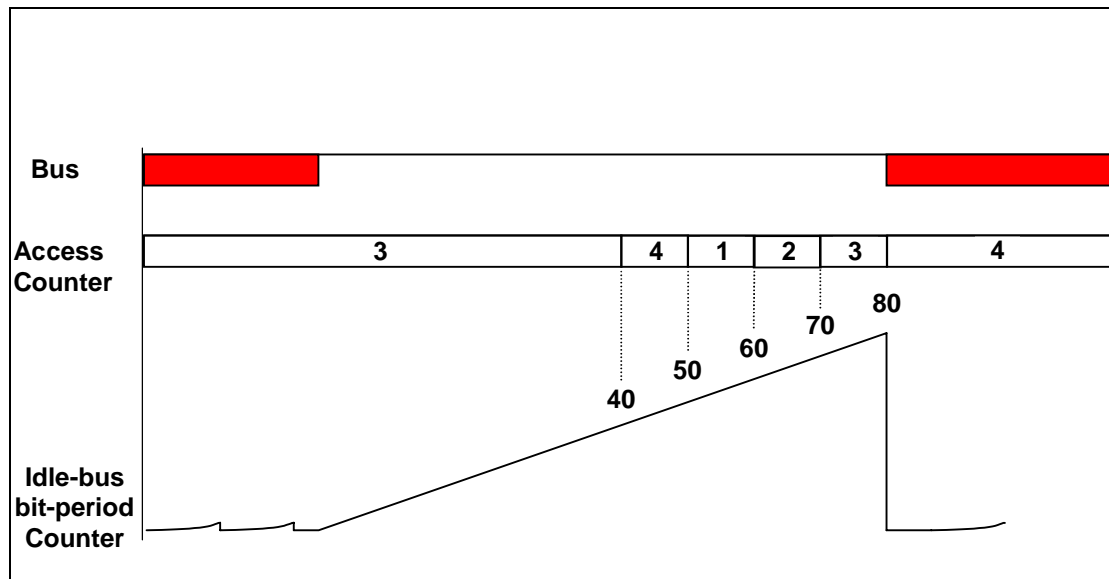
Στην κατηγορία αυτή υπάγονται όλα τα πρωτόκολλα που βασίζονται στη χρήση κουπονιού, στα οποία ο έλεγχος της προσπέλασης στο κανάλι γίνεται με το πέρασμα κάποιου ειδικού πακέτου, όπως το IEEE 802.4 Token Bus, το IEEE 802.5 Token Ring, το FDDI, κ.λ.π. Λειτουργικά, τα πρωτόκολλα αυτά είναι όμοια με τα hub-rolling πρωτόκολλα, με τη διαφορά ότι δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός κεντρικού σταθμού, για την παραχώρηση της άδειας μετάδοσης πακέτου(ων). Τα γενικά χαρακτηριστικά τους είναι, συνοπτικά, τα ακόλουθα.

- Ένα κουπόνι κινείται κυκλικά διαμέσου όλων των N σταθμών του δικτύου. Δικαίωμα μετάδοσης στο κανάλι έχει μόνο ο σταθμός που κατέχει το κουπόνι. Ο χρόνος που χρειάζεται για το πέρασμα του token από ένα σταθμό σε έναν άλλο, θεωρείται σταθερός T_t , ενώ οι διακυμάνσεις του χρόνου είναι ασήμαντες σχετικά με το μέσο χρόνο μετάδοσης του πακέτου.
- Κάθε σταθμός διαθέτει μετρητές για τον έλεγχο του χρόνου, που κάθε κατηγορία προτεραιότητας έχει δικαίωμα να χρησιμοποιήσει το κανάλι, από τη στιγμή που λάβει το κουπόνι.
- Τα πακέτα, που μεταδίδονται από κάθε σταθμό, ανιχνεύονται από όλους τους σταθμούς του δικτύου. Συνεπώς, κάθε σταθμός έχει γνώση του χρόνου μετάδοσης των πακέτων από όλους τους άλλους σταθμούς.

2.6.1.2. Πρωτόκολλα με ‘Εικονικό’ Κουπόνι - Το Πρωτόκολλο Virtual Token του Δικτύου P-NET

Στο δίκτυο P-NET υλοποιείται ένας απλός αλλά αποδοτικός αλγόριθμος περιστροφής ασαφούς κουπονιού. Κάθε κύριος κόμβος (master) στο P-NET δίκτυο χαρακτηρίζεται μια διεύθυνση κόμβου (NA) μεταξύ του 1 και του μέγιστου αναμενόμενου αριθμού κυρίων κόμβων στο σύστημα. Όλοι οι κύριοι κόμβοι διαθέτουν ένα “idle bus bit period” μετρητή που αυξάνεται για κάθε περίοδο (χρόνο) bit που το κανάλι μένει αδρανές και μηδενίζεται όταν το κανάλι γίνεται ενεργό. Κάθε κύριος κόμβος διαθέτει επίσης έναν “access” μετρητή που αυξάνεται όταν ο “idle bus bit period” μετρητής μετρήσει 40, 50, 60, κλπ. Όταν ο “access” μετρητής ενός κυρίου κόμβου είναι ίσος με την διεύθυνση του κόμβου, τότε ο κόμβος θεωρείται ότι κατέχει το κουπόνι και άρα μπορεί να προσπελάσει το κανάλι. Όταν ο “access” μετρητής ξεπεράσει το μέγιστο αριθμό των κύριων κόμβων, παίρνει την τιμή 1.

Το Σχ.2.4 δείχνει ένα παράδειγμα διακίνησης του κουπονιού στο P-NET για ένα σύστημα με τέσσερις κύριους κόμβους. Αρχικά ο κόμβος 3 κατέχει το κουπόνι και λαμβάνει δεδομένα από ένα εξαρτημένο κόμβο. Τότε το κανάλι επανέρχεται στην αδράνεια. Όταν μετρηθούν 40 περίοδοι bits αδράνειας, όλοι οι “access” μετρητές αυξάνονται κατά 1 και ο κόμβος 4 έχει το δικαίωμα να προσπελάσει το κανάλι. Δεδομένου ότι ο κόμβος 4 δεν έχει πακέτο να μεταδώσει και μετά από 50 bit περιόδους, ο κόμβος 1 παίρνει το δικαίωμα να χρησιμοποιήσει το κανάλι. Ο κόμβος 1 είτε δεν έχει να μεταδώσει ή δεν είναι στο δίκτυο, οπότε το ασαφές κουπόνι περνά στον κόμβο 2, όταν ο “idle bus bit period” μετρητής μετρήσει 60. Δεδομένου ότι οι κόμβοι 2 και 3 δεν απαιτούν χρήση του καναλιού, δηλαδή δεν είναι ενεργοί, το κουπόνι περνά στον κόμβο 4, όταν ο “idle bus bit period” μετρητής είναι ίσος με 80. Αυτή τη στιγμή, ο κόμβος 4 απαιτεί χρήση του καναλιού και τα δεδομένα εμφανίζονται στο κανάλι και άρα όλοι οι “idle bus bit period” μετρητές μηδενίζονται.



Σχ.2. 4. Ο μηχανισμός του 'εικονικού' κουπιονιού στο δίκτυο P-NET

2.6.2. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΤΥΧΑΙΑΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα πρωτόκολλα που αποτελούν τροποποιήσεις και επεκτάσεις των βασικών πρωτοκόλλων τυχαίας προσπέλασης (ALOHA, CSMA/CD, κ.λ.π.). Λόγω της υψηλότερης απόδοσης που προσφέρει το CSMA/CD έναντι του ALOHA, η αναφορά θα περιοριστεί μόνο σε όσα πρωτόκολλα έχουν ως βάση τους το CSMA/CD. Τα πρωτόκολλα αυτά, που εισάγουν προτεραιότητες και βασίζονται στο CSMA/CD, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες εξαρτώνται από το αν ο μηχανισμός προτεραιοτήτων είναι:

- *σαφής (explicit)*, χρησιμοποιώντας μία διαδικασία κράτησης του καναλιού για ένα πακέτο της τρέχουσας μέγιστης προτεραιότητας ή
- *ασαφής (implicit)*, είτε με την ανάθεση ξεχωριστών πιθανοτήτων επιμονής σε διαφορετικές προτεραιότητες, είτε με την ανάθεση μεγαλύτερων

καθυστερήσεων στην αναμετάδοση των πακέτων χαμηλότερης προτεραιότητας ή

- *ένας συνδυασμός των παραπάνω μηχανισμών*

Ακολουθεί μία περιγραφή ορισμένων αντιπροσωπευτικών πρωτοκόλλων αυτής της κατηγορίας.

2.6.2.1. Το LonTalk Πρωτόκολλο του Δικτύου LON (Predictive p-persistent CSMA/CD)

2.6.2.1.1 Βασική Λειτουργία

Η προβλεψιμότητα του LonTalk πρωτοκόλλου βασίζεται στην εκτίμηση του φορτίου του καναλιού. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί μία εκτίμηση του τρέχοντος φορτίου (BL) στο κανάλι, η οποία προσαυξάνεται σαν αποτέλεσμα της μετάδοσης ή της λήψης ενός πακέτου και μειώνεται περιοδικά - μία φορά για κάθε κύκλο πακέτου. Η προσαύξηση στο φορτίο κωδικοποιείται στην επικεφαλίδα (header) του πακέτου και απεικονίζει τον αριθμό των μηνυμάτων τα οποία το πακέτο θα δημιουργήσει κατά την λήψη του. Επίσης, το φορτίο μειώνεται εάν το κανάλι παραμένει αδρανές για ένα τυχαίο αριθμό σχισμών, $BL * W_{base}$, η χρήση των οποίων εξηγείται στη συνέχεια.

Το εκτιμώμενο φορτίο έχει πάντα τιμή μεγαλύτερη ή ίση του ένα (1). Ο αλγόριθμος αυξάνει το φορτίο μετά και όχι πριν με την ποσότητα που σχετίζεται με το πακέτο που μεταδίδεται, διότι ο αριθμός των αναμενόμενων αποκρίσεων έχει σημασία μετά την μετάδοση του πακέτου.



Σχ.2. 5. Βασική λειτουργία και παράμετροι του πρωτοκόλλου p-persistent CSMA (Beta1=Αδρανής Σχισμή, Beta2=Σχισμή Τυχαιότητας)

Σύμφωνα με το LonTalk πρωτόκολλο, όπως και στο CSMA, όταν ένας κόμβος προσπαθεί να μεταδώσει, ελέγχει πρώτα την κατάσταση του καναλιού (Σχ.2.5) και εφ' όσον ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι αδρανές κατά τη διάρκεια της περιόδου Beta1, τότε παίρνει το δικαίωμα να μεταδώσει. Στη συνέχεια, ο κόμβος υπολογίζει μια τυχαία καθυστέρηση T (Transmit) μέσα στο διάστημα (0 έως $BL \cdot W_{base}$), όπου W_{base} είναι το μέγεθος του βασικού παραθύρου και το BL μια εκτίμηση του τρέχοντος φορτίου στο κανάλι. Η καθυστέρηση T είναι ένας ακέραιος αριθμός σχισμών διάρκειας Beta2. Αν μετά από αυτήν την καθυστέρηση το κανάλι συνεχίζει να ανιχνεύεται ως αδρανές, τότε ο κόμβος μεταδίδει το πακέτο του. Διαφορετικά, ο κόμβος λαμβάνει το εισερχόμενο πακέτο και επαναλαμβάνει τον εν λόγω MAC-αλγόριθμο.

Στο Σχ.2.5, η D_{mean} είναι η μέση καθυστέρηση μεταξύ των πακέτων και εφ' όσον η τυχαία καθυστέρηση T είναι ομοιόμορφα κατανομημένη, έχουμε ότι $D_{mean} = W_{base} / 2$ για μικρό φορτίο. Θεωρητικά, αν το φορτίο είναι μεγάλο, ο αλγόριθμος τείνει να το υπερεκτιμήσει, πράγμα που μπορεί να προκαλέσει αύξηση του D_{mean} , έως ότου αυτό ελαττωθεί, αν και στην πράξη η επίπτωση αυτή αμβλύνεται από τις καθυστερήσεις επεξεργασίας στους κόμβους. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο

αυξάνεται όταν λαμβάνεται ένα πακέτο με μή μηδενική ένδειξη αύξησης του φορτίου. Το φορτίο τότε μειώνεται καθώς οι κόμβοι οργανώνουν τις αποκρίσεις επιβεβαίωσης λήψης (ACK), έτσι ώστε ευρίσκεται εμπειρικά ότι η υπερεκτίμηση του φορτίου είναι σύντομη και η εκμετάλλευση του καναλιού παραμένει κοντά στον κόρο.

Ρυθμίζοντας κατάλληλα το μέγεθος του παραθύρου τυχαιότητας, W_{base} , σαν συνάρτηση του προβλεπόμενου φορτίου, ο αλγόριθμος διατηρεί τον ρυθμό των συγκρούσεων σταθερό και ανεξάρτητο του φορτίου. Θεωρώντας ότι το εκτιμώμενο φορτίο BL είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το πραγματικό, ισχύει η σχέση:

Ρυθμός Συγκρούσεων =

$$= \text{Κύκλοι Εσφαλμένων Πακέτων} / \text{Κύκλοι Επιτυχών Πακέτων} \leq 1 / 2 W_{base} \quad (2.5)$$

Έχει αποδειχθεί ότι ένα βασικό παράθυρο εύρους 16 σχισμών, μεγιστοποιεί την απόδοση του πρωτοκόλλου. Αυτό σημαίνει πως υπάρχουν κατά μέσο όρο 8 σχισμές πλάτους Beta2 και μία σχισμή πλάτους Beta1 ανάμεσα σε κάθε πακέτο. Επίσης, είναι φανερό ότι το πλάτος της περιόδου Beta2 είναι κρίσιμο για την αποτελεσματική χρήση του καναλιού.

Είναι φανερό, λοιπόν, ότι η εκτίμηση φορτίου στο LonTalk πρωτόκολλο βασίζεται στον αναμενόμενο αριθμό πακέτων θετικής επιβεβαίωσης (ACK) που δημιουργούν τα πακέτα δεδομένων όταν λαμβάνονται στους κόμβους προορισμού τους. Στην περίπτωση, όμως, που τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται χωρίς απαίτηση επιβεβαίωσης, τότε το τμήμα εκτίμησης του αλγορίθμου δεν αυξάνει δυναμικά το διάστημα των σχισμών τυχαιότητας, όταν υπάρχει αύξηση στο φορτίο. Στην περίπτωση αυτή, το LonTalk πρωτόκολλο έχει την ίδια απόδοση με το p-persistent CSMA/CD, όπου $p=0.0625 (=1/16)$, θεωρώντας ένα βασικό παράθυρο εύρους 16 σχισμών τυχαιότητας.

2.6.2.1.2 Ανίχνευση Ελεύθερου Καναλιού

Το αν το κανάλι βρίσκεται σε ελεύθερη κατάσταση, επιβεβαιώνεται όταν συμβαίνουν τα παρακάτω γεγονότα:

1. Όταν η κατάσταση του καναλιού που προσδιορίζεται από το φυσικό επίπεδο (μέσω της πρωτογενούς λειτουργίας P_Data_Indication) είναι χαμηλή, και
2. Καμιά εκπομπή δεν έχει ανιχνευθεί κατά τη διάρκεια της τελευταίας περιόδου Beta1.

