

Ψηφιακές Επικοινωνίες

Κεφ 11: Πολυπλεξία και Πολλαπλή Πρόσβαση

Πρόβλημα

- Υπάρχει ένα κανάλι το οποίο «μοιράζονται» πολλοί κόμβοι.
- **Πρόβλημα:** Ποιος μεταδίδει, που και πότε;

Παραδοχές και Υποθέσεις

- Μοντέλο
 - N ανεξάρτητοι κόμβοι (terminals) οι οποίοι σε ένα διάστημα Δt δημιουργούν νέο πλαίσιο με πιθανότητα $\lambda \Delta t$ όπου λ είναι μία σταθερά.
- Υπάρχει **μόνο ένα κανάλι για επικοινωνία**
- Εάν δύο πλαίσια εκπεμφθούν έτσι ώστε να υπάρχει **χρονική επικάλυψη** τότε υπάρχει **σύγκρουση** (collision) και τα δύο πλαίσια χάνονται και πρέπει να ξανασταλούν. Οι συγκρούσεις αποτελούν την μόνη πηγή σφαλμάτων
- Συνεχής χρόνος (continuous time): πλαίσια μπορούν να αποστέλλονται **οποιαδήποτε χρονική στιγμή**

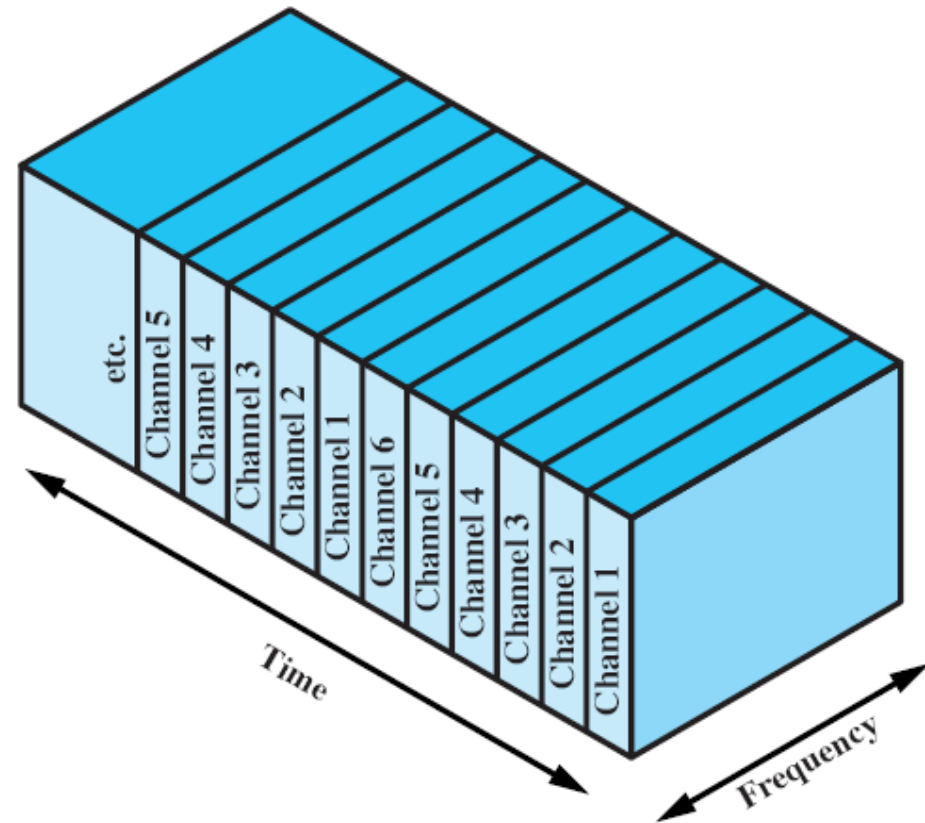
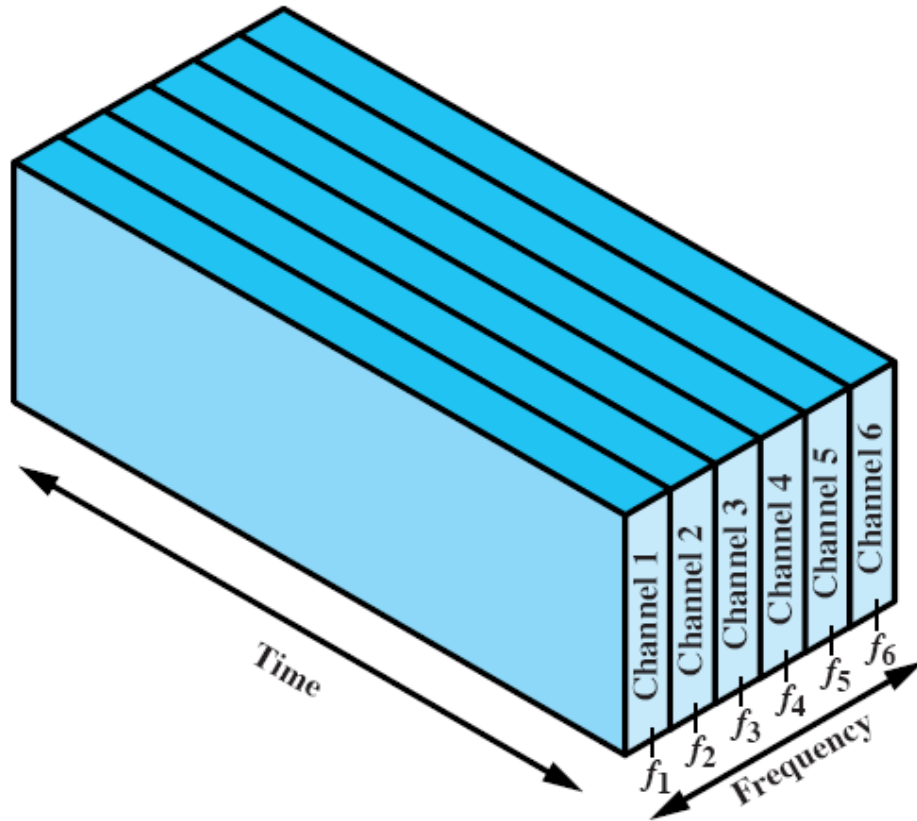
Παραδοχές και Υποθέσεις

- Διακριτός χρόνος (slotted time): ο χρόνος χωρίζεται σε διακριτά διαστήματα ίσης διάρκειας. Κάθε πλαίσιο εκπέμπεται **πάντα στην αρχή ενός διαστήματος**.
- Ανίχνευση φέροντος κύματος (carrier sense). Οι κόμβοι έχουν την δυνατότητα να υπολογίσουν κατά πόσο το κανάλι χρησιμοποιείται από κάποιο άλλο κόμβο. Σε περίπτωση που το κανάλι χρησιμοποιείται, τότε ο δεδομένος κόμβος **δεν εκπέμπει**.
- Ανίχνευση σύγκρουσης (collision detection). Οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύσουν συγκρούσεις. Μόλις ανιχνεύσουν σύγκρουση **σταματούν να εκπέμπουν**.

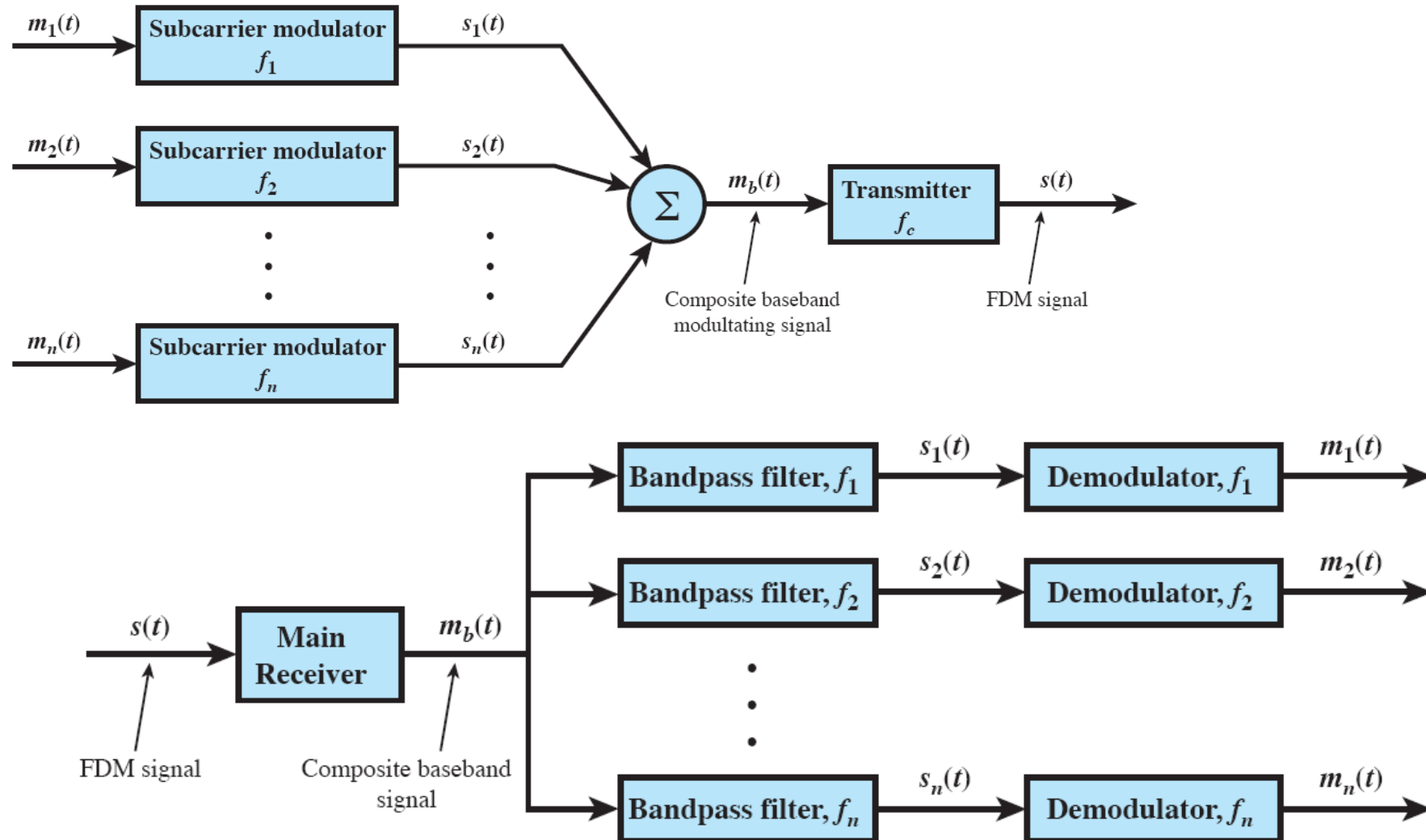
Στατική Κατανομή Καναλιών (Διαίρεση Συχνοτήτων)

- Υποθέτουμε πως το κανάλι έχει εύρος ζώνης (χωρητικότητα) C .
- Στην κατανομή συχνοτήτων (Frequency Division Multiple Access (FDMA)), όλο το εύρος ζώνης υποδιαιρείται σε N τμήματα και σε κάθε χρήστη αντιστοιχεί ένα τμήμα εύρους ζώνης C/N .
- Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access (TDMA)), λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο.
- Και οι δύο μέθοδοι μπορεί να είναι προβληματικές και πιθανόν καθόλου αποδοτικές!
 - Τι συμβαίνει όταν το N δεν είναι σταθερό;

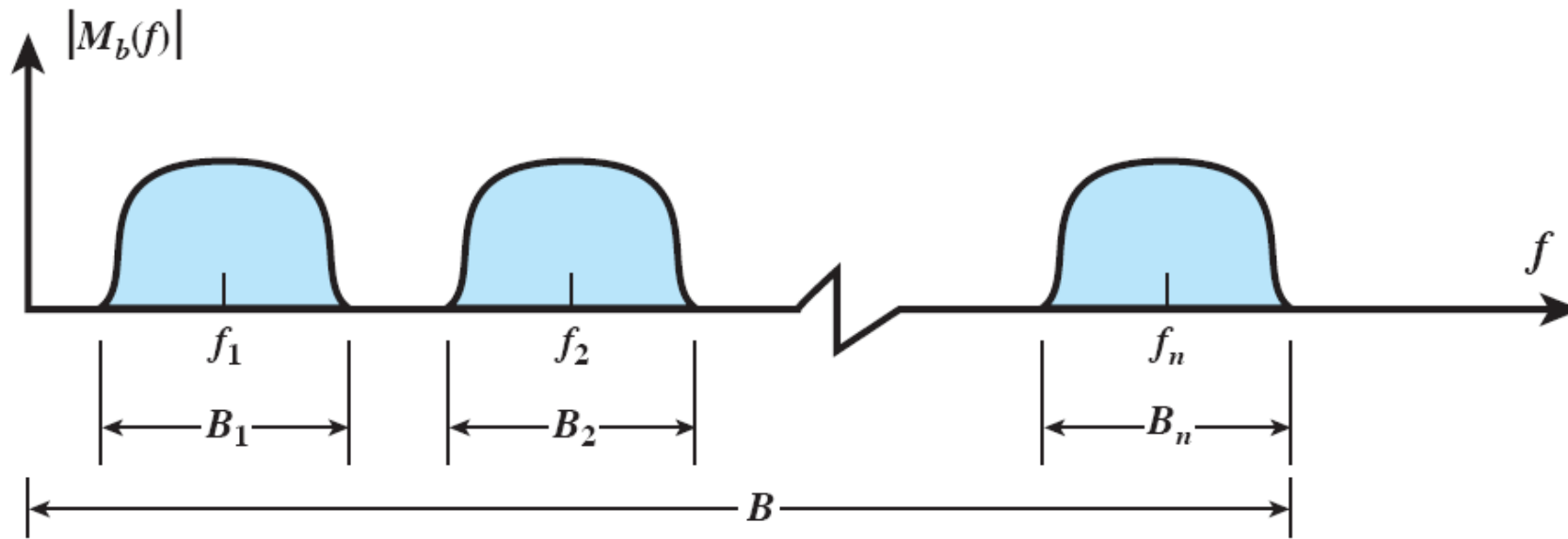
FDMA vs TDMA



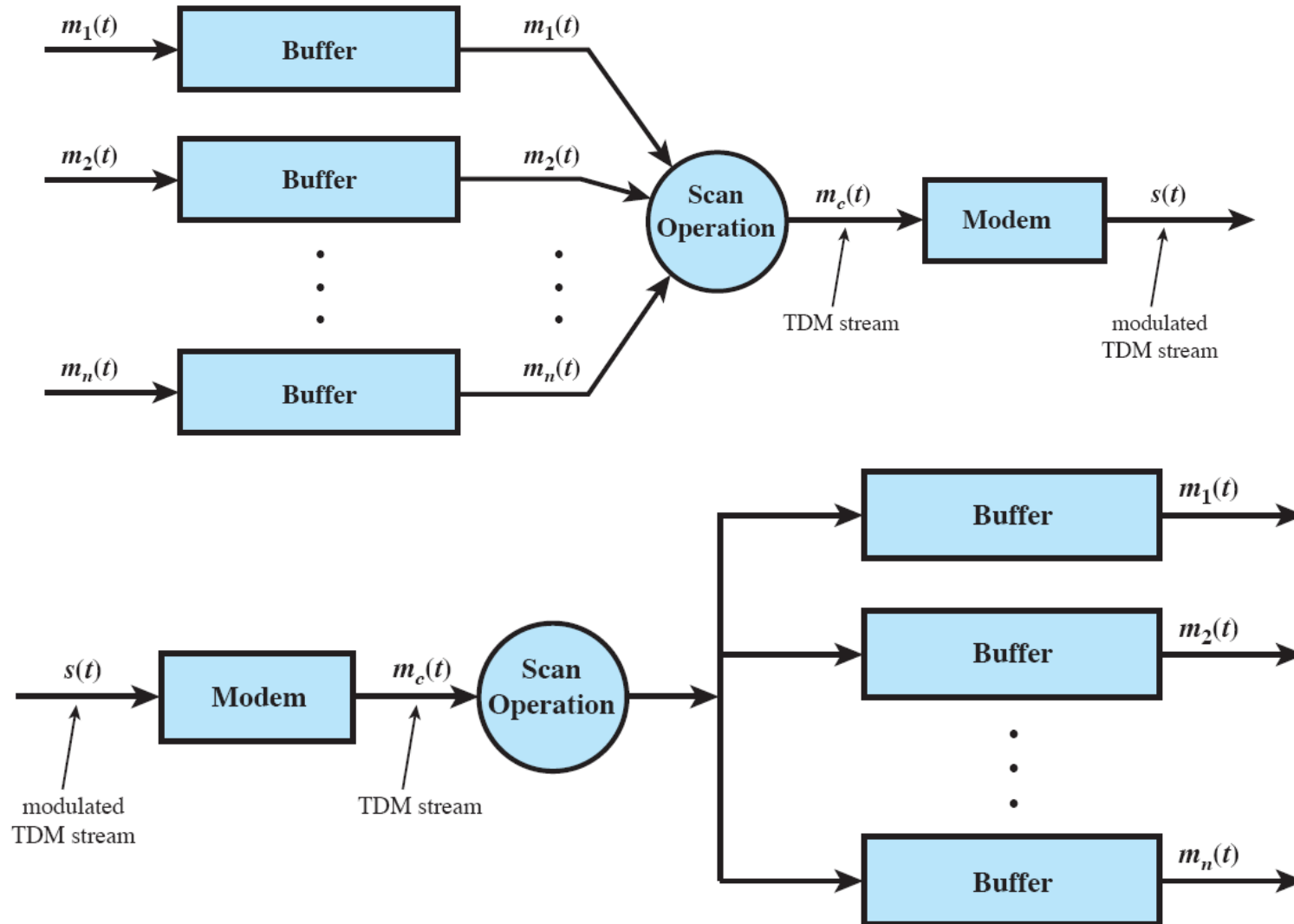
FDMA Transmitter and Receiver



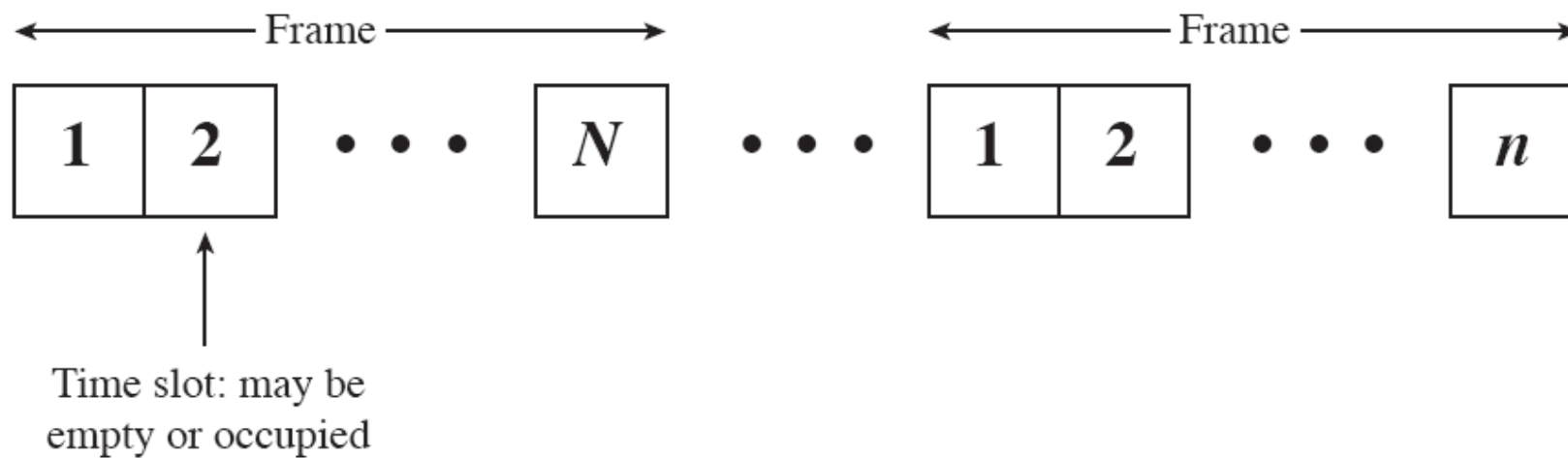
FDMA Φάσμα (Spectrum)



TDMA Transmitter-Receiver

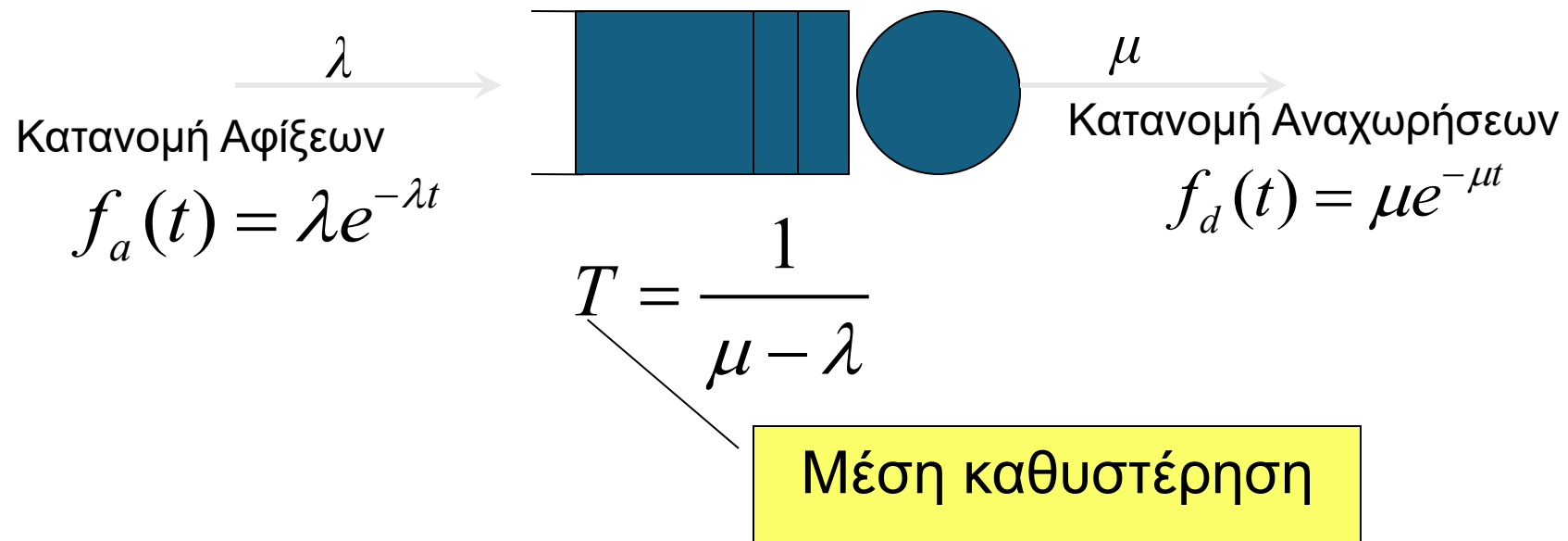


TDMA Πλαίσια



Προκαταρκικά...

Συστήματα Ουρών M/M/1



Ανέλιξη Poisson: Στο διάστημα Δt η πιθανότητα k αφίξεων δίνεται από

$$\Pr[k] = \frac{(\lambda \Delta t)^k e^{-\lambda \Delta t}}{k!}$$

Η Διαίρεση Συχνοτήτων ΔΕΝ είναι Αποδοτική!

- Γιατί παρατηρείται αυτό το φαινόμενο;
- Όταν ένας από τους χρήστες δεν έχει πλαίσια για να στείλει, τότε το εύρος ζώνης που του αναλογεί μένει **αχρησιμοποίητο**!
- Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση της Διαίρεσης Χρόνου (TDMA).