Το εύρος της περιόδου Beta1 πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$Beta1 > (\text{χρόνος ενός (1) bit}) + (2 * T_{aup} + T_{aum}) \quad (2.6)$$

όπου ο πρώτος όρος προϋποθέτει μια μέθοδο κωδικοποίησης των δεδομένων η οποία εγγυάται μία μετάβαση και / ή ύπαρξη φορέα κατά τη χρονική διάρκεια κάθε bit. Στην περίπτωση, που χρησιμοποιείται κωδικοποίηση η οποία δεν ικανοποιεί τον εν λόγω περιορισμό, τότε ο πρώτος όρος πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να είναι ο μέγιστος χρόνος κατά τον οποίο το κανάλι μπορεί να εμφανίζεται αδρανές χωρίς να είναι στην πραγματικότητα, όπως π.χ. ο μέγιστος χρόνος σε κανονική μεταφορά δεδομένων όπου δεν υπάρχει μεταβολή στάθμης και / ή φορέας στο κανάλι. Ο δεύτερος όρος αφορά στις καθυστερήσεις διάδοσης και επιστροφής του καναλιού, όπου,

T_{aup} = η καθυστέρηση διάδοσης που εξαρτάται από το μήκος του μέσου

T_{aum} = ο χρόνος ανίχνευσης και επιστροφής στο MAC υπό- επίπεδο, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανίχνευση ελεύθερου καναλιού ως την πρώτη αλλαγή που εμφανίζεται στην έξοδο. Στα μέσα που χρησιμοποιείται φορέας, ο χρόνος αυτός συμπεριλαμβάνει και το χρόνο έναρξης (έναυσης) του φορέα, καθώς και το χρόνο επιβεβαίωσης της ύπαρξής του στο μέσο.

2.6.2.1.3 Υλοποίηση του Τυχαίου Χρόνου

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην αρχή της τυχαίας περιόδου, ένας κόμβος που επιθυμεί να στείλει δεδομένα, δημιουργεί μια τυχαία καθυστέρηση T διάρκειας $BL * W_{base}$ σχισμών. Κατόπιν, ο κόμβος (σταθμός) περιμένει αυτό το χρονικό διάστημα, ενώ ταυτόχρονα ελέγχει την κατάσταση του καναλιού. Αν το κανάλι εξακολουθεί να είναι ελεύθερο μετά το τέλος του χρονικού διαστήματος, τότε ο κόμβος μεταδίδει το πακέτο του.

Το χρονικό διάστημα της καθυστέρησης T δίνεται από έναν ακέραιο αριθμό τυχαίων σχισμών διάρκειας $Beta2$. Το μήκος των τυχαίων σχισμών πρέπει να ικανοποιεί τον παρακάτω περιορισμό:

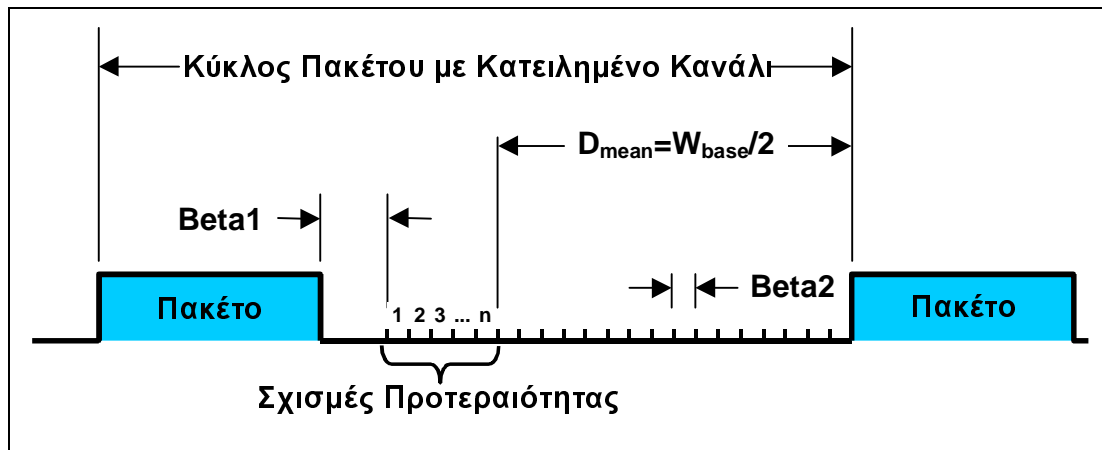
$$Beta2 > 2 * Tau_p + Tau_m \quad (2.7)$$

Οι παράμετροι Tau_p και Tau_m ορίστηκαν στην Παρ.1.6.2.1.2.

2.6.2.1.4 Προαιρετική Προτεραιότητα Εξυπηρέτησης

Το LonTalk πρωτόκολλο υποστηρίζει επιλεκτική προτεραιότητα. Οι σχισμές προτεραιότητας, αν υπάρχουν, ακολουθούν αμέσως μετά την $Beta1$ περίοδο μετά την μετάδοση ενός πακέτου, όπως φαίνεται στο Σχ.2.6. Ο αριθμός των σχισμών προτεραιότητας κυμαίνονται από 0 έως 127. Οι σχισμές αυτές τυπικά δεν χρησιμοποιούνται 'ανταγωνιστικά', αλλά ανατίθενται σταθερά και μοναδικά στους κόμβους προς χρήση. Κόμβοι στους οποίους έχουν ανατεθεί σχισμές προτεραιότητας δεν πρέπει να χρησιμοποιούν τις σχισμές αυτές για κάθε πακέτο. Ο κόμβος αποφασίζει κάθε φορά για το συγκεκριμένο πακέτο αν θα χρησιμοποιήσει ή όχι την καθορισμένη σχισμή. Αυτή η απόφαση λαμβάνεται μετά την εξέταση του bit προτεραιότητας που βρίσκεται στο πεδίο ελέγχου του πακέτου.

Σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις, είναι πιθανό να ανατεθεί σε όλους τους κόμβους η ίδια σχισμή προτεραιότητα. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας περίπτωσης είναι όταν υπάρχει μία peer-to-peer δραστηριότητα και ταυτόχρονα ο μοναδικός κύριος κόμβος επικοινωνεί με κάθε εξαρτημένο κόμβο για την υλοποίηση διαδικασιών όπως διαχείριση δικτύου, rolling, κλπ. Δίνοντας σε κάθε κόμβο την ίδια σχισμή και χρησιμοποιώντας τη μόνο για αυτό το σκοπό, αυτές οι συναλλαγές (από τον κύριο κόμβο σε πολλαπλούς εξαρτημένους κόμβους) θα είχαν την τάση να ολοκληρωθούν πριν από την κίνηση που προέρχεται από την ταυτόχρονη (background) peer-to-peer δραστηριότητα.



Σχ.2. 6. Θέση των σχισμών προτεραιότητας μέσα στον κύκλο πακέτου με κατειλημένο κανάλι

Μια εφαρμογή μπορεί να αποφασίσει ότι ένα μήνυμα είναι υψηλής προτεραιότητας και να δοκιμάσει να το στείλει ως τέτοιο. Αν ο κόμβος δεν έχει μια σχισμή προτεραιότητας αφιερωμένη σ' αυτόν, το πακέτο θα σταλεί με το συνηθισμένο τρόπο, εκτός και αν έχει ενεργοποιηθεί το bit προτεραιότητας του πεδίου ελέγχου του πακέτου. Αν ακολούθως το πακέτο περάσει από ένα δρομολογητή - κόμβο ο οποίος διαθέτει μια σχισμή προτεραιότητα στο κανάλι προορισμού, το πακέτο θα σταλεί χρησιμοποιώντας την προτεραιότητα του δρομολογητή.

Το LonTalk πρωτόκολλο δεν παρέχει συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων. Επομένως, αν το κανάλι παραμένει αδρανές για περισσότερο από μία τυχαία περίοδο ($Beta1 + \text{αριθμός των σχισμών προτεραιότητας} + D_{\text{mean}}$), η προσπέλαση στο κανάλι είναι τυχαία χωρίς να ληφθεί υπ' όψη η προτεραιότητα. Όταν το κανάλι επιστρέψει στην ενεργή κατάσταση (busy state), η προσπέλαση θα γίνεται με σειρά προτεραιότητας.

Αν ένα πακέτο προτεραιότητας μεταδοθεί είτε με την τεχνική του πρωτοκόλλου αίτησης / απόκρισης ή με αυτήν της αξιόπιστης μετάδοσης πακέτου, τότε ο αποκρινόμενος κόμβος θα επιχειρήσει να στείλει μια επιβεβαίωση / απόκριση με προτεραιότητα, ενεργοποιώντας το bit προτεραιότητας στο πεδίο ελέγχου του πακέτου. Αν δημιουργηθεί ένα πακέτο υψηλής προτεραιότητας σε έναν κόμβο, στέλνεται πριν από οποιοδήποτε πακέτο κανονικής (χαμηλής) προτεραιότητας. Πολλά πακέτα με υψηλή προτεραιότητα στέλνονται με σειρά FIFO (First In First Out). Αν μια εφαρμογή επιχειρεί να στείλει ένα πακέτο υψηλής προτεραιότητας, ενώ ο κόμβος στον οποίο τρέχει η εφαρμογή στέλνει ήδη ένα πακέτο, αυτό το μεταδιδόμενο πακέτο θα ολοκληρωθεί πρώτο.

Αν ένας κόμβος έχει πολλά μηνύματα υψηλής προτεραιότητας σε λίστα αναμονής, δεν θα στείλει τα μηνύματα υψηλής προτεραιότητας σε συνεχόμενους κύκλους πακέτων, αφού αυτό θα δέσμευε αποκλειστικά το κανάλι. Στην περίπτωση που ένας κόμβος έχει ένα πακέτο προτεραιότητας να στείλει και έχει στείλει ένα πακέτο στον προηγούμενο κύκλο πακέτου, ο κόμβος αυτός δεν χρησιμοποιεί τη σχισμή προτεραιότητας στον τρέχοντα κύκλο. Αντί αυτού, επιχειρεί να προσπελάσει το μέσο χρησιμοποιώντας τον (χωρίς προτεραιότητα) MAC-αλγόριθμο. Αν ο κόμβος δεν μεταδώσει επιτυχώς στον τρέχοντα κύκλο πακέτου, μπορεί να χρησιμοποιήσει τη σχισμή προτεραιότητάς του στον επόμενο κύκλο πακέτου.

2.6.2.2. Το Πρωτόκολλο p-persistent prioritized CSMA (P-CSMA)

Το πρωτόκολλο P-CSMA χρησιμοποιεί σαφείς μηχανισμούς κράτησης και αποτελεί μία τροποποίηση του απλού p-persistent CSMA. Το P-CSMA είναι ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στην αρχή ότι το δικαίωμα προσπέλασης στο κανάλι παραχωρείται μόνο στα μηνύματα της τρέχουσας μέγιστης προτεραιότητας. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Υποστήριξη μηνυμάτων με διαφορετικές προτεραιότητες (message-based priorities)
- Η μετάδοση των μηνυμάτων μίας συγκεκριμένης προτεραιότητας πρέπει να μην επηρεάζεται από τη μετάδοση χαμηλότερης προτεραιότητας μηνυμάτων.
- Δίκαια κατανομή του καναλιού σε κάθε κατηγορία μηνυμάτων.

Ο μηχανισμός των προτεραιοτήτων εισάγεται κατά τη διάρκεια της προσπέλασης στο κανάλι. Αναλυτικότερα, το τέλος της δραστηριότητας στο κανάλι, που καταδεικνύεται με το σήμα EOC, σηματοδοτεί την έναρξη της διαδικασίας κράτησης. Ο χρόνος θεωρείται διακριτός, χωρισμένος σε χρονικές σχισμές κράτησης (reservation-slots) μεγέθους $2\tau + \gamma$, όπου τ είναι ο μέγιστος χρόνος διάδοσης του καναλιού και γ είναι η ελάχιστη χρονική διάρκεια ενός αδιαμόρφωτου φορέα που μπορεί να ανιχνευτεί αξιόπιστα από όλους τους σταθμούς. Το h συμβολίζει έναν τυχαίο σταθμό και το $t_e(h)$ αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που ανιχνεύεται το EOC από το σταθμό αυτό. Το επίπεδο προτεραιότητας σε ένα σταθμό h (αντιστοιχεί στο πακέτο με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα που περιμένει στην ουρά του) τη χρονική στιγμή $t_e(h)$ συμβολίζεται ως $v(h)$. Ο αλγόριθμος εισαγωγής προτεραιοτήτων συνίσταται από τις ακόλουθες λειτουργίες του σταθμού.

- Αν, μετά το $t_e(h)$, ο φορέας ανιχνευτεί στο reservation-slot i , με $i < v(h)$, γεγονός που σημαίνει ότι ένας ή περισσότεροι σταθμοί έχουν προτεραιότητα i μεγαλύτερη από το $v(h)$ και άρα το δικαίωμα προσπέλασης πρέπει να παραχωρηθεί σ' αυτούς, ο σταθμός h περιμένει το επόμενο EOC στο τέλος της επόμενης περιόδου μετάδοσης, όπου επιβεβαιώνει την τρέχουσα μέγιστη προτεραιότητά του και επαναλαμβάνει τον ίδιο αλγόριθμο.
- Αν δεν ανιχνευτεί φορέας πριν το j -οστή σχισμή κράτησης, όπου $j = v(h)$, τότε ο σταθμός h μεταδίδει ένα σύντομο μήνυμα (burst) αδιαμόρφωτου φορέα διάρκειας γ στην αρχή της j -οστής σχισμής κράτησης (κάνοντας κράτηση για την $v(h)$ κατηγορία προτεραιότητας) και αμέσως μετά η σχισμή αυτή λειτουργεί σύμφωνα με το p -persistent CSMA πρωτόκολλο. Δηλαδή, ανιχνεύει το κανάλι και,
 - αν το κανάλι είναι αδρανές, τότε με πιθανότητα p μεταδίδει το πακέτο και με πιθανότητα $1-p$ καθυστερεί κάθε ενέργεια για χρόνο τ μετά τον οποίο επαναλαμβάνει το CSMA πρωτόκολλο.
 - αν το κανάλι είναι ενεργό, τότε ο σταθμός περιμένει το επόμενο EOC και σύμφωνα με την τρέχουσα μέγιστη προτεραιότητά του επαναλαμβάνει ολόκληρο τον αλγόριθμο.
 - αν κατά τη διάρκεια που η προσπέλαση του καναλιού παραχωρείται στην κατηγορία $v(h)$, κάποιος σταθμός h' δημιουργήσει ένα νέο πακέτο της ίδιας προτεραιότητας, τότε ο σταθμός αυτός μεταδίδει το πακέτο του με πιθανότητα 1, δεδομένου ότι το κανάλι είναι αδρανές. Αν, όμως, το κανάλι είναι ενεργό τη στιγμή της δημιουργίας του νέου πακέτου, τότε ο σταθμός h' περιμένει το EOC και επαναλαμβάνει τον αλγόριθμο.
- Αν μετά το EOC δεν ανιχνευτεί καμία κράτηση για K συνεχόμενες σχισμές κράτησης, όπου K είναι ο ολικός αριθμός των κατηγοριών προτεραιότητας, τότε το κανάλι είναι ελεύθερο να χρησιμοποιηθεί από όλους τους σταθμούς, ανεξάρτητα από την προτεραιότητά τους, μέχρι την ανίχνευση ενός νέου EOC.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τη βοήθεια σύντομων μηνυμάτων κρατήσεων που ακολουθούν το EOC, η υψηλότερη κατηγορία προτεραιότητας έχει αποκλειστικό δικαίωμα προσπέλασης και τα πακέτα που ανήκουν σ' αυτή την κατηγορία μπορούν να προσπελάσουν το κανάλι σύμφωνα με το p-persistent CSMA. Το P-CSMA είναι ένα αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί σαφείς μηχανισμούς κράτησης. Τα βασικά μειονεκτήματά του είναι τα εξής:

- Ακόμα και αν υπάρχουν πολλαπλά πακέτα της ίδιας κατηγορίας προτεραιότητας για την οποία έχει γίνει κράτηση, πριν από κάθε προσπάθεια μετάδοσης είναι απαραίτητη μία ξεχωριστή διαδικασία κράτησης / ανταγωνισμού, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης και την αύξηση του χρόνου απόκρισης.
- Το πρωτόκολλο δεν εγγυάται ένα μέγιστο χρόνο στην καθυστέρηση πακέτου. Άρα το P-CSMA δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές αυστηρού πραγματικού χρόνου, στις οποίες υπάρχει η απαίτηση αυστηρών χρονικών περιορισμών στις μεταδόσεις των πακέτων υψηλής προτεραιότητας.