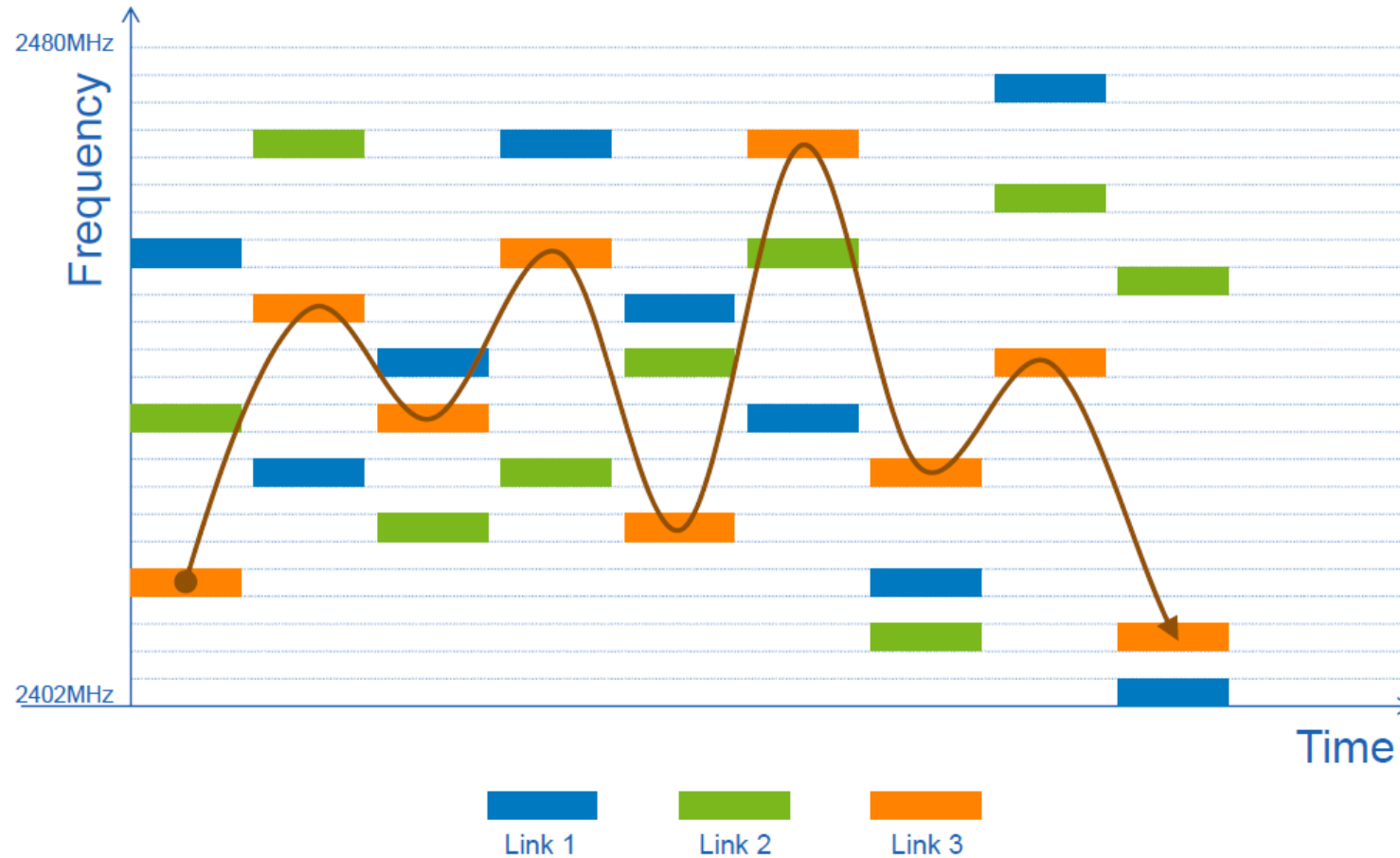
Spread Spectrum (SS)

- Μέθοδος κωδικοποίησης σήματος
- Η μέθοδος, παρόλο ότι είναι πιο πολύπλοκη, παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα
 - Επηρεάζεται λιγότερο από το θόρυβο και τις παρεμβολές
 - Πιο ασφαλής μέθοδος καθώς το σήμα «κρυπτογραφείται»
 - Μπορεί να πετύχει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης.
- Δύο «εκδόσεις»
 - Frequency-hopping spread spectrum
 - Direct sequence spread spectrum
- Code Division Multiple Access (CDMA)

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

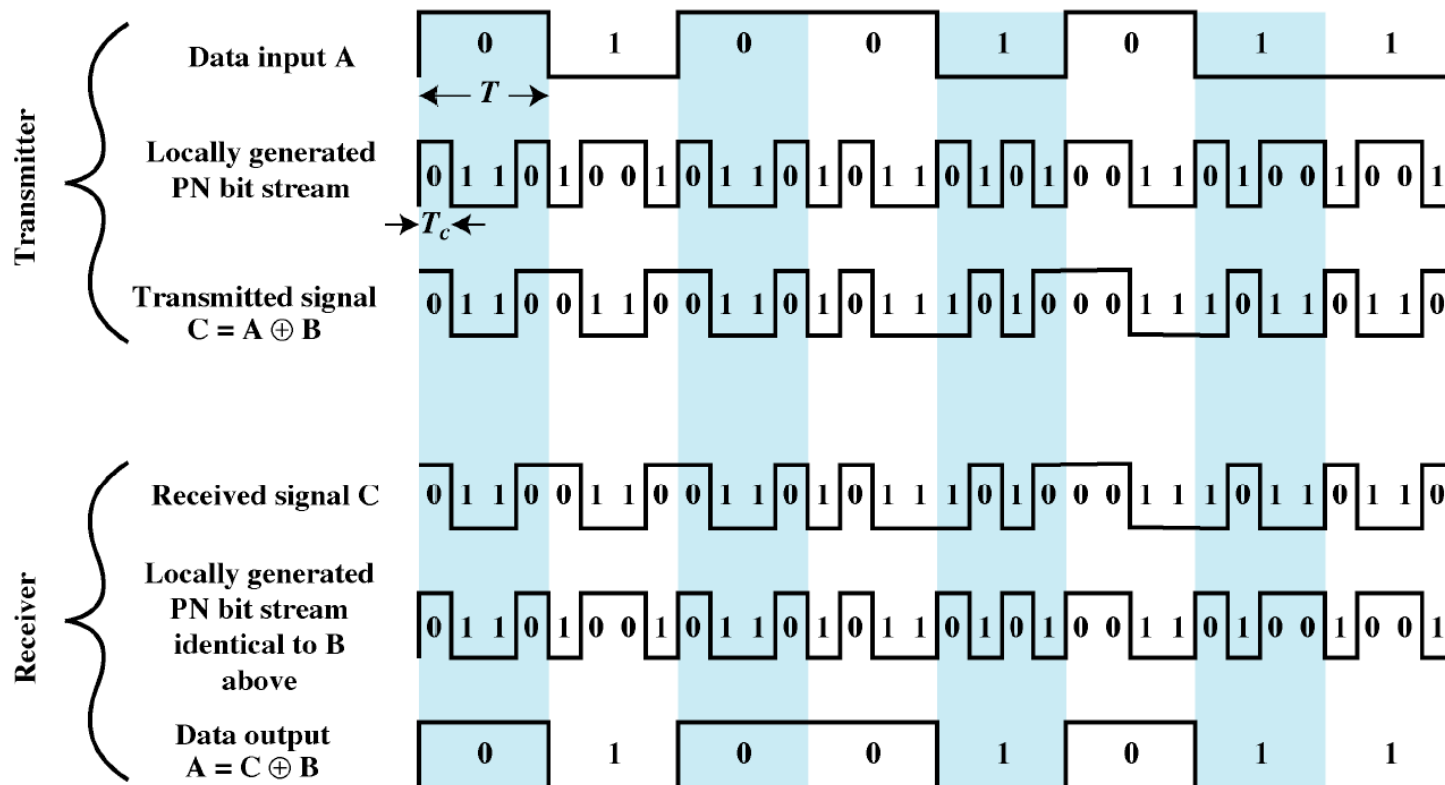
- Υπάρχει ένα σύνολο από κανάλια και το κάθε ένα αντιστοιχεί σε μια συχνότητα (φέρον κύμα).
- Αποστολέας και παραλήπτης χωρίζουν το χρόνο σε μικρά διαστήματα τα οποία μπορεί να αντιστοιχούν στην διάρκεια ενός bit ή ακόμα και μεγαλύτερο.
- Σε κάθε διάστημα, ο αποστολέας χρησιμοποιεί διαφορετικό κανάλι (διαφορετική συχνότητα).
- Ο παραλήπτης, ο οποίος ξέρει από πριν την σειρά των καναλιών που θα χρησιμοποιήσει ο αποστολέας συντονίζεται σε κάθε διάστημα στη σωστή συχνότητα.
 - Χρήση «ψευδο-τυχαίας» σειράς

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)



Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- Κάθε bit αντιπροσωπεύεται από ένα κώδικα «εξάπλωσης» (spreading code) – μια σειρά από bits.
- Η σειρά των bits αλλάζει από bit σε bit όμως είναι «γνωστή» και στον αποστολέα καθώς και στον παραλήπτη



Code Division Multiple Access (CDMA)

- Κάθε bit υποδιαιρείται σε chips (k παλμοί)
- Κάθε χρήστης έχει ένα κωδικό με τον οποίο πολλαπλασιάζει το bit το οποίο θέλει να στείλει
- Ο παραλήπτης πολλαπλασιάζει επίσης με τον ίδιο κωδικό.
- Παράδειγμα:
 - Ο χρήστης A έχει τον κωδικό $c=[1,-1,-1,1,-1,1]$
 - Εάν θέλει να στείλει 1, τότε στέλνει $s_1=1 \times c=[1,-1,-1,1,-1,1]$
 - Εάν θέλει να στείλει -1, τότε στέλνει $s_{-1}=-1 \times c=[-1,1,1,-1,1,-1]$
 - Εάν ο παραλήπτης πάρει s_1 τότε υπολογίζει $S(s_1)=c^T s_1=6$
 - Εάν ο παραλήπτης πάρει s_{-1} τότε υπολογίζει $S(s_{-1})=c^T s_{-1}=-6$

Code Division Multiple Access (CDMA)