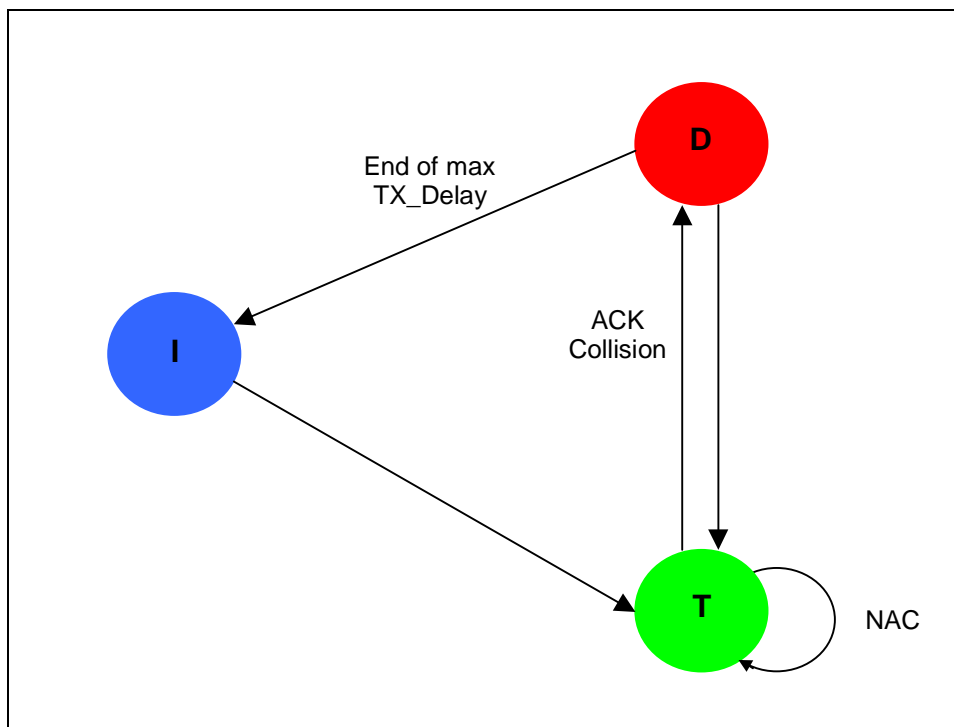
Στην ίδια κατηγορία των πρωτοκόλλων με σαφείς μηχανισμούς κράτησης υπάρχουν και άλλα πρωτόκολλα, όπως το OP-CSMA/CD, το οποίο χρησιμοποιεί μία κράτηση ανά κατηγορία προτεραιότητας και τη βέλτιστη πιθανότητα μετάδοσης ενός πακέτου, προϋποθέτοντας γνωστό τον αριθμό των ενεργών σταθμών, καθώς επίσης και το SIMP-CSMA/CD το οποίο χρησιμοποιεί μία δυναμική εναλλαγή μεταξύ του p-persistent και του 1-persistent για την μετάδοση των πακέτων της προτεραιότητας για την οποία έχει γίνει σχετική κράτηση.

2.6.2.3. Το Πρωτόκολλο CSMA/CD με Δυναμικές Προτεραιότητες (CSMA-CD-DP)

Το πρωτόκολλο CSMA-CD-DP βασίζεται σε ασαφείς μηχανισμούς κράτησης και *χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ο οποίος επιτυγχάνει την ανάθεση προτεραιοτήτων χρησιμοποιώντας μεγαλύτερες καθυστερήσεις αναμετάδοσης των χαμηλότερης προτεραιότητας πακέτων.

Το πρωτόκολλο αυτό λειτουργεί με ανταγωνισμό (contention mode) όταν το κανάλι είναι αδρανές και μεταβαίνει σε πρωτόκολλο κράτησης (reservation mode) όταν το κανάλι είναι απασχολημένο. Η λειτουργία του είναι μία προέκταση του CSMA/CD κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα πακέτο επιβεβαίωσης μετά από τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων. Το σήμα αυτό χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό όλων των σταθμών ως προς τον έλεγχο της προσπέλασης. Κάθε χρονική στιγμή, καθένας από τους N σταθμούς κατέχει μία διαφορετική προτεραιότητα μετάδοσης, που υλοποιείται με ένα διαφορετικό, για κάθε σταθμό, χρόνο καθυστέρησης (TX delay) it_0 , όπου $i = 1, 2, \dots, N$ και $t_0 =$ χρονική σχισμή εύρους ίσου με τον δύο κατευθύνσεων χρόνο διάδοσης του καναλιού. Στο βασικό πρωτόκολλο, ο χρόνος καθυστέρησης TX αλλάζει κυκλικά μετά από κάθε θετικό πακέτο επιβεβαίωσης (ACK), ώστε να υπάρχει δίκαια κατανομή του δικαιώματος προσπέλασης σε όλους τους σταθμούς.

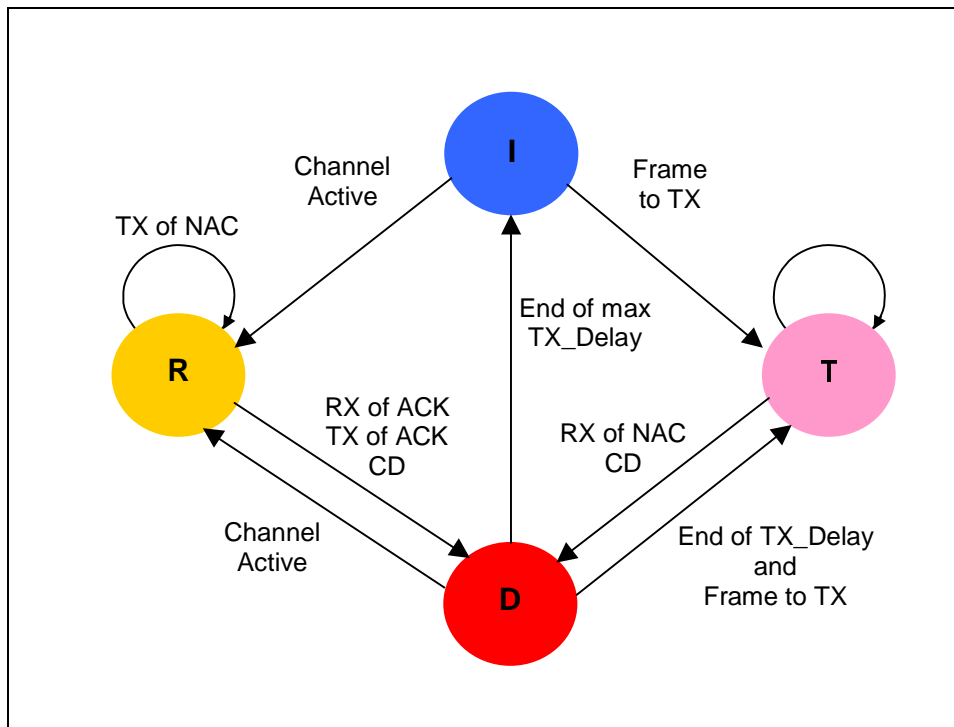
Η λειτουργία του πρωτοκόλλου προσπέλασης μπορεί να εξεταστεί από την πλευρά του καναλιού και από την πλευρά ενός απλού σταθμού. Από την πλευρά του καναλιού, υπάρχουν τρεις διαφορετικές καταστάσεις (Σχ.2.7). Οι μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων "αδράνεια" (idle, I), "μετάδοση" (transmission, T) και "καθυστέρηση" (delay, D) είναι οι ακόλουθες:



Σχ.2. 7. Διάγραμμα Καταστάσεων Καναλιού
(I = αδράνεια, T = μετάδοση, D = καθυστέρηση)

- Άμεση μετάδοση ενός πλαισίου όταν το κανάλι ανιχνευτεί στην αδρανή κατάσταση (μετάβαση I → T).
- Ανίχνευση σύγκρουσης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Στην κανονική λειτουργία, συγκρούσεις μπορούν να συμβούν μόνο κατά τη διάρκεια ενός χρονικού παραθύρου ($\leq t_0$) μετά τη μετάβαση I → T. Μετά τη σύγκρουση, το κανάλι μεταβαίνει στην κατάσταση καθυστέρησης D (μετάβαση T → D), όπου όλοι οι σταθμοί λειτουργούν σύμφωνα με την προτεραιότητα μετάδοσής τους, ακριβώς όπως μετά τη λήψη ενός θετικού acknowledgment (ACK).
- Μετά το τέλος μίας επιτυχούς μετάδοσης, ο σταθμός που έχει λάβει το πακέτο εκπέμπει ένα ACK με το οποίο το κανάλι μεταβαίνει στην κατάσταση καθυστέρησης D (μετάβαση T → D).
- Μετά την ανίχνευση ενός ACK, κάθε σταθμός ενημερώνει την τρέχουσα χρονική καθυστέρησή του (TX) αυξάνοντάς τη κυκλικά κατά t_0 (modulo N).

- Κάθε σταθμός, που έχει ένα έτοιμο πακέτο για μετάδοση, περιμένει τουλάχιστον για χρόνο TX μετά το τέλος του προηγούμενου ACK. Αν υπάρξει κάποια άλλη μετάδοση πριν τη λήξη του χρόνου TX, ο σταθμός περιμένει ως την ανίχνευση του επόμενου ACK, όπου επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία. Σε περίπτωση που δε γίνει καμία μετάδοση (από άλλο σταθμό) ως τη λήξη του χρόνου TX, το πακέτο μεταδίδεται αμέσως (μετάβαση D → T).
- Αν ένας σταθμός λάβει ένα πακέτο με CRC λάθος, εκπέμπει ένα πακέτο αρνητικής επιβεβαίωσης (negative acknowledgment, NAC). Σε αυτή την περίπτωση, ο αποστολέας του πακέτου το αναμεταδίδει αμέσως (μετάβαση T → T).
- Αν μέσα στο χρονικό διάστημα Nt_0 , μετά την ανίχνευση του προηγούμενου ACK, δε λάβει μέρος καμία μετάδοση, το κανάλι μεταβαίνει στην αδρανή κατάσταση (μετάβαση D → I).



Σχ.2. 8. Διάγραμμα Καταστάσεων Σταθμού

(I = αδράνεια, R = παρακολούθηση καναλιού & λήψη, T = αποστολή, D = καθυστέρηση, CD = αναγνώριση σύγκρουσης)

Το CSMA-CD-DP μπορεί να λειτουργήσει και χωρίς την ύπαρξη ACK. οι καθυστερήσεις μετάδοσης μπορεί να ρυθμιστούν με βάση την ανίχνευση του οριοθέτη τέλους ενός πλαισίου-πακέτου (frame-end-delimiter). Το Σχ.2.8 περιγράφει τις μεταβάσεις μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων από την πλευρά ενός απλού σταθμού. Όπως φαίνεται από την παραπάνω περιγραφή, κανένα πακέτο δεν υπόκειται σε περισσότερες από μία συγκρούσεις και έτσι η καθυστέρηση μετάδοσης οποιουδήποτε πακέτου είναι αυστηρά οριοθετημένη. Η βασική έκδοση του πρωτοκόλλου παρέχει ίσες προτεραιότητες σε όλους τους σταθμούς. Υπάρχουν, ωστόσο, διάφορες επιλογές που επιτρέπουν τη δυναμική ρύθμιση των προτεραιοτήτων προσπέλασης, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

- *Στατική προτεραιότητα:* Στην περίπτωση που, μετά την ανίχνευση του ACK, δεν γίνεται αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης (TX) σε κανένα σταθμό,

έχουμε ουσιαστικά μία στατική ανάθεση μεγαλύτερης προτεραιότητας στους σταθμούς με το μικρότερο TX. Γενικότερα, υπάρχει η δυνατότητα της ομαδοποίησης κάποιων σταθμών υψηλότερης προτεραιότητας, στους οποίους παραχωρούνται οι χαμηλότεροι χρόνοι μετάδοσης και οι οποίοι (σταθμοί) εξαιρούνται από τη διαδικασία της κυκλικής αλλαγής των προτεραιοτήτων. Επιπλέον, μία άλλη τεχνική είναι ο διαχωρισμός των σταθμών σε κατηγορίες, σύμφωνα με τις προτεραιότητές τους, και ο περιορισμός της κυκλικής εναλλαγής των καθυστερήσεων μέσα σε κάθε κατηγορία.

- *Δυναμικές προτεραιότητες:* Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική, οι καθυστερήσεις μετάδοσης μπορούν να αλλάξουν σύμφωνα με ένα αλγόριθμο, που παίρνει υπόψη του το φορτίο, το μήκος της ουράς κάθε σταθμού, κ.λ.π.
- *Συμπληρωματικές προτεραιότητες:* Κάθε ένας από τους σταθμούς μεταβαίνει διαδοχικά μεταξύ μίας χαμηλότερης και μίας υψηλότερης προτεραιότητας (TX καθυστέρηση). Η σειρά είναι τέτοια που, ο σταθμός i αποκτά διαδοχικά, μετά από την ανίχνευση ενός ACK, τις προτεραιότητες i και $(N + 1 - i)$.
- *Προτεραιότητες εξαρτώμενες από το μήκος της ουράς:* Κάθε σταθμός μπορεί να μονοπωλήσει το κανάλι, κατά τη διάρκεια περιόδων με μεγάλο μήκος ουράς, κάτι που σημαίνει μεγάλο φορτίο. Αυτό συμβαίνει με τη βοήθεια ενός bit κατάστασης (SOI: δείκτης υπερφόρτωσης του αποστολέα) το οποίο βρίσκεται στο πεδίο ελέγχου του πλαισίου και τίθεται κάθε φορά που η ουρά ενός σταθμού υπερβεί κάποιο προκαθορισμένο άνω όριο Q_1 . Ο σταθμός που θέτει αυτό το bit έχει δικαίωμα διαδοχικών μεταδόσεων με ενδιάμεσους χρόνους $T_X = t_0$ έως ότου η ουρά γίνει μικρότερη ενός κάτω ορίου Q_2 .

Τα πλεονεκτήματα του CSMA-CD-DP μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των CSMA-CD και token passing πρωτοκόλλων, δηλαδή επιτυγχάνεται άμεση προσπέλαση κατά τη διάρκεια αδρανών περιόδων, μέγιστη απόδοση σε υψηλό φορτίο,
- δίκαια κατανομή του καναλιού, ή προσπέλαση κάτω από διάφορες στρατηγικές που εισάγουν προτεραιότητες σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών,
- μία σύγκρουση (το μέγιστο) ανά μετάδοση πλαισίου.