- Για να «ξεχωρίσει» το σήμα από κάθε αποστολέα, ο κάθε χρήστης έχει το δικό του κωδικό.
- Οι κωδικοί είναι μεταξύ τους ορθογώνιοι.
 - Δύο κώδικες είναι ορθογώνιοι εφόσον το εσωτερικό τους γινόμενο ισούται με μηδέν.
 - Οι $c_a = [1, -1, -1, 1, -1, 1]$, και $c_b = [1, -1, 1, -1, -1, -1]$ είναι ορθογώνιοι
- Υποθέστε πώς ο a κωδικοποίησε το bit b_a χρησιμοποιώντας τον κώδικα c_a και ο b χρησιμοποιώντας τον κώδικα c_b .
- Στο κανάλι θα εμφανιστεί το άθροισμα των δύο κωδικών

$$s = b_a c_a + b_b c_b$$

- Ο παραλήπτης του a θα πάρει:

$$S(s) = c_a^T (b_a c_a + b_b c_b) = b_a c_a^T c_a + b_b c_a^T c_b = 6b_a$$

DS/CDMA

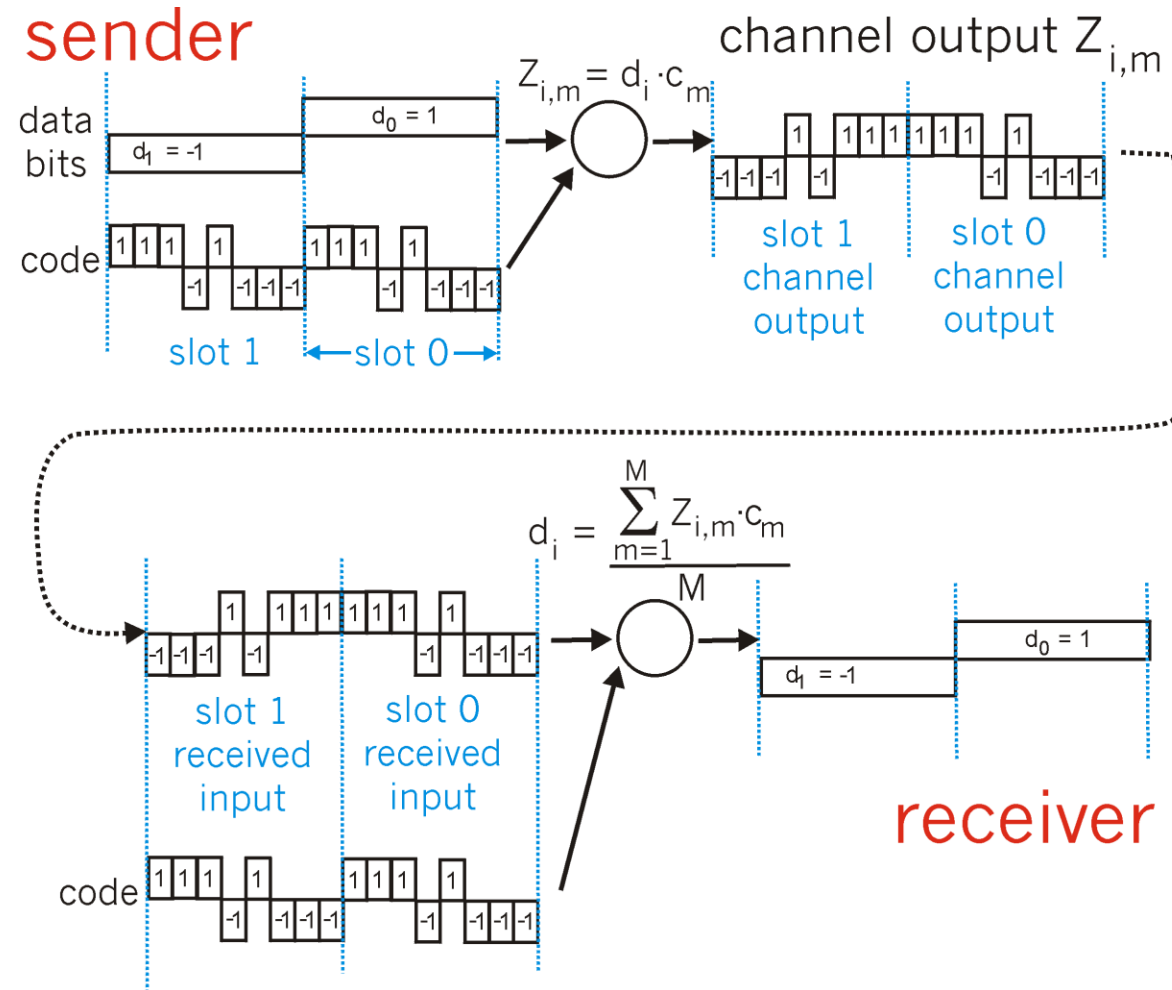
- Κάθε σταθμός μετάδοσης παίρνει ένα κωδικό (chip sequence) που αντιπροσωπεύει τη μετάδοση του 1 (το συμπληρωματικό αντιπροσωπεύει το 0)
 - Π.χ. 1=00011011 0=11100100 (8-chip code)
- Το μετάδοση του 0 σηματοδοτείται με -1 και το 1 με $+1$ (π.χ. τάση σε volts)

A: 0 0 0 1 1 0 1 1
B: 0 0 1 0 1 1 1 0
C: 0 1 0 1 1 1 0 0
D: 0 1 0 0 0 0 1 0

A: $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$
B: $(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$
C: $(-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)$
D: $(-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)$

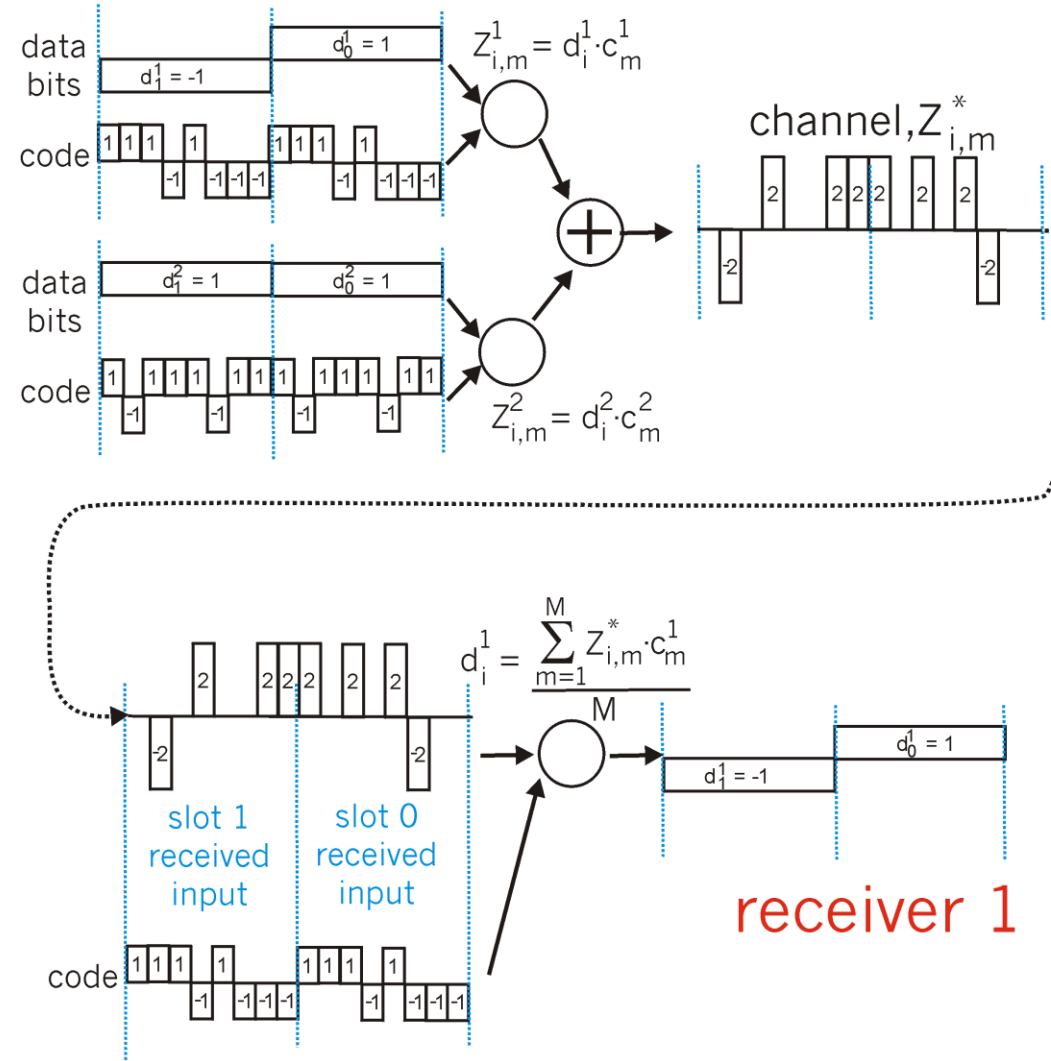
Chip Sequence:	1 0 1 1 0 0
Spreading Sequence:	1 -1 1 1 -1 -1
Transmitted bits, data = 1:	1 -1 1 1 -1 -1
Transmitted bits, data = 0:	-1 1 -1 -1 1 1
No transmission:	0 0 0 0 0 0

DS/CDMA Encode/Decode



DS/CDMA: two-sender interference

senders



DS/CDMA: Περιορισμοί

Ανάγκη για Έλεγχο Ισχύος (Power Control): Απαιτείται πολύ ακριβής και συνεχής έλεγχος ισχύος, ώστε οι συσκευές που βρίσκονται πιο κοντά στον σταθμό βάσης να μην "πνίγουν" τα σήματα των πιο απομακρυσμένων συσκευών.

Αυτοπαρεμβολή (Self-Jamming): Επειδή όλοι οι χρήστες μοιράζονται την ίδια συχνότητα ταυτόχρονα, υπάρχει κίνδυνος αυτοπαρεμβολής. Αν οι κώδικες δεν είναι τέλεια ορθογώνιοι, προκαλείται ακύρωση της ορθογωνιότητας και παρεμβολές.

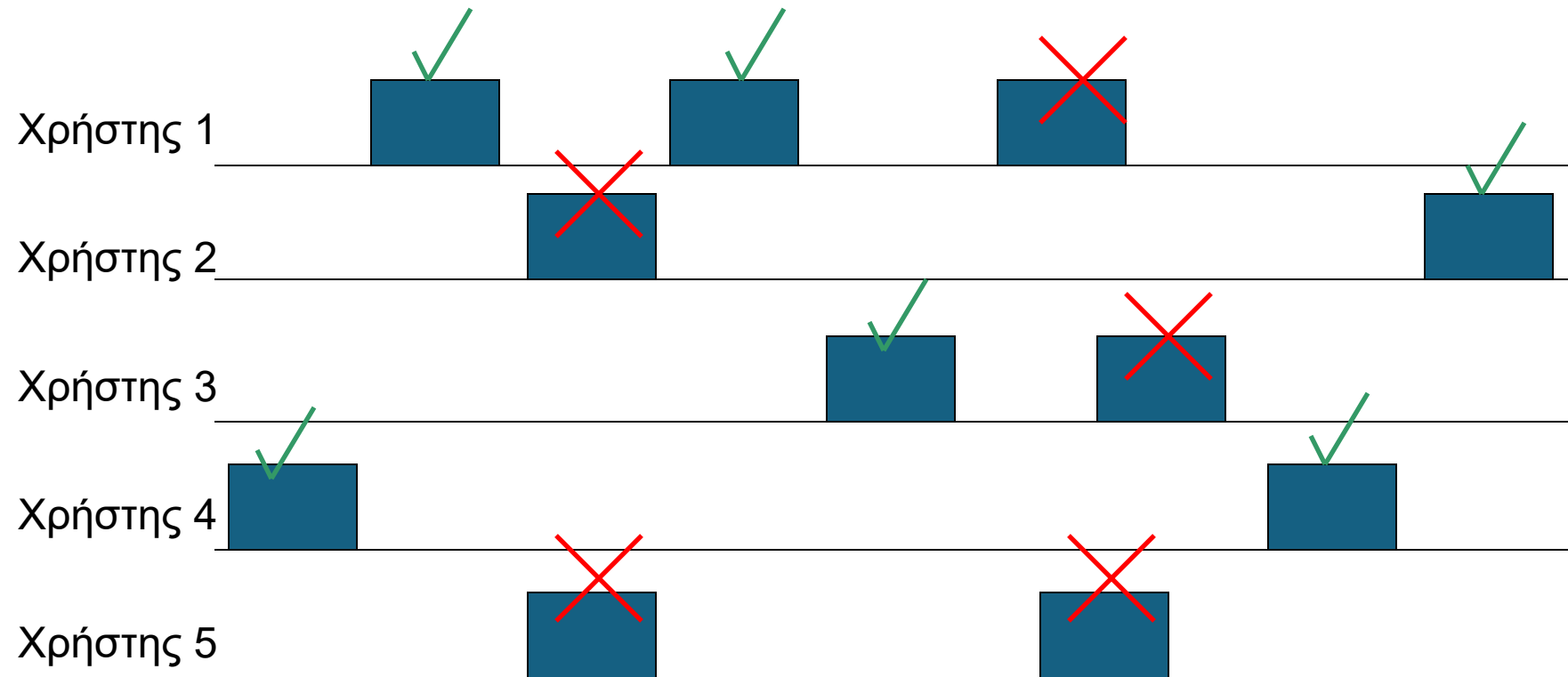
Πολυπλοκότητα Σχεδίασης: Απαιτείται πολύπλοκος συνθέτης συχνοτήτων και εξελιγμένοι δέκτες για την αποκωδικοποίηση των σημάτων, γεγονός που αυξάνει το κόστος.