Το βασικό μεγάλο μειονέκτημα του CSMA-CD-DP εντοπίζεται κυρίως στην ασυνήθιστα χαμηλή του απόδοση για τη μεσαία περιοχή φορτίων. Ο λόγος γι' αυτή τη συμπεριφορά, είναι οι περιστασιακές συγκρούσεις, που απαιτούν μεγάλο χρόνο για τη λύση τους, ο οποίος αυξάνεται ανάλογα με την καθυστέρηση διάδοσης του καναλιού και τον αριθμό των σταθμών.

Στην κατηγορία των πρωτοκόλλων με ασαφείς μηχανισμούς κράτησης, μπορούν να ενταχθούν αρκετά άλλα γνωστά πρωτόκολλα, όπως πχ. τα BRAM, Reservation CSMA/CD, Industrial 802.3, Hyperchannel, CSMA/CD with DCR, Echelon και CEBus, τα οποία έχουν παρόμοια αρχή λειτουργίας με το CSMA-CD-DP και πετυχαίνουν παραπλήσια απόδοση.

2.6.2.4. Το Πρωτόκολλο CSMA με Σαφείς και Ασαφείς Μηχανισμούς Κράτησης

Ενα αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο της κατηγορίας αυτής περιγράφεται σ' αυτήν την παράγραφο. Το πρωτόκολλο αυτό εισάγει μηχανισμούς προτεραιοτήτων κατά τη διάρκεια της προσπέλασης και ταυτόχρονα χρησιμοποιεί μία γενική στρατηγική αναμετάδοσης - η καθυστέρηση αναμετάδοσης είναι συνάρτηση της προτεραιότητας καθώς επίσης και του αριθμού των προηγούμενων προσπαθειών. Για την περιγραφή του πρωτοκόλλου, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συμβολισμοί.

- Ο χρόνος θεωρείται διακριτός με βήματα της μιας σχισμής με εύρος τη μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης.
- Υπάρχουν g διαφορετικές κατηγορίες προτεραιοτήτων $1, 2, \dots, g$, με ένα μικρότερο αριθμό να δηλώνει μεγαλύτερη προτεραιότητα.

Στο πρωτόκολλο αυτό αναπτύσσονται τρεις διαφορετικές τεχνικές για την μετάδοση πακέτων:

1. *Non-preemptive Priority (1-persistent mode)*: Όλα τα πακέτα μεταδίδονται σε 1-persistent mode. Αναλυτικά, κάθε χρήστης που θέλει να προσπελάσει το κανάλι και το βρίσκει απασχολημένο, περιμένει μία χρονική σχισμή και επαναλαμβάνει τον έλεγχο. Ανιχνεύοντας το κανάλι αδρανές, μεταδίδει ένα σήμα αρχικοποίησης (initialization) διάρκειας $g - i + 1$, όπου i είναι η προτεραιότητά του. Μετά το τέλος του σήματος, προσδιορίζεται αν το σήμα αυτό συγκρούστηκε κατά τη διάρκεια της μετάδοσής του. Αν ναι, ο σταθμός επαναλαμβάνει τον παραπάνω αλγόριθμο μετά από ένα τυχαίο χρόνο μέσης διάρκειας d_{ij} , όπου j είναι ένας μετρητής που αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που ανιχνεύει μία σύγκρουση στην προσπάθειά του να μεταδώσει. Αν όχι, αναμεταδίδει το πακέτο του.
2. *Non-preemptive Priority (1-persistent & non-persistent modes)*: Τα πακέτα υψηλότερης προτεραιότητας μεταδίδονται σε 1-persistent mode, ενώ τα χαμηλότερης προτεραιότητας σε non-persistent mode. Ένας σταθμός με προτεραιότητα $i \leq m$ (m = σταθερό) είναι 1-persistent και λειτουργεί ακριβώς όπως στο (1). Ένας σταθμός με $i > m$ είναι non-persistent. Λειτουργεί κι αυτός όπως στο (1), εκτός αν βρει το κανάλι απασχολημένο. Τότε, περιμένει για χρόνο d_{ij} slots, παρά για ένα slot, πριν ξαναπροσπαθήσει. Το j αυξάνεται πάλι κατά ένα, κάθε φορά που λαμβάνει μέρος μία καθυστέρηση (δηλ. αναβολή) της μετάδοσης.

3. *Preemptive Repeat Priority (non-persistent mode)*: Όλα τα πακέτα μεταδίδονται σε non-persistent mode. Ο αλγόριθμος αυτός διαφέρει από τους δύο προηγούμενους στα ακόλουθα σημεία:

- Το κανάλι θεωρείται απασχολημένο στην προτεραιότητα i μόνο αν ένα initialization σήμα, ή ένα πακέτο μεγαλύτερης προτεραιότητας από i βρίσκεται σε εξέλιξη.
- Κάθε φορά που ένας σταθμός ανιχνεύσει το κανάλι απασχολημένο, ή συγκρουστεί στην προσπάθειά του να μεταδώσει, καθυστερεί την αναμετάδοση του πακέτου του κατά d_{ij} .
- Η μετάδοση των χαμηλότερης προτεραιότητας πακέτων απορρίπτεται όταν ανιχνευτεί μία σύγκρουση που δημιουργούν τα initialization σήματα, που προέρχονται από σταθμούς υψηλότερης προτεραιότητας.

Στον τελευταίο αλγόριθμο έχει υποθεθεί ότι ο κάθε σταθμός γνωρίζει την προτεραιότητα του πακέτου που μεταδίδεται στο κανάλι, ώστε να μπορεί να το διακόψει αν η προτεραιότητα του δικού του πακέτου είναι μεγαλύτερη (preemption). Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί, αν κάθε πακέτο περιέχει την προτεραιότητά του. Στα σήματα αρχικοποίησης, εντούτοις, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η προτεραιότητά τους, αφού υπάρχει η πιθανότητα ταυτόχρονης μετάδοσης περισσοτέρων του ενός τέτοιων σημάτων στο κανάλι. Η δυσκολία αυτή εξαλείφεται με το να μην επιτρέπεται preemption κατά τη διάρκεια των περιόδων αρχικοποίησης.

Τα αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης αυτού του πρωτοκόλλου, για δύο προτεραιότητες, έδειξαν ότι ο αλγόριθμος:

- Ο αλγόριθμος (1) επιτυγχάνει μία μικρή μείωση της μέσης καθυστέρησης πακέτου για τα υψηλής προτεραιότητας πακέτα, έναντι της καθυστέρησης των χαμηλότερης προτεραιότητας πακέτων, ο αλγόριθμος
- Ο αλγόριθμος (2) επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση από το (1)
- Ο αλγόριθμος (3) εξασφαλίζει πολύ μεγάλες διαφορές στη μέση καθυστέρηση των δύο προτεραιοτήτων

Εντούτοις, η μέγιστη καθυστέρηση στη μετάδοση ενός πακέτου δεν περιορίζεται αυστηρά από ένα άνω όριο. Με άλλα λόγια, το πρωτόκολλο, θεωρητικά, δεν εξασφαλίζει φραγμένη καθυστέρηση και συνεπώς είναι ακατάλληλο για χρήση σε εφαρμογές αυστηρού πραγματικού χρόνου.

2.6.3. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ - ΔΕΝΔΡΟΥ

Η αρχή λειτουργίας των πρωτοκόλλων που ανήκουν σ' αυτή την κατηγορία, βασίζεται στην έννοια του παραθύρου παρίσταται ως ένα ζεύγος αριθμών, που συμβολίζονται $[a, b]$ και ορίζουν ένα διάστημα στον άξονα κάποιας παραμέτρου του μηνύματος. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι ο χρόνος άφιξης του μηνύματος, η διεύθυνση του σταθμού κλπ. Κάθε σταθμός παρακολουθεί το κανάλι συνεχώς, διατηρώντας ένα τρέχων παράθυρο. Αν το κανάλι βρεθεί αδρανές και κάποιος σταθμός έχει ένα μήνυμα που ανήκει στο τρέχων παράθυρο, δηλαδή, η παράμετρος του μηνύματος είναι μεγαλύτερη ή ίση του a και μικρότερη του b , τότε ο σταθμός μεταδίδει το μήνυμα αυτό. Τα πιθανά αποτελέσματα της μετάδοσης αυτής είναι τα ακόλουθα:

- Επιτυχής μετάδοση, αν μόνο ένας σταθμός μεταδώσει. Στην περίπτωση αυτή, ο σταθμός που μεταδίδει το μήνυμα συνεχίζει τη μετάδοση ως τη λήξη του μηνύματος.
- Σύγκρουση, αν μεταδώσουν περισσότεροι του ενός σταθμοί. Τότε, όλοι οι σταθμοί που μεταδίδουν, διακόπτουν τις μεταδόσεις των μηνυμάτων τους.

Κατόπιν το παράθυρο χωρίζεται σε δύο ή περισσότερα μικρότερα παράθυρα και το πρωτόκολλο χειρίζεται το καθένα απ' αυτά ξεχωριστά.

- Καμία μετάδοση δε λαμβάνει μέρος. Αυτό σημαίνει ότι κανένα μήνυμα δεν ανήκει στο τρέχων παράθυρο και έτσι όλοι οι σταθμοί παρατηρούν ότι το κανάλι είναι αδρανές. Στην περίπτωση αυτή, αν το παράθυρο είχε προκύψει από μία προηγούμενη διαίρεση, το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί το άλλο παράθυρο. Αλλιώς, εξετάζεται ένα άλλο μεγαλύτερο παράθυρο.

Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα παραθύρου, γενικά, διαφέρουν ως προς την παράμετρο του μηνύματος που χρησιμοποιείται στο παράθυρο και ως προς την τεχνική εκλογής του παραθύρου. Αναλυτικά, σε μία δεδομένη κατάσταση του συστήματος, το πρωτόκολλο πρέπει να προσδιορίσει:

- τη θέση του αρχικού παραθύρου
- το μήκος του αρχικού παραθύρου
- τη διαδικασία επιλογής ενός από τα δύο μισά ενός διαιρεμένου παραθύρου μετά από μία σύγκρουση

2.6.3.1. Το Πρωτόκολλο Message's Latest Time to Send (LS)

Η χρήση των πρωτοκόλλων παραθύρου σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, έχει ως σκοπό τη μεγιστοποίηση του αριθμού των πακέτων που μεταδίδονται μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Μία ενδιαφέρουσα ιδέα πάνω τέτοιου είδους πρωτόκολλα παραθύρου, είναι αυτή στην οποία το παράθυρο βασίζεται στην παράμετρο "*τελευταία χρονική στιγμή αποστολής του μηνύματος*" (*message's latest time to send, LS*). Αυτή η παράμετρος LS ορίζεται ως η διαφορά του χρόνου που το πακέτο P πρέπει να ληφθεί στον προορισμό του D_P , και του μήκους L_P (ολικός χρόνος που χρειάζεται για τη μετάδοση του μηνύματος).

Μία καινοτομία που εισάγει το πρωτόκολλο που βασίζεται στην ιδέα αυτή, είναι ότι ένα εισερχόμενο πακέτο στην ουρά οποιαδήποτε σταθμού, ξεκινάει τη διαδικασία μετάδοσης αν το LS του είναι μικρότερο από όλα τα υπόλοιπα πακέτα που περιμένουν να μεταδοθούν. Επίσης, το κάτω όριο του παραθύρου είναι ο τρέχων πραγματικός χρόνος t . Ακόμα, μετά από μία σύγκρουση, γίνεται τροποποίηση του μεγέθους του παραθύρου παρά διαίρεση σε δύο άλλα τμήματα. Αντίθετα, στα κλασσικά πρωτόκολλα παραθύρου, μετά από μία σύγκρουση, δεν επιτρέπεται σε ένα νέο μήνυμα να λάβει μέρος στη διαδικασία διαίρεσης των διαφόρων παραθύρων, έως ότου μεταδοθούν όλα τα πακέτα που είχαν δημιουργηθεί στην αρχή της διαδικασίας αυτής. Το αποτέλεσμα αυτής της κλασσικής τεχνικής είναι η μείωση του αριθμού των συγκρούσεων και της διακύμανσης στο χρόνο απόκρισης. Εντούτοις, η τεχνική αυτή δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές με περιορισμού χρόνου.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι, το πρωτόκολλο παραθύρου, που βασίζεται στην αρχή "τελευταία χρονική στιγμή αποστολής ενός μηνύματος", επιτυγχάνει μία ταξινομημένη μετάδοση όλων των μηνυμάτων του δικτύου και προσεγγίζει τη *minimum-laxity-first* στρατηγική. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι:

- Στην περίπτωση που δύο ή περισσότερα πακέτα από διαφορετικούς σταθμούς έχουν το ίδιο LS, υπάρχει η πιθανότητα τα πακέτα αυτά να μη μεταδοθούν έγκαιρα, γιατί ο αλγόριθμος που καθορίζει τη χρονική στιγμή μετάδοσής τους στηρίζεται σε τεχνικές τυχαιοποίησης του LS, ώστε να αποφευχθούν οι συνεχείς συγκρούσεις. Άρα, το πρωτόκολλο δεν εγγυάται τη μετάδοση όλων των μηνυμάτων του δικτύου μέσα σε αυστηρά καθορισμένα χρονικά όρια.
- Η υλοποίηση του πρωτοκόλλου απαιτεί τον ακριβή συγχρονισμό όλων των σταθμών του δικτύου. Σε ένα καταναμημένο σύστημα, αυτή η απαίτηση ικανοποιείται όταν υπάρχει κάποιος σταθμός που σε τακτικά χρονικά διαστήματα εκπέμπει ένα σήμα συγχρονισμού. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη

πολυπλοκότητα και μειωμένη ευρωστία (robustness) του συστήματος, πχ. στην περίπτωση βλάβης του σταθμού συγχρονισμού.

2.6.3.2. Το Πρωτόκολλο Dynamic p_i -persistent CSMA/CD

Το πρωτόκολλο αυτό, στηρίζεται στην αρχή ότι τα χαρακτηριστικά των διαφόρων διαδικασιών που ανταλλάσσουν μηνύματα στο δίκτυο, είναι γνωστά εκ των προτέρων. Στην περίπτωση αυτή, οι βέλτιστες τεχνικές για τη μετάδοση ενός πακέτου είναι η minimum-deadline-first και η minimum-laxity-first, δηλαδή τα πακέτα που έχουν τους αυστηρότερους περιορισμούς στη μετάδοσή τους (minimum-deadline, d_v) ή τη μικρότερη χρονική ελαστικότητα (minimum-laxity, $l_v(t)$: ο μέγιστος χρόνος που η μετάδοση του πακέτου v μπορεί να καθυστερήσει τη χρονική στιγμή t) πρέπει να μεταδοθούν με τη μέγιστη προτεραιότητα. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα μετάδοσης εξαρτάται από δύο παραμέτρους: την ελαστικότητα ενός έτοιμου προς μετάδοση πακέτου και ένα παράθυρο χρόνου X του συστήματος. Το παράθυρο χρησιμοποιείται για να μειώσει τον αριθμό των συγκρούσεων όταν το δίκτυο λειτουργεί σε υψηλό φορτίο. Με σκοπό την ανάθεση μεγαλύτερης πιθανότητας μετάδοσης στα πακέτα με τη μικρότερη ελαστικότητα χρόνου, η πιθανότητα μετάδοσης p_i , όπου i είναι η τιμή ελαστικότητας ενός πακέτου, προσδιορίζεται ως

$$p_i = \max\{p, (1/(i+1))^c\} \text{ εάν } i \leq X, 0 \text{ αλλιώς} \quad (2.8)$$

όπου οι παράμετροι του πρωτοκόλλου c και p ($0 < p < 1$) μπορεί να προσδιοριστούν σύμφωνα με το φορτίο του δικτύου και την ελαστικότητα του μηνύματος. Συνεπώς, τα περισσότερα από τα πακέτα με τις χαμηλότερες ελαστικότητες μπορούν να μεταδοθούν πριν τα πακέτα με τις μεγαλύτερες ελαστικότητες και έτσι επιτυγχάνεται μείωση του αριθμού των πακέτων που χάνονται, δηλαδή υπερβαίνουν το προκαθορισμένο laxity. Η λειτουργία του δυναμικού p_i - persistent CSMA/CD μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Βήμα 1 : Όταν ξεκινάει η λειτουργία του συστήματος, κάθε σταθμός ανιχνεύει το κανάλι και θέτει $X = \delta$, όπου δ είναι μία δύναμη του 2 ($\delta = 2^k$).
- Βήμα 2 : Για κάθε χρονική σχισμή χρόνου, που είναι ίση με το μέγιστο χρόνο διάδοσης του καναλιού (τ), αν το κανάλι είναι αδρανές, κάθε σταθμός θέτει την τιμή X ως ακολούθως:
- Αν στο προηγούμενο slot έχει γίνει σύγκρουση, τότε $X = \max \{1, (X/2)\}$.
 - Αλλιώς, $X = \min \{\delta, 2X\}$
- Βήμα 3 : Αν ο σταθμός έχει έτοιμο πακέτο για μετάδοση, ελέγχει την κατάσταση του καναλιού και,
- Αν το κανάλι είναι αδρανές, ο σταθμός ελέγχει τη χρονική ελαστικότητα i του πακέτου. Εάν $i < 0$, ο σταθμός απορρίπτει το πακέτο γιατί δεν μπορεί να το μεταδώσει πριν την προκαθορισμένη χρονική στιγμή (deadline). Αλλιώς, υπολογίζει την p_i σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση. Κατόπιν ο σταθμός μεταδίδει το πακέτο με πιθανότητα p_i και με πιθανότητα $1 - p_i$ αναβάλλει τη μετάδοση ως το επόμενο slot όπου επαναλαμβάνει το βήμα 3.
 - Αν το κανάλι είναι απασχολημένο, ο σταθμός περιμένει μέχρι τη στιγμή που θα γίνει αδρανές, δηλ. ως το τέλος της τρέχουσας μετάδοσης και εφαρμόζει το βήμα 2.
- Βήμα 4: Αν, κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης, ο σταθμός ανιχνεύσει ότι το πακέτο του έχει συγκρουστεί, σταματάει αμέσως τη μετάδοση και περιμένει ως τη στιγμή που το κανάλι θα γίνει αδρανές οπότε και εκτελεί το βήμα 2.

Από την περιγραφή του αλγορίθμου του dynamic p_i - persistent CSMA/CD, είναι φανερό ότι η τεχνική minimum-laxity-first οδηγεί σε δραστική μείωση των απορριπτόμενων πακέτων, λόγω της δίκαιης ανάθεσης του καναλιού. Εντούτοις, η χειρότερη περίπτωση, δηλαδή ο μέγιστος χρόνος καθυστέρησης στη μετάδοση ενός πακέτου, δε μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς. Με άλλα λόγια, το πρωτόκολλο δεν εγγυάται ένα μέγιστο χρόνο καθυστέρησης στη μετάδοση κάθε πακέτου.

2.6.4. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΜΕ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΠΕΛΑΣΗΣ

Η συμπληρωματική συμπεριφορά των πρωτοκόλλων τυχαίας προσπέλασης και ντετερμινιστικών, έχει οδηγήσει σε σχεδιάσεις υβριδικών πρωτοκόλλων, που έχουν σα στόχο το συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των δύο βασικών κατηγοριών. Στη παράγραφο αυτή θα αναλυθούν ορισμένα αντιπροσωπευτικά πρωτόκολλα που έχουν υψηλή απόδοση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

2.6.4.1. Το Πρωτόκολλο Hybrid Token – Non-persistent CSMA/CD

Το πρωτόκολλο αυτό αποτελεί συνδυασμό ενός ντετερμινιστικού (token passing) και ενός πρωτοκόλλου τυχαίας προσπέλασης (non-persistent CSMA/CD). Ένας από τους στόχους της σχεδίασης αυτής ήταν η υψηλή απόδοση, όσον αφορά στη σχέση φορτίου - μέσης καθυστέρησης, για όλα τα φορτία του δικτύου. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, επιλέχθηκε ένας αλγόριθμος που επιτρέπει στους σταθμούς του δικτύου να λειτουργούν ταυτόχρονα με δύο τρόπους, ώστε να συνδυάζονται με απλό τρόπο τα πλεονεκτήματα των τυχαίων και ντετερμινιστικών πρωτοκόλλων.

Σύμφωνα με αυτό το πρωτόκολλο, οι σταθμοί του δικτύου είναι συνδεδεμένοι σε τοπολογία τύπου διαύλου και είναι αριθμημένοι από 1 ως M . Οι ενεργοί σταθμοί είναι οργανωμένοι σε ένα λογικό δακτύλιο σύμφωνα με τις διευθύνσεις τους (1, 2, ..., M , 1, ..., αν όλοι οι σταθμοί είναι ενεργοί), και κάποιος απ' όλους κατέχει το κουπόνι.

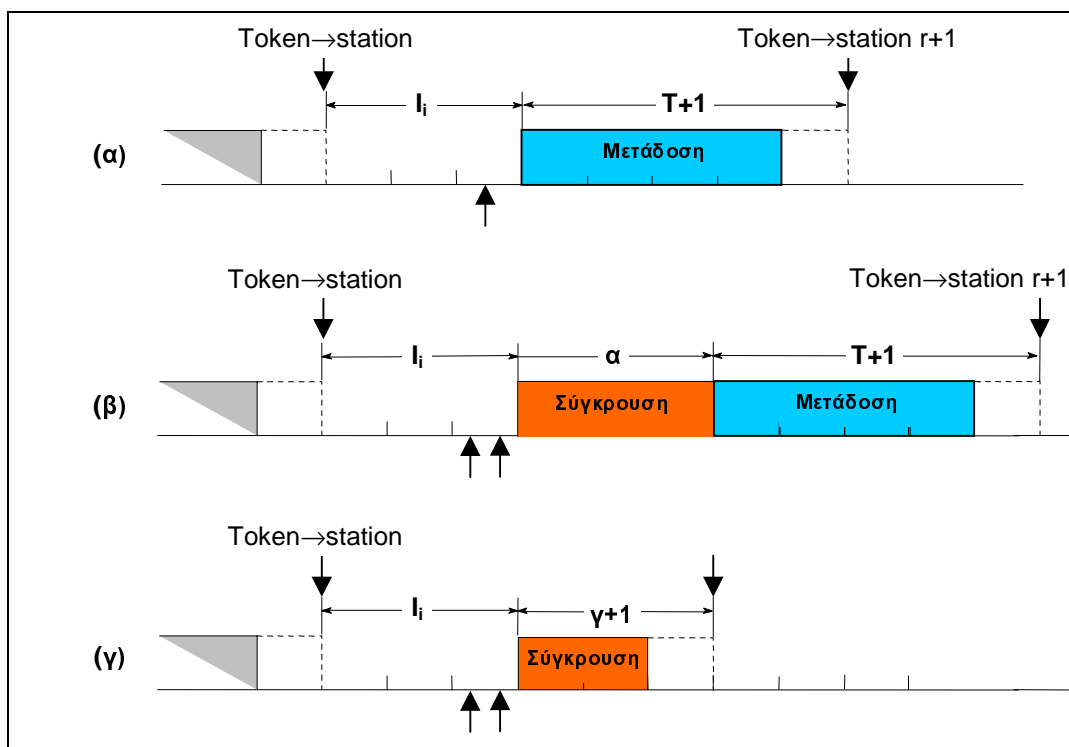
Όλοι οι σταθμοί, εκτός αυτού που κατέχει το κουπόνι, λειτουργούν σύμφωνα με το CSMA/CD πρωτόκολλο, δηλαδή ένας ενεργός σταθμός (σταθμός που έχει πακέτο προς μετάδοση) ανιχνεύει το κανάλι και μεταδίδει το πακέτο αν το κανάλι είναι αδρανές. Αν κάποιος σταθμός ανιχνεύσει ότι το πακέτο του έχει συγκρουστεί, σταματάει τη μετάδοση και προγραμματίζει την αναμετάδοσή του μετά από ένα τυχαίο χρονικό διάστημα, δηλαδή εισέρχεται στην κατάσταση "backoff".

Ο σταθμός με το κουπόνι εκτελεί διαφορετικό αλγόριθμο. Αν έχει πακέτο προς μετάδοση, το μεταδίδει αμέσως μόλις ανιχνεύσει το κανάλι αδρανές. Στην περίπτωση που το πακέτο του συγκρουστεί, ο σταθμός δε σταματάει τη μετάδοσή του και έτσι καταλαμβάνει το κανάλι. Ειδικότερα, κρατάει το κανάλι απασχολημένο για χρόνο τουλάχιστον ίσο με το διπλάσιο του μέγιστου χρόνου διάδοσης και μετά το τέλος του χρόνου αυτού αναμεταδίδει το πακέτο του αμέσως. Συνεπώς, ο σταθμός με το κουπόνι δεν πρόκειται να υποστεί περισσότερες από μία συγκρούσεις.

Όλοι οι σταθμοί έχουν την ικανότητα της συνεχούς παρακολούθησης του καναλιού. Κάθε φορά που η κατάσταση του καναλιού αλλάζει από ενεργή σε αδρανή, το κουπόνι περνάει στον επόμενο σταθμό του λογικού δακτυλίου. Αυτή η αλλαγή στην κατάσταση του καναλιού, συμβαίνει είτε με το τέλος μίας μετάδοσης (ή σύγκρουσης και στη συνέχεια μετάδοση πακέτου από τον κάτοχο του token) ή με το τέλος μίας σύγκρουσης μεταξύ σταθμών χωρίς το κουπόνι. Είναι προφανές ότι το πέρασμα του token μεταξύ των σταθμών γίνεται με ασαφή τρόπο, δηλαδή αντιστοιχεί στο τέλος περιόδων μετάδοσης και όχι στη σαφή μετάδοση ενός μηνύματος ελέγχου.

Ένας σταθμός στην κατάσταση "back-off" αναμεταδίδει το πακέτο του αμέσως μόλις λάβει το token.

Στο Σχ.2.9 δείχνονται τρεις διαφορετικές περιόδους μετάδοσης, στις οποίες φαίνεται ο μηχανισμός περάσματος του token, η διαδικασία της κατάληψης του καναλιού (μετά από μία σύγκρουση) από τον κάτοχο του token και η περίπτωση της σύγκρουσης μεταξύ σταθμών χωρίς το token. Σημειώνεται ότι η διάρκεια μίας σύγκρουσης αντιστοιχεί σε γ σχισμές εύρους ίσου με τον μέγιστος χρόνος διάδοσης και το overhead της διαδικασίας κατάληψης του καναλιού από τον κάτοχο του κουπονιού, σε α slots.



Σχ.2. 9. Περίοδοι Μετάδοσης

(α) Επιτυχής μετάδοση χωρίς σύγκρουση

(β) Επιτυχής μετάδοση με κατάληψη (ένας από τους συγκρουόμενους σταθμούς έχει το token)

(γ) Ανεπιτυχής Μετάδοση (οι συγκρουόμενοι σταθμοί δεν έχουν το token)

Η υλοποίηση του ασαφούς περάσματος του token χρειάζεται την παρακολούθηση των παρακάτω μεταβλητών κατάστασης από κάθε σταθμό:

- m : ο αριθμός των ενεργών σταθμών του λογικού δακτυλίου
- r : ο αριθμός των αλλαγών κατάστασης του καναλιού (από ενεργό σε αδρανές) πριν ο σταθμός γίνει κάτοχος του token. Κάθε φορά που λαμβάνει μέρος μία αλλαγή κατάστασης του καναλιού, όλοι οι σταθμοί μειώνουν το r κατά 1 (modulo m). Ο κάτοχος του token είναι ο σταθμός που έχει το $r = 0$.

Εκτός του μηχανισμού για το πέρασμα του κουπονιού, χρειάζονται και διαδικασίες για την αρχικοποίηση του λογικού δακτυλίου, εισαγωγή και διαγραφή ενός σταθμού και τη διαχείριση των χαμένων και πολλαπλών κουπονιών. Η αρχικοποίηση του συστήματος γίνεται με έναν αλγόριθμο παρόμοιο με του προτύπου IEEE 802.4. Αυτός είναι ουσιαστικά ένας κατανεμημένος αλγόριθμος κατά τον οποίο η διαχείριση ή διαιτησία (arbitration) βασίζεται στα bits διεύθυνσης των σταθμών που θέλουν να εισέλθουν στο σύστημα. Στο τέλος της περιόδου αρχικοποίησης, ο λογικός δακτύλιος αποτελείται από ένα σταθμό μόνο. Ο σταθμός αυτός κατέχει το token και οι μεταβλητές του έχουν τις τιμές $m=1$ και $r=0$.

Μετά την περίοδο αρχικοποίησης, οποιοσδήποτε σταθμός μπορεί να εισέλθει στο λογικό δακτύλιο, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη διαδικασία. Χρησιμοποιώντας το CSMA/CD πρωτόκολλο μεταδίδει ένα μήνυμα αίτησης εισόδου, που απευθύνεται σε όλους και στο οποίο περιέχεται η διεύθυνσή του. Αυτό το μήνυμα ξεκινάει έναν κύκλο εισόδου, κατά τη διάρκεια του οποίου, κάθε σταθμός του λογικού δακτυλίου μεταδίδει τη διεύθυνσή του (μέσω του μηνύματος απόκρισης εισόδου, αμέσως μόλις λάβει το κουπόνι. Ο κύκλος τελειώνει όταν ο σταθμός, που μετέδωσε το πρώτο μήνυμα απόκρισης εισόδου, λάβει πάλι το κουπόνι μετά από μία ολόκληρη περιστροφή του και μεταδώσει το μήνυμα τέλους του κύκλου εισόδου. Μετά τη λήψη του τελευταίου μηνύματος, κάθε σταθμός του λογικού δακτυλίου αυξάνει τη μεταβλητή m κατά 1. Επίσης αυξάνει το r αν ο νεοεισερχόμενος σταθμός βρίσκεται μεταξύ του κατόχου του token και του ίδιου. Ο νεοεισερχόμενος σταθμός μπορεί να προσδιορίσει τις

τιμές των m και r από τις διευθύνσεις που περιέχονται στα μηνύματα απόκρισης εισόδου.

Η διαδικασία της διαγραφής ενός σταθμού είναι παρόμοια με την παραπάνω. Ο σταθμός, που θέλει να εξέλθει του λογικού δακτυλίου, περιμένει έως ότου λάβει το κουπόνι και τότε μεταδίδει προς όλους τους σταθμούς ένα μήνυμα διαγραφής σταθμού, που περιέχει τη διεύθυνσή του. Όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί, που θα λάβουν το μήνυμα, μειώνουν τις τιμές των μεταβλητών m και r κατά 1.