Περιορισμένη Χωρητικότητα (Soft Limit): Η αύξηση των χρηστών πέρα από ένα όριο υποβαθμίζει σταδιακά την ποιότητα για όλους (soft capacity limit).

Αloha – Το απλούστερο TDMA πρωτόκολλο

- Όποιος χρήστης έχει πλαίσιο να στείλει, **το στέλνει**.
- Εάν κατά την διάρκεια της εκπομπής του πλαισίου κανένας άλλος χρήστης δεν δοκίμασε να στείλει άλλο πλαίσιο, τότε το πλαίσιο **μεταδίδεται επιτυχώς**.
- Εάν κατά την διάρκεια της εκπομπής κάποιος άλλος χρήστης επιχειρήσει να αποστείλει άλλο πλαίσιο, τότε **καταστρέφονται και τα δύο πλαίσια** και πρέπει να σταλούν ξανά.
- Στην περίπτωση που το πλαίσιο καταστραφεί, ο χρήστης περιμένει κάποιο **τυχαίο διάστημα** και ξαναδοκιμάζει να στείλει το πλαίσιο.

Πρωτόκολλο Aloha



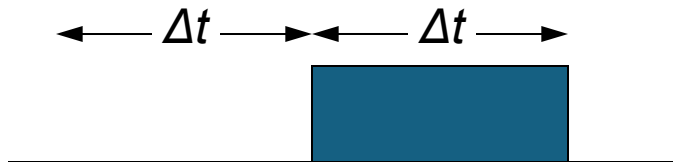
Απόδοση Πρωτοκόλλου Aloha

- Υπόθεση
 - Όλα τα πλαίσια είναι του ιδίου μεγέθους και χρειάζονται Δt χρονικές μονάδες για να μεταδοθούν.
 - Τα πλαίσια (νέα και αναμεταδόσεις) φτάνουν με διαδικασία Poisson και ρυθμό G πλαίσια ανά Δt .
- Πια η πιθανότητα ένα πλαίσιο να μεταδοθεί επιτυχώς (χωρίς σύγκρουση);
- Πιθανότητα k αφίξεων στο διάστημα Δt

$$\Pr[k] = \frac{G^k e^{-G}}{k!}$$

Μη σύγκρουση $\rightarrow k=0$ σε $2\Delta t$

$$\Pr[k = 0, 2\Delta t] = \frac{(2G)^0 e^{-2G}}{0!} = e^{-2G}$$

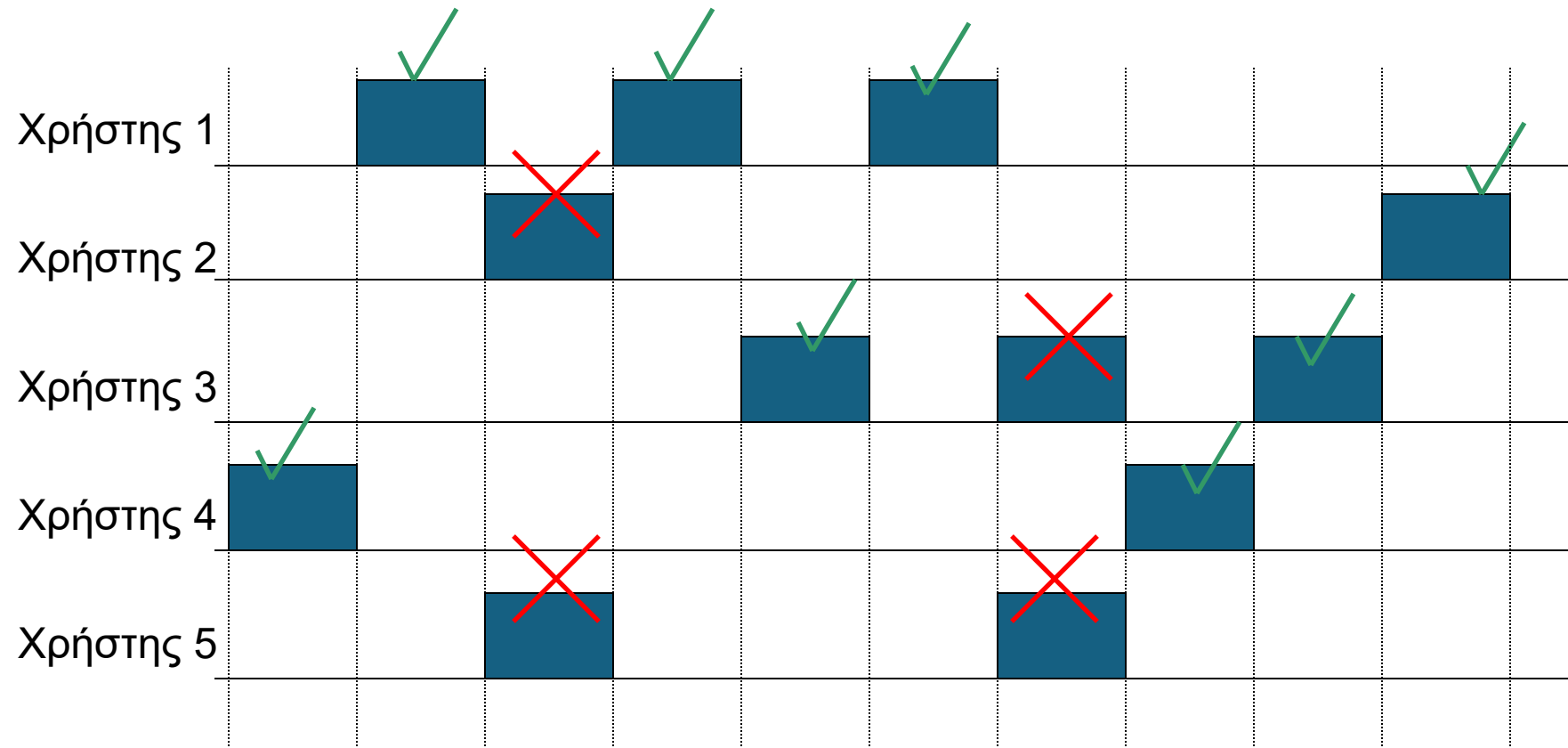


Throughput: $S = Ge^{-2G}$

Πρωτόκολλο Slotted Aloha

- Ο χρόνος υποδιαιρείται σε ίσα διακριτά διαστήματα τα οποία είναι διάρκειας ίσης με το χρόνο μετάδοσης ενός πλαισίου.
- Όποιος χρήστης έχει πλαίσιο να στείλει, το στέλνει ξεκινώντας **πάντα στην αρχή ενός διαστήματος**.
- Εάν κατά την διάρκεια της εκπομπής του πλαισίου κανένας άλλος χρήστης δεν δοκίμασε να στείλει άλλο πλαίσιο, τότε το πλαίσιο μεταδίδεται επιτυχώς.
- Εάν κατά την διάρκεια της εκπομπής κάποιος άλλος χρήστης επιχειρήσει να αποστείλει άλλο πλαίσιο, τότε καταστρέφονται και τα δύο πλαίσια και πρέπει να σταλούν ξανά.
- Στην περίπτωση που το πλαίσιο καταστραφεί, ο χρήστης περιμένει κάποιο τυχαίο διάστημα και ξαναδοκιμάζει να στείλει το πλαίσιο.

Πρωτόκολλο Slotted Aloha



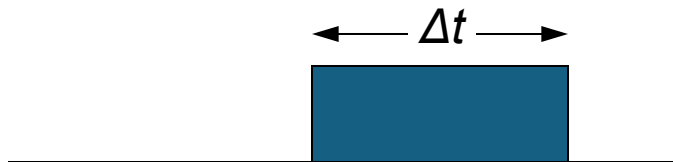
Απόδοση Πρωτοκόλλου Slotted Aloha

- Υπόθεση
 - Όλα τα πλαίσια είναι του ιδίου μεγέθους και χρειάζονται Δt χρονικές μονάδες για να μεταδοθούν.
 - Τα πλαίσια (νέα και αναμεταδόσεις) φτάνουν με διαδικασία Poisson και ρυθμό G πλαίσια ανά Δt .
- Πια η πιθανότητα ένα πλαίσιο να μεταδοθεί επιτυχώς (χωρίς σύγκρουση);
- Πιθανότητα k αφίξεων στο διάστημα Δt

$$\Pr[k] = \frac{G^k e^{-G}}{k!}$$

Μη σύγκρουση $\rightarrow k=0$ σε Δt

$$\Pr[k = 0, \Delta t] = \frac{G^0 e^{-G}}{0!} = e^{-G}$$



Throughput

$$S = Ge^{-G}$$

Ενδιαφέρον Στατιστικά...

- Slotted Aloha

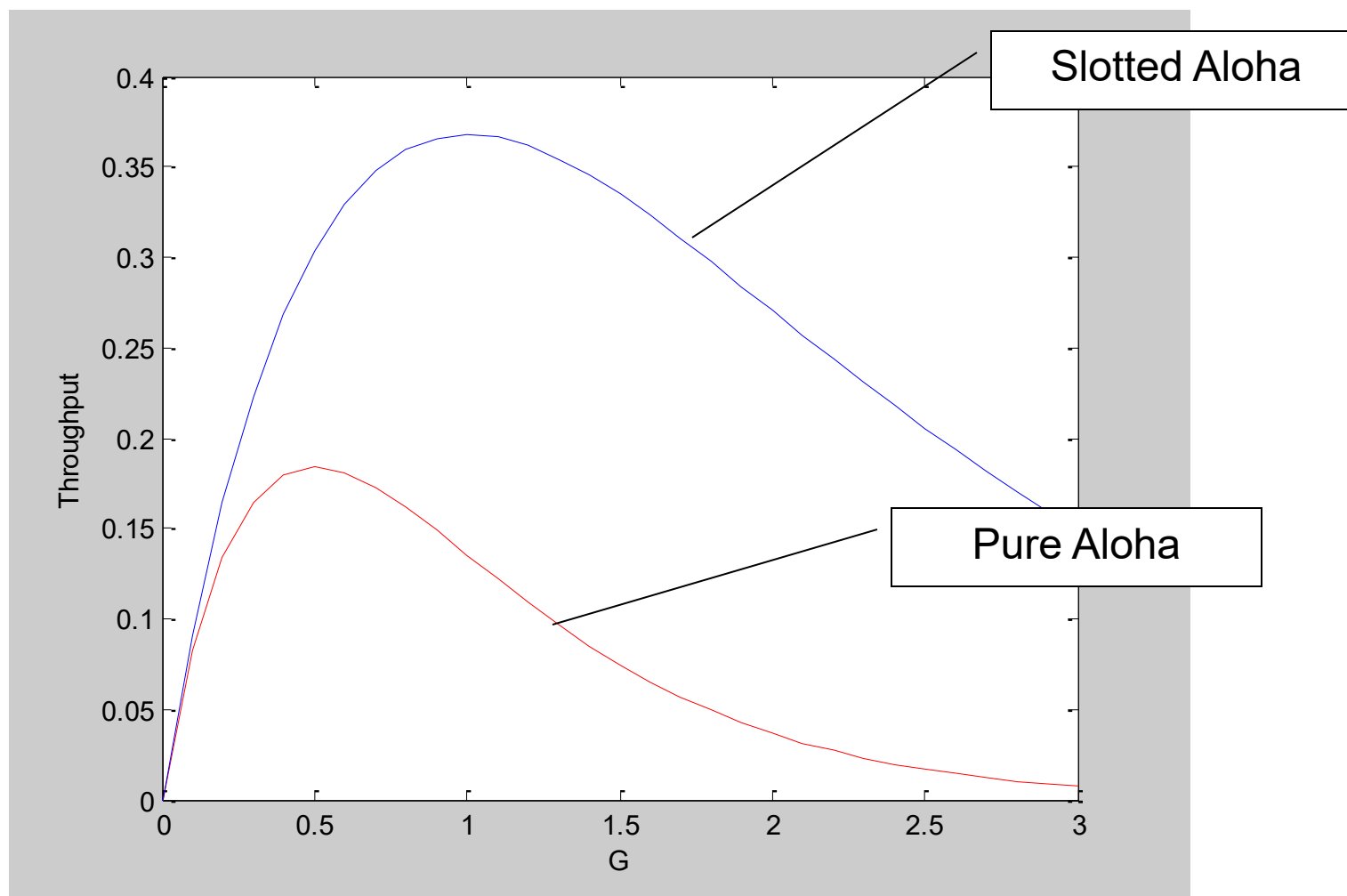
- Πιθανότητα σύγκρουσης: $1 - e^{-G}$
- Πιθανότητα μη σύγκρουσης: e^{-G}
- Πιθανότητα αποστολής ενός πλαισίου μετά από k προσπάθειες:

$$P_k = e^{-G} (1 - e^{-G})^{k-1}$$

- Μέσος αριθμός προσπαθειών που χρειάζονται για την επιτυχή αποστολή ενός πλαισίου

$$E = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k = \sum_{k=1}^{\infty} k e^{-G} (1 - e^{-G})^{k-1} = e^G$$