Τα πολλαπλά κουπόνια ανιχνεύονται από δύο ή περισσότερους σταθμούς, που προσπαθούν να καταλάβουν το κανάλι μετά από μία σύγκρουση. Στην περίπτωση αυτή, επαναλαμβάνεται η διαδικασία αρχικοποίησης από τους σταθμούς αυτούς. Λόγω της μη ύπαρξης φυσικού μηνύματος κουπονιού, δεν υπάρχει περίπτωση απώλειάς του.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης της απόδοσης του υβριδικού πρωτοκόλλου, προκύπτουν τα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Το υβριδικό πρωτόκολλο έχει καλύτερη απόδοση, ως προς τη σχέση αποδοτικού φορτίου - μέσης καθυστέρησης, από το non-persistent CSMA/CD για όλες τις τιμές του φορτίου και όλες τις τιμές της μέσης καθυστέρησης αναμετάδοσης (v).
- Η απόδοση του υβριδικού πρωτοκόλλου, στα υψηλά φορτία, είναι πρακτικά όμοια με αυτήν ενός πρωτοκόλλου 'κουπονιού', στο οποίο ο χρόνος περάσματος του token αντιστοιχεί σε τρεις χρονικές σχισμές εύρους ίσου με τον μέγιστο χρόνο διάδοσης του καναλιού. Στα χαμηλά φορτία υπάρχει μία σαφής υπεροχή του υβριδικού έναντι του απλού πρωτοκόλλου 'κουπονιού'. Συνεπώς, το υβριδικό πρωτόκολλο έχει επιτύχει, με ένα αρκετά κομψό τρόπο, το συνδυασμό δύο συμπληρωματικών ως προς την απόδοσή τους πρωτοκόλλων (CSMA/CD non-persistent, Token).

- Η διαδικασία αρχικοποίησης και εισαγωγής / διαγραφής σταθμών στο λογικό δακτύλιο, γίνεται με αλγόριθμους παρόμοιους με του IEEE 802.4 πρωτοκόλλου. Αυτοί οι αλγόριθμοι:
 - απαιτούν την ύπαρξη ειδικών MAC πακέτων ελέγχου
 - αυξάνουν την πολυπλοκότητα και
 - μειώνουν το αποδοτικό φορτίο του δικτύου.
- Δεν υπάρχει κάποια διαδικασία, που να προσδιορίζει ακριβώς τη μέγιστη καθυστέρηση πακέτου, η οποία εξαρτάται άμεσα από τον backoff αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, η εξασφάλιση ενός άνω ορίου στη μέγιστη καθυστέρηση όλων των πακέτων, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός backoff αλγόριθμου με περιορισμένη κατανομή (π.χ. ομοιόμορφη με μέση τιμή που να προσδιορίζεται από τη backoff συνάρτηση), το οποίο δεν προβλέπεται από το συγκεκριμένο πρωτόκολλο.
- Δεν γίνεται καμία αναφορά σε κίνηση διαφορετικών προτεραιοτήτων, κάτι που είναι πρωταρχικής σημασίας για πρωτόκολλα που στοχεύουν σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

2.6.4.2. Το Πρωτόκολλο Hybrid Virtual Token – p-persistent CSMA/CD

Το Virtual Token είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο που σκοπεύει στη βελτίωση της απόδοσης του CSMA/CD στα υψηλά φορτία, διατηρώντας συγχρόνως τα καλά χαρακτηριστικά του στα χαμηλά φορτία. Συγκεκριμένα, η απόδοσή του είναι καλύτερη από τα πρωτόκολλα χωρίς συγκρούσεις για όλο το εύρος του φορτίου και συγκρίσιμη με την απόδοση των γνωστών πρωτοκόλλων ανταγωνισμού για τα χαμηλά και μεσαία φορτία.

Λόγω της ομοιότητας αυτού του πρωτοκόλλου με το προηγούμενο υβριδικό πρωτόκολλο, η περιγραφή του θα περιοριστεί στα σημεία που διαφοροποιούν τα δύο πρωτόκολλα μεταξύ τους. Το πρωτόκολλο δεν χρησιμοποιεί την τεχνική της κατάληψης του καναλιού από το σταθμό που κατέχει το κουπόνι. Αντίθετα, ο αλγόριθμος που επιτρέπει στον κάτοχο του κουπονιού να μεταδώσει με επιτυχία το πακέτο του, στην περίπτωση που υπάρχουν ταυτόχρονα πολλοί έτοιμοι σταθμοί, είναι ρεαλιστικός και σύμφωνος με τις ιδιότητες και δυνατότητες των υπάρχοντων συνηθισμένων δικτυακών ελεγκτών. Συγκεκριμένα, αν ο σταθμός με το κουπόνι έχει ένα πακέτο για μετάδοση, ακολουθεί τον ακόλουθο αλγόριθμο:

- Βήμα 1. Αν το κανάλι είναι ελεύθερο, ο σταθμός μεταδίδει το πακέτο του, αλλά όχι νωρίτερα από p_{ss} μονάδες χρόνου (ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών πακέτων) μετά το τέλος της τελευταίας δραστηριότητας στο δίκτυο.

- Βήμα 2. Αν το κανάλι είναι απασχολημένο, ο σταθμός περιμένει ως το τέλος της δραστηριότητας του καναλιού. Αν η δραστηριότητα αυτή αντιστοιχεί σε μία επιτυχή μετάδοση, μετά το τέλος της το κουπόνι μεταβαίνει στον επόμενο σταθμό και έτσι χάνεται η δυνατότητα μετάδοσης με τη μέγιστη προτεραιότητα.

- Βήμα 3. Αν ο σταθμός συγκρουστεί, απορρίπτει τη μετάδοση αμέσως, στέλνει ένα jamming σήμα (για j_i μονάδες χρόνου) και περιμένει για $2t_a + p_{ss}$ μονάδες χρόνου πριν την αναμετάδοση. Επειδή όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί, χωρίς το κουπόνι, περιμένουν για μεγαλύτερο (τουλάχιστο κατά $c_d > 2t_a$) χρόνο μετά από μία σύγκρουση, το πρωτόκολλο εγγυάται ότι ο κάτοχος του κουπονιού δε θα συγκρουστεί κατά την αναμετάδοση του πακέτου του.

Βήμα 4. Αν, περιμένοντας το κανάλι να γίνει αδρανές (βήμα (2)), ο σταθμός ανιχνεύσει μία σύγκρουση, τότε υπακούει σε κανόνες παρόμοιους με του βήματος (3), δηλ. περιμένει c_0 μονάδες χρόνου ($c_0 > 2t_a + j_i + p_{ss}$) και μετά ξεκινάει τη μετάδοση του πακέτου του, η οποία είναι εγγυημένα επιτυχής.

Κάθε σταθμός, που έχει ένα πακέτο για μετάδοση και δεν κατέχει το κουπόνι, συμπεριφέρεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τρόπο:

Βήμα 1. Αν το κανάλι είναι αδρανές, ο σταθμός μεταδίδει το πακέτο του, αλλά όχι νωρίτερα από p_s μονάδες χρόνου ($p_s > p_{ss}$) μετά το τέλος της προηγούμενης μετάδοσης.

Βήμα 2. Αν το κανάλι είναι απασχολημένο, ο σταθμός περιμένει έως ότου γίνει αδρανές (λήξη της τρέχουσας δραστηριότητας). Αν η δραστηριότητα αυτή ήταν μία επιτυχής μετάδοση, ο σταθμός αλλάζει την τιμή του μετρητή κουπονιού ($\text{token} - 1$) mod N και επαναλαμβάνει το βήμα (1) εκτός και εάν τώρα έχει γίνει ο κάτοχος του κουπονιού.

Βήμα 3. Αν ο σταθμός ανιχνεύσει μία σύγκρουση, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του πακέτου του, σταματάει άμεσα τη μετάδοση και μεταδίδει ένα jamming σήμα (για j_i μονάδες χρόνου). μετά περιμένει για $2t_a + p_{ss} + c_d$ μονάδες χρόνου. Αν ο χρόνος αυτός λήξει και δεν ανιχνευτεί καμία δραστηριότητα στο κανάλι, ο σταθμός ξέρει ότι ο κάτοχος του κουπονιού δεν είχε κανένα πακέτο για μετάδοση και συνεπώς μειώνει το μετρητή του κουπονιού. Αυτή η μείωση του μετρητή έχει γίνει σε όλους τους σταθμούς και τώρα ο νέος κάτοχος του κουπονιού μπορεί να έχει πακέτο για μετάδοση. Με σκοπό να επιτραπεί στο σταθμό αυτό να μεταδώσει, όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί περιμένουν έναν

επιπλέον χρόνο ($c_s > 0$). Στην πραγματικότητα, αν λήξει ο χρόνος αυτός και καμία δραστηριότητα δεν έχει ανιχνευτεί στο κανάλι, ο σταθμός επιτρέπεται να αναμεταδώσει το πακέτο του σύμφωνα με το βήμα (1). Εντούτοις, μπορεί να χρησιμοποιήσει μία backoff τεχνική και να περιμένει για ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Παρακάτω αναλύονται κάποιοι backoff αλγόριθμοι, που μπορούν να εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο.

Βήμα 4. Αν, περιμένοντας το τέλος της τρέχουσας δραστηριότητας στο κανάλι (βήμα(1)), ο σταθμός ανιχνεύσει μία σύγκρουση, τότε υπακούει σε κανόνες παρόμοιους με του βήματος (3), δηλ. δε στέλνει το jamming σήμα, αλλά περιμένει για $c_0 + c_d + c_s$ μονάδες χρόνου.

Έχει μελετηθεί, ένας αριθμός backoff αλγορίθμων, ώστε να επιτευχθεί ένα ανώτατο όριο στην καθυστέρηση μετάδοσης οποιουδήποτε πακέτου και συγχρόνως, να επιτευχθεί η καλύτερη σχέση φορτίου - μέσης καθυστέρησης. Αυτοί οι backoff αλγόριθμοι έχουν ως εξής:

- 1) Η πρώτη μέθοδος, που μελετήθηκε, είναι η VT_0 (Virtual Token, 1-persistent, 0-backoff). Η μέθοδος αυτή, στην ουσία, καταργεί το μηχανισμό, που επαναπρογραμματίζει μία μετάδοση μετά από ένα τυχαίο χρόνο, αναγκάζοντας τους σταθμούς μετά από μία σύγκρουση, να προσπαθούν συνέχεια για τη μετάδοση των πακέτων τους, αμέσως μετά τη λήξη της προηγούμενης μετάδοσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι το VT_0 πετυχαίνει την καλύτερη απόδοση ως προς τη μέγιστη καθυστέρηση πακέτου, και τη χειρότερη ως προς τη μέση καθυστέρηση, συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες μεθόδους.
- 2) Η δεύτερη μέθοδος ονομάζεται Segmented Linear Backoff (συμβολίζεται VT_e). Σ' αυτή τη μέθοδο, ο μέγιστος χρόνος backoff οριοθετείται στα 1200

bits. Όταν ξεπεραστεί αυτό το όριο, ο σταθμός εισέρχεται στη VT_0 mode λειτουργίας, έως ότου ανιχνεύσει το τέλος μίας επιτυχούς μετάδοσης. Αυτή η μέθοδος απέδωσε καλύτερα από τη VT_0 , αλλά η σχέση φορτίου - μέσης καθυστέρησης ήταν χειρότερη από του CSMA/CD για φορτία που κυμαίνονται από 0.2 - 0.6.

- 3) Η τρίτη μέθοδος προέρχεται από το γνωστό p-persistent πρωτόκολλο, και συμβολίζεται ως VT_p . Ένας σταθμός, με πακέτο έτοιμο προς μετάδοση, που δεν κατέχει το token, ακολουθεί τους ακόλουθους κανόνες:
- i) Η πρώτη προσπάθεια για μετάδοση γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα, μετά τη λήξη του χρονικού διαστήματος, που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών πακέτων, με πιθανότητα 1.
 - ii) Αν ο σταθμός συγκρουστεί, τότε προσπαθεί να αναμεταδώσει με πιθανότητα p, μετά από κάθε διάστημα χρόνου ίσου με $2t_a$, τηρώντας το διάστημα μεταξύ πακέτων. Με σκοπό την ύπαρξη ενός ανώτατου ορίου στην καθυστέρηση μετάδοσης οποιουδήποτε πακέτου, έχει τεθεί ένα όριο στο χρόνο (1200 bits), πριν τη λήξη του οποίου, η αναμετάδοση ενός πακέτου γίνεται σύμφωνα με το p-persistent πρωτόκολλο. Αν αυτός ο χρόνος λήξει, ο σταθμός εκτελεί το βήμα (i). Η απόδοση του VT_p είναι, σχεδόν, στα ίδια επίπεδα με την απόδοση του VT_e .
 - iii) Η τέταρτη μέθοδος, που συμβολίζεται ως VT_β , επιτρέπει σε κάθε σταθμό να προσδιορίζει την backoff καθυστέρηση, μετά από μία σύγκρουση, συναρτήσσει του κουπονιού. Συγκεκριμένα, αυτή η καθυστέρηση προσδιορίζεται μέσω της συνάρτησης $\beta(\text{tokens}_S)$, όπου tokens_S είναι η τιμή του κουπονιού στο σταθμό S. Η συνάρτηση, που έδειξε τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν η $\beta(i) = (N-i) \times \text{backoff_factor}$.

όπου ο `backoff_factor` είναι μία παράμετρος, που προσδιορίζεται πειραματικά ($0 \leq \text{backoff_factor} \leq 1$). Η καλύτερη απόδοση, ως προς τη μέση καθυστέρηση πακέτου, επιτυγχάνεται όταν ο `backoff_factor` = 0.1.

Συμπερασματικά, το πρωτόκολλο αυτό έχει παρόμοια απόδοση με το CSMA/CD 1-persistent, για χαμηλά και μεσαία φορτία (ως 0.5 περίπου) και προσεγγίζει την απόδοση του CSMA-CD-DP στα υψηλά φορτία. Όμως, δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα εισόδου / εξόδου σταθμών στο / από το δίκτυο, ο χειρισμός πολλαπλών προτεραιοτήτων, καθώς και ο τρόπος χειρισμού λαθών από την ύπαρξη εσφαλμένων ή / και πολλαπλών κουπονιών.

2.6.4.3. Το Πρωτόκολλο Group Implicit Token – CSMA/CD (GIT-CSMA/CD)

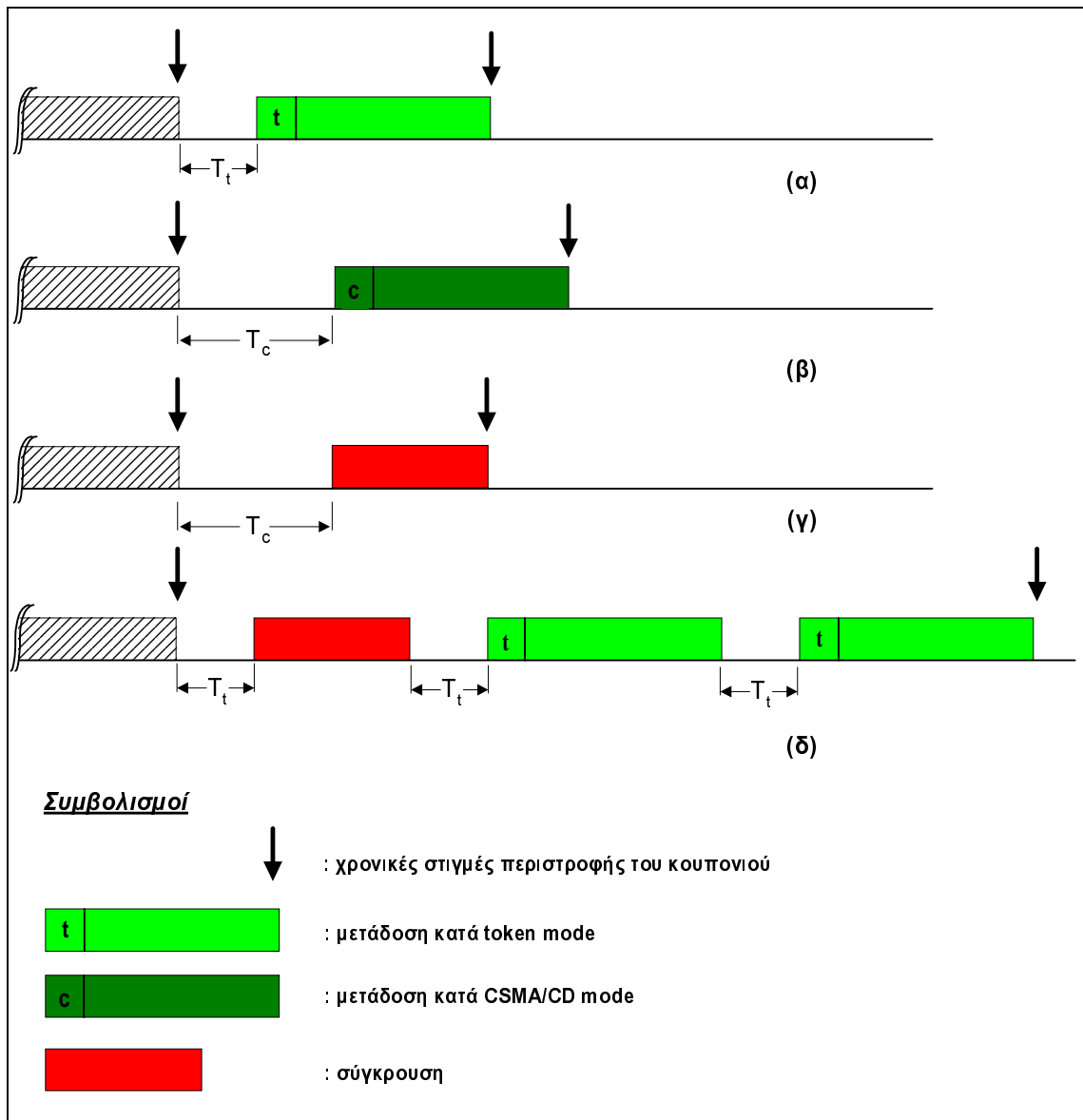
Το πρωτόκολλο GIT-CSMA/CD υλοποιεί προσπέλαση των κόμβων στο δίκτυο με υβριδικό μηχανισμό, δηλαδή με ανταγωνιστικό (CSMA/CD mode) και ντετερμινιστικό (token mode) τρόπο. Χρησιμοποιεί, επίσης, την τεχνική της ομαδοποίησης (grouping) των κόμβων που κατέχουν το κουπόνι, έτσι ώστε αυτοί οι κόμβοι να έχουν την υψηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τους υπολοίπους. Κάθε επίπεδο προτεραιότητας αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρονικό διάστημα IFS μεταξύ διαδοχικών πλαισίων-πακέτων. Ο μηχανισμός διακίνησης του κουπονιού είναι ασαφής και αντιστοιχεί σε συγκεκριμένα γεγονότα στο κανάλι αντί να χρησιμοποιείται ένα σαφές πακέτο ελέγχου όπως στο πρότυπο IEEE 802.4.

Οι σταθμοί του δικτύου (1, 2, ..., M) συνδέονται σε μία τοπολογία διαύλου και οργανώνονται σε m ομάδες (G_1, G_2, \dots, G_m) υλοποιώντας ένα λογικό δακτύλιο. Κάθε ομάδα περιλαμβάνει και σταθμούς και το κουπόνι περιστρέφεται μεταξύ των ομάδων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που περιγράφονται στη συνέχεια, αφού η κατάσταση του καναλιού έχει αλλάξει από ενεργή (busy) σε αδρανή (idle). Στο τέλος της τρέχουσας δραστηριότητας του καναλιού, οι

σταθμοί της ομάδας G_i^T , που κατέχει το κουπόνι, συνεχίζουν να αναβάλλουν τις πιθανές μεταδόσεις για ένα διάστημα T_t πριν ενεργοποιήσουν αυτές τις μεταδόσεις με χρήση του token mode. Οι σταθμοί που είναι έτοιμοι να μεταδώσουν, αλλά δεν κατέχουν το κουπόνι, περιμένουν για ένα χρόνο T_c ($\geq T_t$) και μόνο εάν κανείς από τους σταθμούς της ομάδας G_i^T μεταδώσει, αυτοί μπορούν να έχουν προσπέλαση στο κανάλι σύμφωνα με το πρωτόκολλο 1-persistent CSMA/CD. Η σχέση μεταξύ των χρόνων T_c , T_t πρέπει να εγγυάται ότι οι μεταδόσεις σε token mode δεν θα παρακωλύονται από αυτές του CSMA/CD mode.

Το “πέρασμα” (ή διακίνηση) του ασαφούς κουπονιού μεταξύ των ομάδων συμβαίνει στο τέλος των περιόδων δραστηριότητας του καναλιού, όταν συμβεί μία από τις ακόλουθες συνθήκες, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.10:

- α) Τέλος μιας επιτυχούς μετάδοσης από ένα σταθμό που ανήκει στην ομάδα που κατέχει το κουπόνι (token mode)
- β) Τέλος μιας επιτυχούς μετάδοσης από οποιοδήποτε σταθμό που δεν κατέχει το κουπόνι (CSMA/CD mode)
- γ) Τέλος μιας σύγκρουσης μεταξύ σταθμών που δεν κατέχουν το κουπόνι (CSMA/CD mode)
- δ) Τέλος της τελευταίας μετάδοσης token mode κατά την διάρκεια της περιόδου ντετερμινιστικής ανάλυσης της σύγκρουσης μεταξύ των k σταθμών της ομάδας που έχει το κουπόνι (Σχ.2.8.δ, $k=2$) η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχ.2. 10. Ο μηχανισμός διακίνησης του ασαφούς κουπονιού μεταξύ των ομάδων των σταθμών

Ο αλγόριθμος που ελέγχει την αναμετάδοση των συγκρουόμενων πακέτων σε CSMA/CD mode είναι μια τροποποίηση του γνωστού Binary Exponential Backoff (BEB) και εγγυάται, σε συνδυασμό με τη λειτουργία κατά token mode, ένα ανώτατο γνωστό όριο καθυστέρησης για την αναμετάδοση όλων των συγκρουόμενων πακέτων. Αναλυτικά, όταν ανιχνευθεί μια σύγκρουση μεταξύ

πακέτων σταθμών που δεν κατέχουν το κουπόνι, οι σταθμοί αυτοί τερματίζουν τις μεταδόσεις τους, μεταδίδουν jamming σήματα και σχεδιάζουν τις αναμεταδόσεις τους, μετά από ένα τυχαίο αριθμό σχισμών (backoff διάστημα). Ο αριθμός των σχισμών, T_{cs} , πριν από την n -ιοστή προσπάθεια αναμετάδοσης επιλέγεται ως ένας ομοιόμορφα κατανομημένος τυχαίος αριθμός r στην περιοχή $0 \leq r \leq 2^{(n-bv)}$, όπου v είναι ένας ακέραιος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του άνω ορίου του backoff διαστήματος (2^v-1) και $b = \text{Int}[(n-1)/v]$. Στην περίπτωση όπου ένας σταθμός λάβει το κουπόνι πριν εκπνεύσει το backoff διάστημά του, αυτός μεταδίδει σύμφωνα με τον token mode. Η μέγιστη καθυστέρηση T_f^c για μια επιτυχή μετάδοση, οφειλομένη στον backoff αλγόριθμο, δίνεται από τη σχέση,

$$\begin{aligned} T_f^c &= m(T_c + P_c + P_s) + T_{cs} \left[l \sum_{i=1}^v (2^i - 1) + \sum_{i=1}^c (2^i - 1) \right] + T_t + P_s \\ &= m(T_c + P_c + P_s) + T_{cs} [l(2(2^v - 1) - v) + 2(2^c - 1) - c] + T_t + P_s \end{aligned} \quad (2.9)$$

όπου $l = \text{Int}[m/v]$, $c = m - lv$, είναι το μήκος του συγκρουόμενου πακέτου και P_s το μήκος πακέτου ($P_c \leq P_s$). Η καθυστέρηση αυτή υπολογίζεται θεωρώντας ότι το πακέτο “φθάνει” στην κορυφή της ουράς ενός σταθμού ακριβώς μόλις ο σταθμός έχει “χάσει” το κουπόνι. Επίσης, μια σύγκρουση λαμβάνει χώρα κάθε φορά που ο σταθμός ενεργοποιεί μια μετάδοση ακολουθούμενη από το μέγιστο backoff διάστημα, έως ότου ο σταθμός “ξαναπάρει” το κουπόνι και μεταδώσει το πακέτο του σε token mode.

Μια διαφορετική διαδικασία ακολουθείται εάν ανιχνευθεί μια σύγκρουση μεταξύ των πακέτων σταθμών της ομάδας που κατέχει το κουπόνι. Στην περίπτωση αυτή υλοποιείται ένας ντετερμινιστικός κύκλος ανάλυσης της σύγκρουσης, επιτρέποντας με κάθε σταθμό της ομάδας G_i^T να μεταδώσει το πακέτο του σε μια προκαθορισμένη σχισμή. Κάθε σταθμός καθυστερεί για ένα αριθμό σχισμών (διάρκειας ίσης με την μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης καναλιού) ίσο με την

σχετική του θέση μέσα στην ομάδα (από 1 έως k) πριν ενεργοποιήσει την αναμετάδοση του πακέτου που έχει συγκρουσθεί. Εάν ένας σταθμός της ομάδας G_i^T δεν ανιχνεύσει μετάδοση από τους σταθμούς της ομάδας αυτής σε προηγούμενες σχισμές έως τη στιγμή της προγραμματισμένης μετάδοσης του, τότε αυτός μεταδίδει την εν λόγω στιγμή. Στην αντίθετη περίπτωση, εάν ανιχνευθεί άλλη μετάδοση, ο σταθμός σταματά την μέτρηση για να συνεχίσει την προηγούμενη διαδικασία της μέτρησης σχισμών μέχρις ότου να υπολογίσει την προκαθορισμένη σχισμή για την μετάδοση των πακέτων του. Κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου ντετερμινιστικής ανάλυσης της σύγκρουσης μεταξύ των σταθμών της ομάδας G_i^T δεν επιτρέπεται άλλη μετάδοση από σταθμούς εκτός της ομάδας αυτής.

Έχει αποδειχθεί ότι η υψηλότερη απόδοση, για συμμετρική φόρτιση των σταθμών, όσον αφορά τη μέση καθυστέρηση πακέτου, επιτυγχάνεται για βαθμό ομαδοποίησης $k=2$, ενώ για την ελαχιστοποίηση της μέγιστης καθυστέρησης η βέλτιστη τιμή είναι $k=1$. Η μέγιστη καθυστέρηση πακέτου στην κορυφή της ουράς που μεταδίδεται σε token mode δίνεται από τη σχέση,

$$T_f^t = (m-1)[(k+1)T_t + kP_s + P_c] + [m(k-1)+1](P_s + T_t), \quad k \geq 2 \quad (2.10)$$

Εάν $k=1$ τότε η μέγιστη καθυστέρηση είναι ίση με,

$$T_f^t = N(P_s + T_t), \quad k=1 \quad (2.11)$$

Ως εκ τούτου, το GIT-CSMA/CD πρωτόκολλο εγγυάται μέγιστη καθυστέρηση πακέτου που δίνεται από τη σχέση,

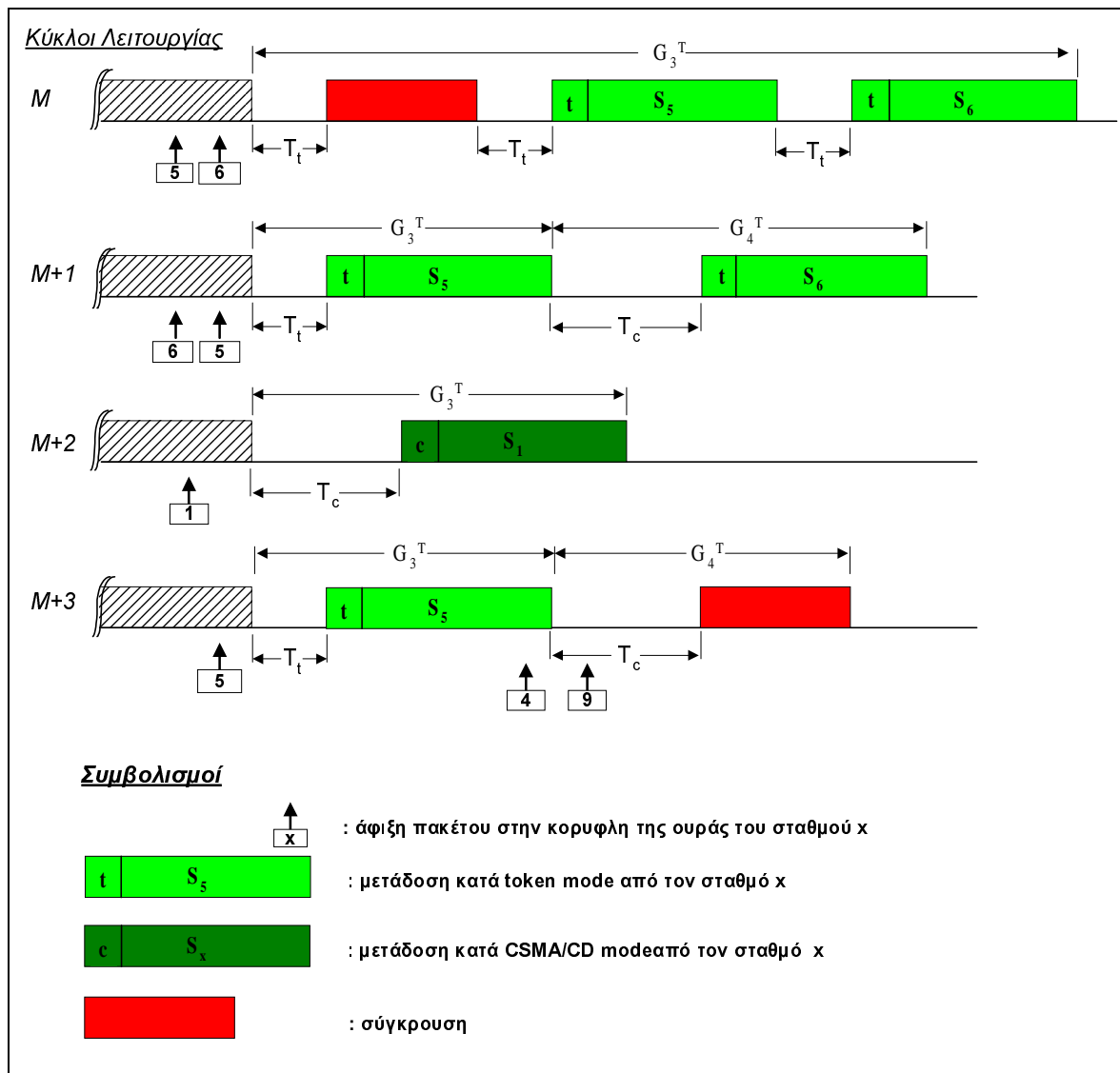
$$T_f^m = \max(T_f^c, T_f^t) \quad (2.12)$$

Καθώς το φορτίο καναλιού αυξάνεται, το GIT-CSMA/CD πρωτόκολλο βαθμιαία γίνεται ένα πρωτόκολλο ελεύθερο συγκρούσεων όπου μόνο ένας σταθμός κατέχει το κουπόνι (individual token mode). Η μετάβαση από την group token mode στην individual token mode λαμβάνει χώρα κάθε φορά που συμβαίνει μια σύγκρουση μεταξύ των σταθμών της ομάδας που κατέχει το κουπόνι. Κατά την διάρκεια κάθε κύκλου λειτουργίας μετά από αυτή τη σύγκρουση το κουπόνι “ανήκει” μόνο σε ένα (μεταξύ των k) σταθμό της συγκεκριμένης ομάδας. Αυτοί οι κύκλοι λειτουργίας ονομάζονται ανεξάρτητοι κύκλοι (individual cycles). Η μετάβαση από την individual token mode στην group individual mode λαμβάνει χώρα εάν το πολύ ένας (μεταξύ των k) σταθμός που ανήκει στην ομάδα μεταδώσει κατά token mode σε ένα ανεξάρτητο κύκλο. Το Σχ.2.11 δείχνει το μηχανισμό μεταβάσεων μεταξύ των individual και token modes για τέσσερις διαδοχικούς κύκλους λειτουργίας. Συμπερασματικά η μέγιστη χωρητικότητα του GIT-CSMA/CD, $C_{GIT-CSMA/CD}$, που επιτυγχάνεται σε individual token mode, δίνεται από τη σχέση,

$$C_{GIT-CSMA/CD} = \frac{P_s}{P_s + (T_t + \tau)} \quad (2.13)$$

όπου τ είναι η καθυστέρηση διάδοσης του καναλιού.