Σύγκριση Aloha και Slotted Aloha



Πρωτόκολλα Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος Κύματος

- Carrier Sense Multiple Access (CSMA)
 - Όλοι οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν εάν το κανάλι χρησιμοποιείται από άλλο χρήστη.
- Επίμονο Πρωτόκολλο (persistent or 1-persistent)
- Μη-Επίμονο Πρωτόκολλο (non-persistent)
- p -Επίμονο Πρωτόκολλο (p -persistent)

Επίμονο Πρωτόκολλο (Persistent CSMA)

- Όποιος χρήστης έχει πλαίσιο να στείλει, ελέγχει πρώτα το κανάλι.
 - Εάν το κανάλι είναι «ελεύθερο» αρχίζει αμέσως να μεταδίδει το δικό του πλαίσιο.
 - Εάν το κανάλι χρησιμοποιείται από άλλο χρήστη, τότε **περιμένει** μέχρι να τελειώσει. **Μόλις ο άλλος χρήστης ελευθερώσει το κανάλι, τότε αρχίζει αμέσως να μεταδίδει** το δικό του πλαίσιο.
- Εάν κατά την διάρκεια της εκπομπής του πλαισίου κανένας άλλος χρήστης δεν δοκίμασε να στείλει άλλο πλαίσιο, τότε το πλαίσιο μεταδίδεται επιτυχώς.
- Εάν υπάρξει σύγκρουση, τότε ο χρήστης περιμένει κάποιο **τυχαίο διάστημα** και επιχειρεί να ξαναστείλει το πλαίσιο.

Μη Επίμονο Πρωτόκολλο (Non-Persistent CSMA)

- Όποιος χρήστης έχει πλαίσιο να στείλει, ελέγχει πρώτα το κανάλι.
 - Εάν το κανάλι είναι «ελεύθερο» αρχίζει αμέσως να μεταδίδει το δικό του πλαίσιο.
 - Εάν το κανάλι χρησιμοποιείται από άλλο χρήστη, τότε σταματά να ελέγχει το κανάλι, περιμένει ένα τυχαίο διάστημα και ξαναδοκιμάζει.
- Εάν κατά την διάρκεια της εκπομπής του πλαισίου κανένας άλλος χρήστης δεν δοκίμασε να στείλει άλλο πλαίσιο, τότε το πλαίσιο μεταδίδεται επιτυχώς.
- Εάν υπάρξει σύγκρουση, τότε ο χρήστης περιμένει κάποιο τυχαίο διάστημα και επιχειρεί να ξαναστείλει το πλαίσιο.

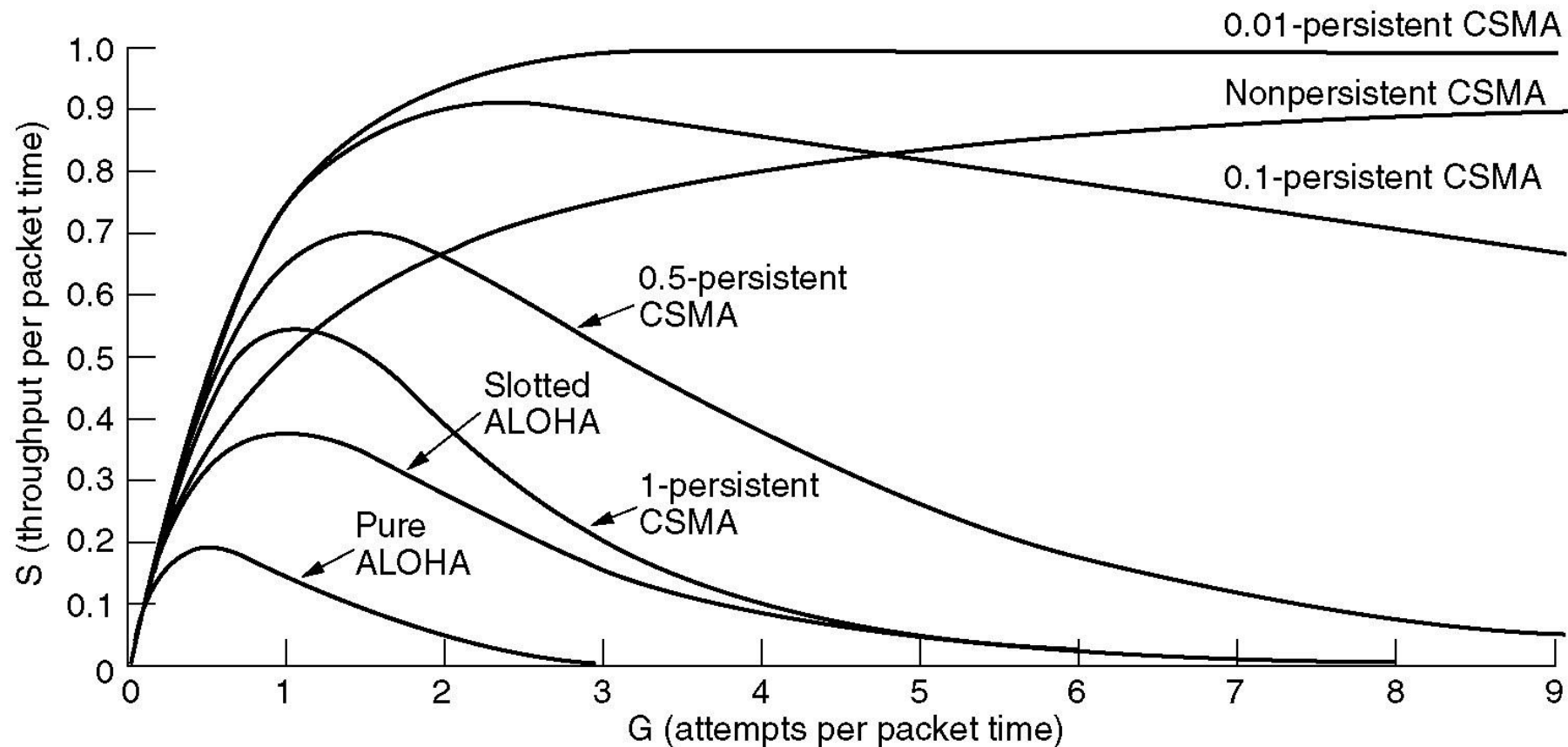
p -Επίμονο Πρωτόκολλο (p -Persistent CSMA)

- Διακριτός χρόνος
- Ο χρήστης ανιχνεύει το κανάλι
 - Εάν είναι «ελεύθερο», μεταδίδει με πιθανότητα p και με πιθανότητα $q=1-p$ περιμένει μέχρι την επόμενη θυρίδα.
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι ο χρήστης να στείλει το πλαίσιο, ή ο χρήστης ανιχνεύσει πως το κανάλι έχει «καταληφθεί» από άλλο χρήστη. Και στις δύο περιπτώσεις ο χρήστης συμπεριφέρεται όπως στην περίπτωση όπου ανιχνεύεται σύγκρουση.
- Σε περίπτωση που υπάρχει **σύγκρουση**, τότε ο χρήστης περιμένει ένα τυχαίο διάστημα και ξαναδοκιμάζει να στείλει το πλαίσιο.

Επίμονο και Μη-Επίμονο Πρωτόκολλο

- Υπάρχει περίπτωση σύγκρουσης;
- Λόγω της **καθυστέρησης διάδοσης** δύο κόμβοι μπορεί να ξεκινήσουν να μεταδίδουν ταυτόχρονα πριν προλάβουν να ανιχνεύσουν την παρουσία άλλου χρήστη στο κανάλι.
- Ακόμη και χωρίς τη καθυστέρηση διάδοσης δύο κόμβοι μπορούν να αρχίσουν εκπομπή ακριβώς την ίδια στιγμή
 - **Επίμονο**. Δύο χρήστες ξεκινούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν μόλις το κανάλι «ελευθερωθεί».
 - **Μη-Επίμονο**. Η πιθανότητα σύγκρουσης είναι μηδαμινή.
 - **p -Επίμονο**. Δύο χρήστες ξεκινούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν μόλις το κανάλι «ελευθερωθεί». Αυτή η πιθανότητα μειώνεται όσο μειώνεται το p .

Σύγκριση Πρωτοκόλλων με Ανίχνευση Φέροντος Κύματος

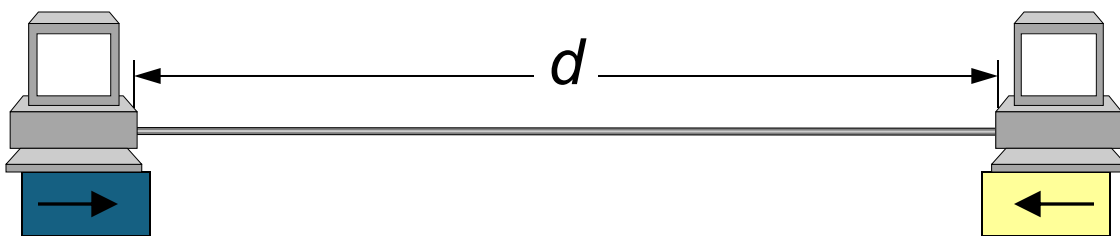


Πρωτόκολλα Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος Κύματος και Συγκρούσεων

- Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD).
 - Οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν εάν το κανάλι χρησιμοποιείται από άλλο χρήστη.
 - Επίσης έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύουν άμεσα την ύπαρξη σύγκρουσης.
- Μόλις ανιχνεύσουν σύγκρουση, σταματούν αμέσως την μετάδοση του καταστρεμμένου πλαισίου
 - Με αυτό τον τρόπο **εξοικονομείται χρόνος και εύρος ζώνης**.
- Το CSMA/CD είναι η βάση του Ethernet.