Είναι φανερό ότι ο συνδυασμός των μηχανισμών CSMA/CS και token (group, individual) προσφέρει ένα μεγάλο βαθμό προσαρμοστικότητας σε ένα μεγάλο εύρος φορτίων και διαφορετικών απαιτήσεων εφαρμογών. Επιπλέον, αποφεύγεται το σημαντικό πρόβλημα των “χαμένων” κουπονιών λόγω του μηχανισμού της ασαφούς διακίνησης του κουπονιού. Ως εκ τούτου, δεν χάνεται εύρος ζώνης και αποφεύγονται οι περίοδοι απροσπελασιμότητας που συμβαίνουν στο κλασσικό πρωτόκολλο κουπονιού, όταν “χάνεται” το κουπόνι.



Σχ.2. 11. Ο μηχανισμός μετάβασης μεταξύ των group και individual token modes

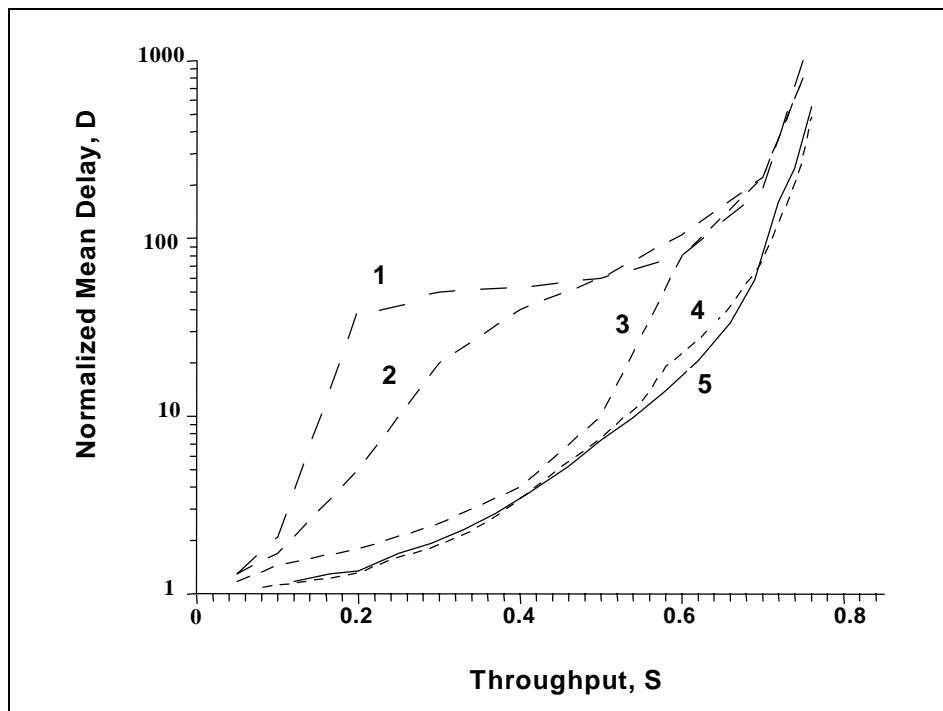
Στο πρωτόκολλο GIT-CSMA/CD αντιμετωπίζονται, επίσης, τα προβλήματα εισόδου και εξόδου σταθμών. Συγκεκριμένα, οι διαδικασίες εισόδου και εξόδου σταθμών είναι τελείως κατανομημένες και δεν απαιτούν ειδικά πακέτα ελέγχου. Ο σταθμός που επιθυμεί να εισέλθει στο δίκτυο πρέπει μόνον να γνωρίσει την ομάδα που τη στιγμή εκείνη κατέχει το κουπόνι. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση του καναλιού, έως ότου ενεργοποιηθεί μια μετάδοση σε χρονική

στιγμή μέσα στο διάστημα T_t και T_t+2t μετά το τέλος της προηγούμενης μετάδοσης, όπου $2t$ είναι η μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης του καναλιού. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνει ο εν λόγω σταθμός όλα τα μεταδιδόμενα πακέτα, ανεξαρτήτως της διεύθυνσης προορισμού τους. Η ομάδα που εκείνη τη στιγμή κατέχει το κουπόνι μπορεί να προσδιορισθεί από τη διεύθυνση προέλευσης (αποστολέα) του λαμβανόμενου πακέτου, δεδομένου ότι κάθε σταθμός γνωρίζει τις διευθύνσεις των σταθμών που περιέχονται σε μια ομάδα. Ο νέος σταθμός υπολογίζει την τιμή των μεταβάσεων από-ενεργό-σε-αδρανές του καναλιού, πριν αυτός θεωρηθεί ως κάτοχος του κουπονιού, ως

$$t = \text{mod}_m(G_i^T - G_n\{S_j\} - 1) \quad (2.14)$$

όπου G_i^T είναι η ταυτότητα της ομάδας που περιέχει τον σταθμό που μετέδωσε και $G_n\{S_j\}$ είναι η ταυτότητα της ομάδας του νέου σταθμού. Μετά τον προσδιορισμό του t , ο σταθμός επανέρχεται σε κανονική λειτουργία λαμβάνοντας μόνο τα πακέτα που απευθύνονται σ' αυτόν και μειώνει την τιμή του t κατά ένα, όταν ανιχνευθεί μία από τις συνθήκες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Εάν, κατά την διάρκεια της εισόδου του νέου σταθμού καταμετρηθεί ένας προκαθορισμένος αριθμός μεταβάσεων από-ενεργό-σε-αδρανές του καναλιού χωρίς καμία μετάδοση σε token mode, τότε ο νέος σταθμός θεωρείται ότι λαμβάνει το κουπόνι θέτοντας $t = 0$.

Τέλος, στο Σχ.2.12 δίνεται η σύγκριση του πρωτοκόλλου GIT-CSMA/CD με άλλα προσαρμοστικά υβριδικά πρωτόκολλα υψηλής απόδοσης για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες αυτών των πρωτοκόλλων φαίνεται η υπεροχή του GIT-CSMA/CD πρωτοκόλλου, όσον αφορά την μέση καθυστέρηση πακέτου, για όλο το φάσμα των φορτίων καναλιού.



Σχ.2. 12. Σύγκριση των πρωτοκόλλων GIT-CSMA/CD με $k=1$ (4), $k=2$ (5) Virtual Token με VT_0 (2), VT_e (3) και CSMA/CD-DP (1) ($P_s=1200$ bits, $\tau=100$ bits, 50 σταθμοί)

2.7. ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ – ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

1. Να αναφέρετε και να αναλύσετε τις βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της απόδοσης και την αξιολόγηση πρωτοκόλλων MAC-υποεπιπέδου.
2. Ποιες είναι οι κύριες κατευθύνσεις – επιδιώξεις όσον αφορά στη σχεδίαση και υλοποίηση πρωτοκόλλων MAC-υποεπιπέδου και ιδιαίτερως για βιομηχανικές δικτυακές δομές;
3. Να αναλύσετε την λειτουργία του πρωτοκόλλου p-persistent CSMA/CD. Ποιοί παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση του. Τι είναι το φαινόμενο της 'αστάθειας λειτουργίας'. Ποιά είναι τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του; Πότε αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές;
4. Να αναλύσετε τη δομή και λειτουργία του πρωτοκόλλου p-persistent CSMA/CD του δικτύου LONWorks. Συγκρίνετε το πρωτόκολλο αυτό σε σχέση με το κλασσικό p-persistent CSMA/CD.
5. Να αναλύσετε την λειτουργία του πρότυπου πρωτοκόλλου Token Passing Bus. Ποιοί παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση του. Ποιά είναι τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του, όσον αφορά στη χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές;
6. Να συγκρίνετε τα πρωτόκολλα TDMA, Polling και Token Passing Bus. Πότε υπερέχει το καθένα; Πως κρίνετε την απόδοση τους σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας βιομηχανικού περιβάλλοντος;
7. Να συγκρίνετε τις τεχνικές υλοποίησης μεταβίβασης 'σαφούς' και 'ασαφούς' κουπονιού, κάτω από τυπικές βιομηχανικές συνθήκες δικτυακής λειτουργίας.
8. Ποιοί λόγοι συντείνουν στη δημιουργία υβριδικών πρωτοκόλλων προσπέλασης. Τι σκοπό εξυπηρετούν; Ποιά είναι τα κύρια μειονεκτήματα τους;

9. Να προτείνεται τροποποιήσεις που να βελτιώνουν την απόδοση του TDMA στα χαμηλά φορτία.
10. Να προτείνεται τροποποιήσεις που να βελτιώνουν την απόδοση του Token Passing Bus στα χαμηλά φορτία και για μικρά μήκη πληροφοριακών πακέτων.
11. Να προτείνεται τροποποιήσεις που να βελτιώνουν την απόδοση του p-persistent CSMA/CD στα υψηλά φορτία.
12. Πως σχεδιάζεται η δικτυακή εξυπηρέτηση με βάση προτεραιότητες μηνυμάτων ή/και κόμβων; Δώστε ένα παράδειγμα πρωτοκόλλου με τέτοιες δυνατότητες.
13. Να αναλύσετε την λειτουργία του πρωτοκόλλου GIT-CSMA/CD. Ποιά είναι τα κύρια πλεονεκτήματα του. Πως κρίνετε τη δυναμική του συμπεριφορά όσον αφορά στην προσαρμογή του σε μεταβαλλόμενο δικτυακό φορτίο με απαιτήσεις 'αυστηρού' πραγματικού χρόνου; Ποιοι είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το όριο της μέγιστης καθυστέρησης πακέτου;
14. Σε μία δικτυακή εφαρμογή οι N χρήστες - κόμβοι δικτύου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, δηλαδή, το $(\alpha)\%$ των χρηστών απαιτούν εξυπηρέτηση με την μέγιστη προτεραιότητα ενώ το υπόλοιπο $(1-\alpha)\%$ έχει χαμηλότερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης. Επί πλέον, οι χρήστες υψηλής προτεραιότητας απαιτούν την εξασφάλιση άνω ορίου (D_{max}) για την καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων δεδομένων τους, όπου $D_{max} < k \cdot N$ (κανονικοποιημένη ως προς τον χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου). Να προτείνετε ένα MAC πρωτόκολλο που ικανοποιεί αυτές τις ανάγκες, αναλύοντας επαρκώς την επιλογή σας και να υπολογίσετε το κατάλληλο μήκος πληροφοριακού πακέτου, T_p , συναρτήσει των α , k , N .
15. Μελέτη μέσω εξομοίωσης (παραμετρικά) του TDMA πρωτοκόλλου με N σταθμούς. Μέτρηση μέσης και μέγιστης καθυστέρησης πακέτου συναρτήσει του φορτίου (συνολικά και ανά σταθμό). Να αναπτυχθεί γραφική αναπαράσταση για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου ανά μονάδα χρόνου (σχισμή).

16. Μελέτη μέσω εξομοίωσης (παραμετρικά) του Polling πρωτοκόλλου με N σταθμούς. Μέτρηση μέσης και μέγιστης καθυστέρησης πακέτου συναρτήσει του φορτίου (συνολικά και ανά σταθμό). Να αναπτυχθεί γραφική αναπαράσταση για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου (να ορισθεί η μονάδα χρόνου δικτύου για την παρακολούθηση).
17. Μελέτη μέσω εξομοίωσης (παραμετρικά) του κλασσικού Token Passing Bus πρωτοκόλλου με N σταθμούς. Μέτρηση μέσης και μέγιστης καθυστέρησης πακέτου συναρτήσει του φορτίου (συνολικά και ανά σταθμό). Να αναπτυχθεί γραφική αναπαράσταση για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου (να ορισθεί η μονάδα χρόνου δικτύου για την παρακολούθηση).
18. Μελέτη μέσω εξομοίωσης (παραμετρικά) του Virtual Token Passing Bus πρωτοκόλλου με N σταθμούς. Μέτρηση μέσης και μέγιστης καθυστέρησης πακέτου συναρτήσει του φορτίου (συνολικά και ανά σταθμό). Να αναπτυχθεί γραφική αναπαράσταση για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου (να ορισθεί η μονάδα χρόνου δικτύου για την παρακολούθηση).
19. Μελέτη μέσω εξομοίωσης (παραμετρικά) του p-persistent CSMA/CD πρωτοκόλλου με N σταθμούς. Μέτρηση μέσης και μέγιστης καθυστέρησης πακέτου συναρτήσει του φορτίου (συνολικά και ανά σταθμό). Να αναπτυχθεί γραφική αναπαράσταση για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου (να ορισθεί η μονάδα χρόνου δικτύου για την παρακολούθηση).
20. Μελέτη μέσω εξομοίωσης (παραμετρικά) του predictive p-persistent CSMA/CD πρωτοκόλλου με N σταθμούς. Μέτρηση μέσης και μέγιστης καθυστέρησης πακέτου συναρτήσει του φορτίου (συνολικά και ανά σταθμό). Να αναπτυχθεί γραφική αναπαράσταση για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου (να ορισθεί η μονάδα χρόνου δικτύου για την παρακολούθηση).

21. Μελέτη μέσω εξομοίωσης (παραμετρικά) του GIT-CSMA/CD πρωτοκόλλου με N σταθμούς. Μέτρηση μέσης και μέγιστης καθυστέρησης πακέτου συναρτήσει του φορτίου (συνολικά και ανά σταθμό). Να αναπτυχθεί γραφική αναπαράσταση για την πλήρη παρακολούθηση της λειτουργίας του πρωτοκόλλου (να ορισθεί η μονάδα χρόνου δικτύου για την παρακολούθηση).