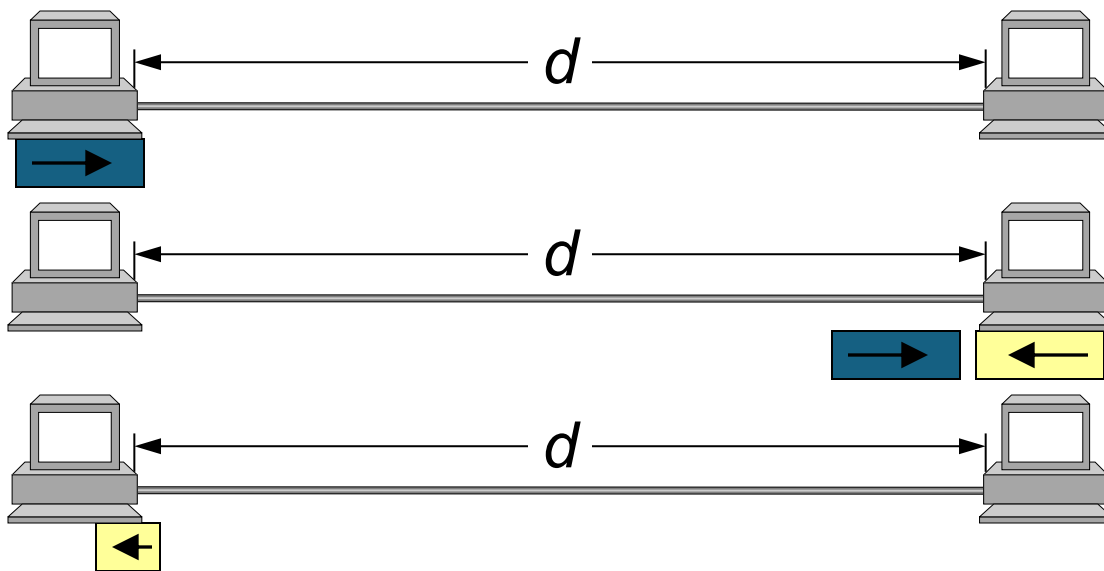
CSMA/CD και Καθυστέρηση Διάδοσης

- Εάν οι κόμβοι ξεκινήσουν να μεταδίδουν ταυτόχρονα, τότε θα ανιχνεύσουν την σύγκρουση;



Καθυστέρηση
διάδοσης: $\tau = d/c$

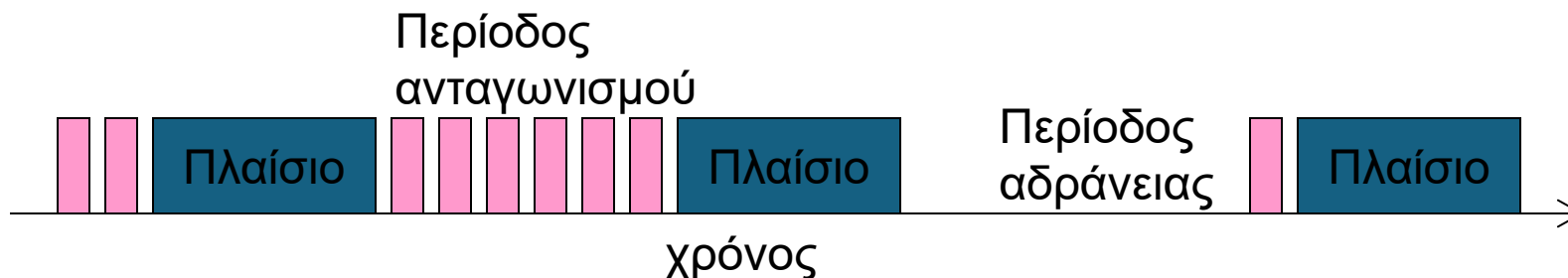
- Πια η μεγαλύτερη δυνατή καθυστέρηση;



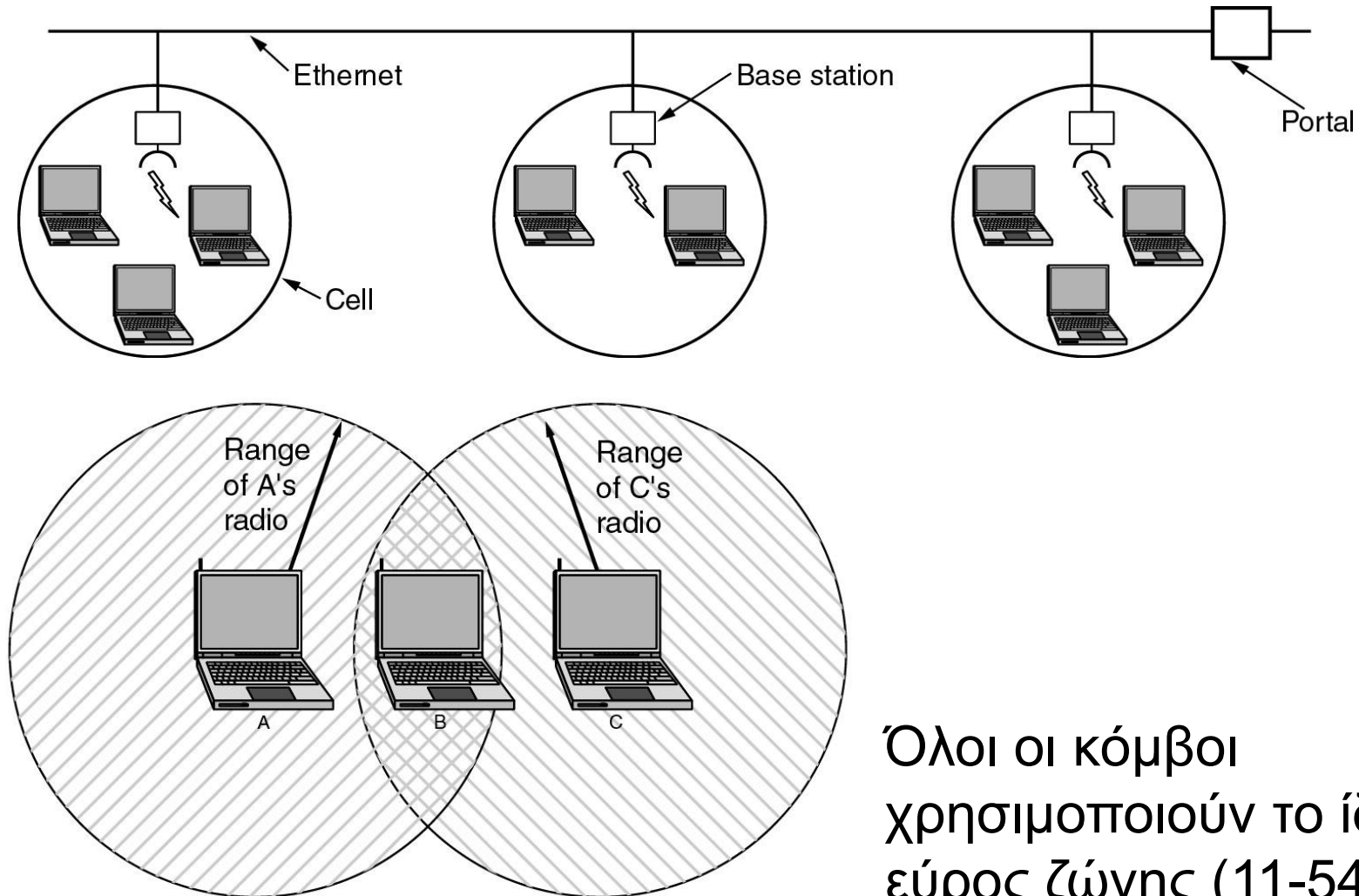
$$2\tau = 2d/c$$

Πρωτόκολλο CSMA/CD

- Όταν ένας χρήστης έχει πλαίσιο να στείλει, ελέγχει πρώτα το κανάλι.
 - Εάν είναι «ελεύθερο», τότε αρχίζει να μεταδίδει αμέσως.
 - Εάν **χρησιμοποιείται**, περιμένει μέχρι να τελειώσει την μετάδοση ο προηγούμενος χρήστης και τότε αρχίζει αμέσως να μεταδίδει.
- Από τη στιγμή που αρχίζει να μεταδίδει, ελέγχει το κανάλι.
 - Εάν δεν ανιχνεύσει σύγκρουση, τότε μπορεί να συνεχίσει και να τελειώσει την μετάδοση.
 - Εάν ανιχνεύσει σύγκρουση, σταματά και επανέρχεται μετά από τυχαίο διάστημα.
- Στο κανάλι, κάθε επιτυχής μετάδοση εναλλάσσεται με περιόδους ανταγωνισμού (contention periods)



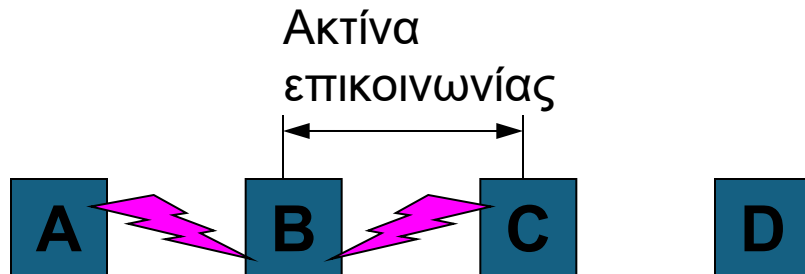
Πρωτόκολλα για Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα



Όλοι οι κόμβοι
χρησιμοποιούν το ίδιο
εύρος ζώνης (11-54Mbps)

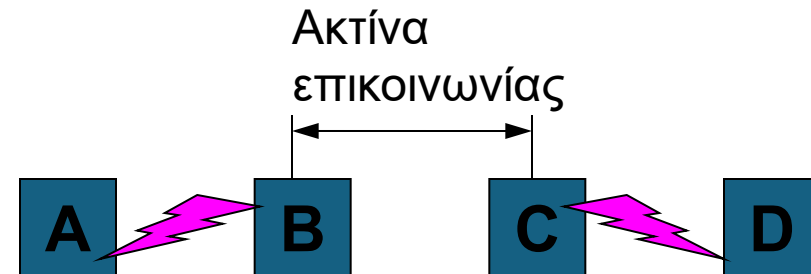
Πρόβλημα Κρυμμένου Σταθμού (Hidden Station Problem)

- Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν κανάλια πολλαπλής πρόσβασης, οπότε θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τα πρωτόκολλα που έχουμε δει μέχρι τώρα...
- Πρόβλημα κρυμμένου σταθμού (hidden station problem)
- Πρόβλημα εκτεθειμένου σταθμού (exposed station problem)



Πρόβλημα Κρυμμένου Σταθμού

- Ο A και C θέλουν να επικοινωνήσουν με τον B.
- Ο C δεν ακούει το φέρον κύμα του A



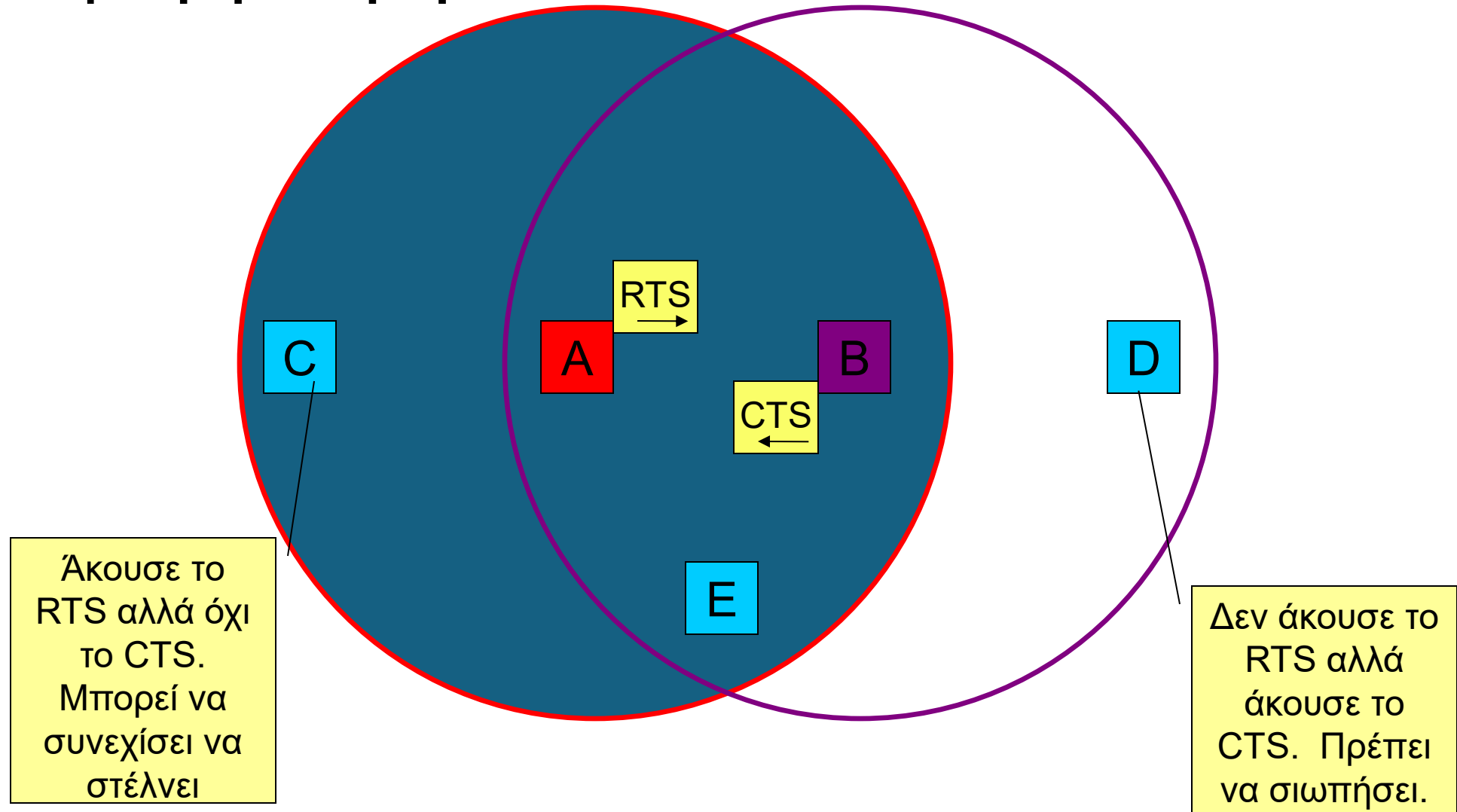
Πρόβλημα Εκτεθειμένου Σταθμού

- Ο B θέλει να επικοινωνήσει με τον A, και ο C με τον D.
- Ο C ακούει το φέρον κύμα του B, και «νομίζει» πως το κανάλι χρησιμοποιείται

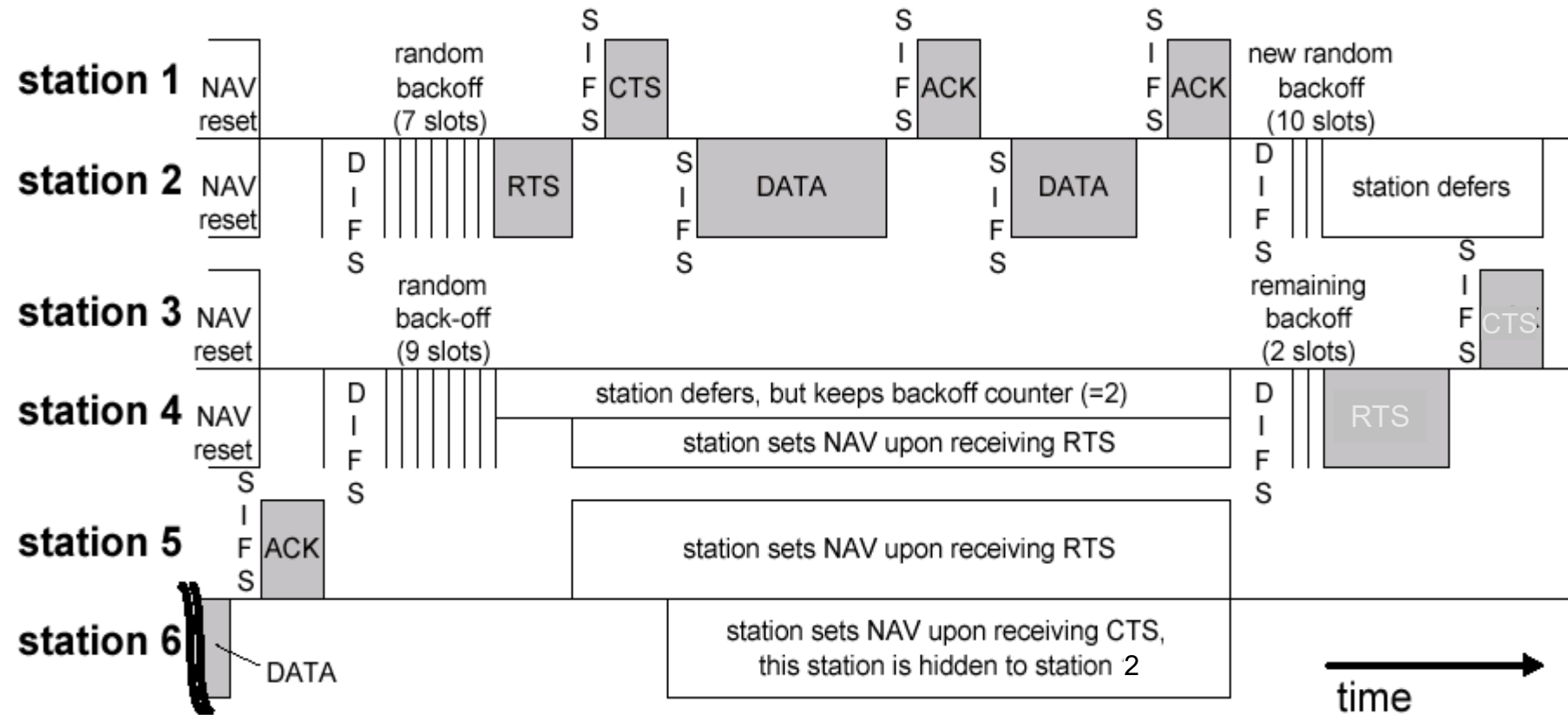
Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης Με Αποφυγή Συγκρούσεων

- Multiple Access with Collision Avoidance (MACA)
- Εάν ο A θέλει να στείλει κάποιο πλαίσιο στον B, στέλνει πρώτα ένα μικρό μήνυμα **RTS** (Request to Send 30 bytes).
- Ο B Απαντά με άλλο μικρό μήνυμα **CTS** (Clear To Send).
 - Τα RTS και CTS περιέχουν το μέγεθος του αναμενόμενου πλαισίου.
- Ο **A ξεκινά** με την αποστολή του πλαισίου
- Όλοι οι σταθμοί που άκουσαν το CTS **σιωπούν** μέχρι να τελειώσει η αποστολή του πλαισίου από τον A στον B.
- Δύο σταθμοί μπορεί να στείλουν σχεδόν **ταυτόχρονα RTS** σε κάποιο τρίτο, οπότεν και θα παρατηρηθεί **σύγκρουση**. Κάθε σταθμός που ανιχνεύει σύγκρουση, περιμένει ένα **τυχαίο διάστημα** και ξαναδοκιμάζει.

Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης Με Αποφυγή Συγκρούσεων



Παράδειγμα Μετάδοσης με DCF



Το CW διπλασιάζεται μετά από κάθε σύγκρουση

- Initial CW → 3 (τιμές backoff 0-3)
- CW after Collision 1 → 7 (τιμές backoff 0-7)
- CW after Collision 2 → 15 (τιμές backoff 0-15)
- CW after Collision 3 → 31 (τιμές backoff 0-31)
- CW after Collision 4 → 63 (τιμές backoff 0-63)

Βασικά Μειονεκτήματα DCF

- Απρόβλεπτος αριθμός συγκρούσεων
- Απρόβλεπτες καθυστερήσεις επιτυχούς μετάδοσης
- Απρόβλεπτη ρυθμαπόδοση (throughput)
- Μη ελεγχόμενη επιλογή σταθμού προς μετάδοση

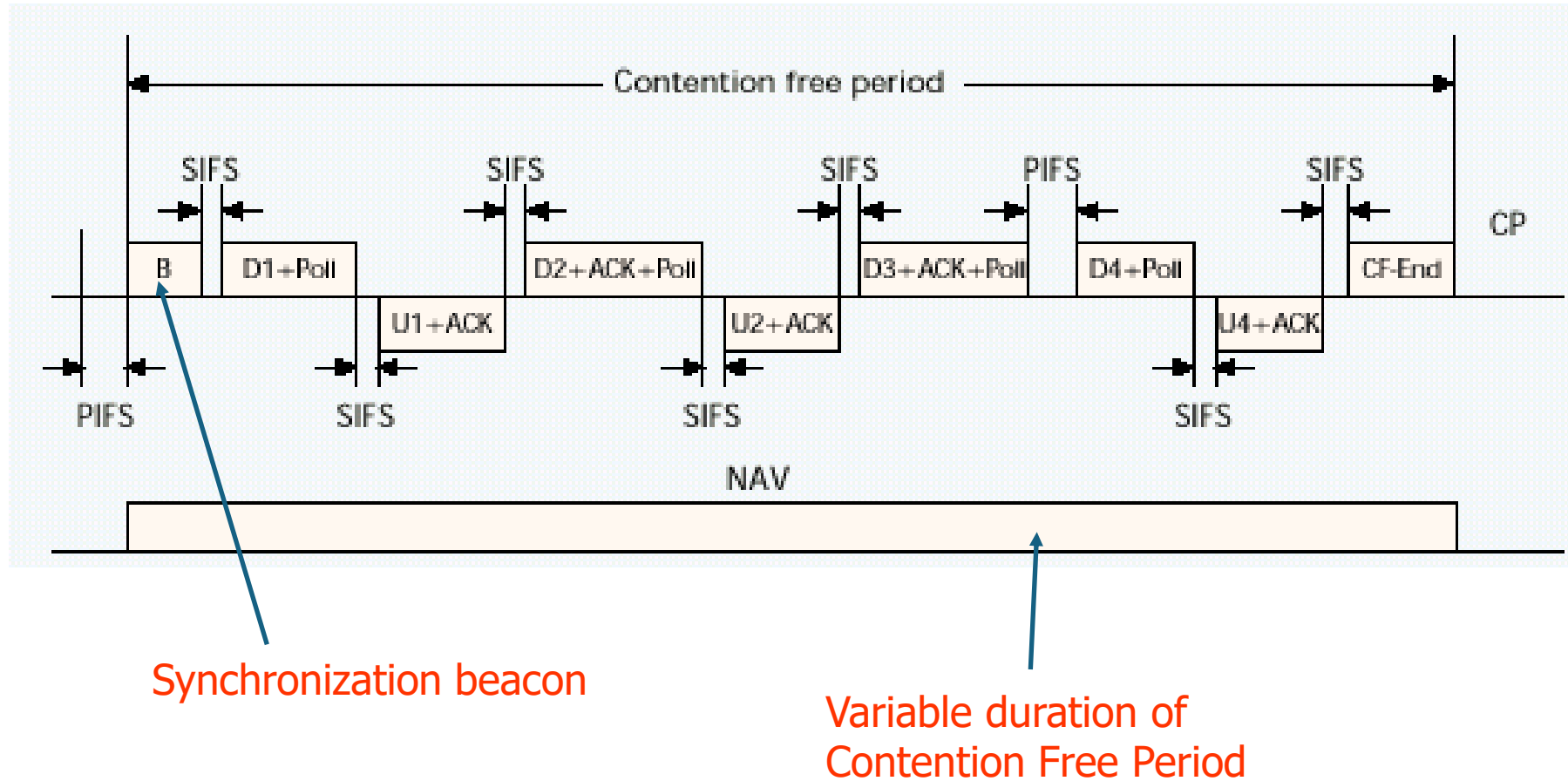
Και ένα πλεονέκτημα:

- Χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης και καλή απόδοση σε χαμηλό φόρτο

Point Coordination Function (I)

- ✓ Ενεργοποιείται από το AP όποτε αυτό κρίνει ότι πρέπει να περάσει σε contention-free period (π.χ. όταν διακρίνει μεγάλο αριθμό συγκρούσεων)
- ✓ Γενικά, όταν η κίνηση είναι χαμηλή συμφέρει το DCF, ενώ όταν είναι υψηλή συμφέρει το PCF
- ✓ Σε αυτή τη λειτουργία το AP ονομάζεται και Point Coordinator
- ✓ Έχει προτεραιότητα σε σχέση με την DCF γιατί ενεργοποιείται μετά από ανενεργό χρόνο $PIFS < DIFS$

Point Coordination Function (II)



Βασικά μειονεκτήματα του PCF

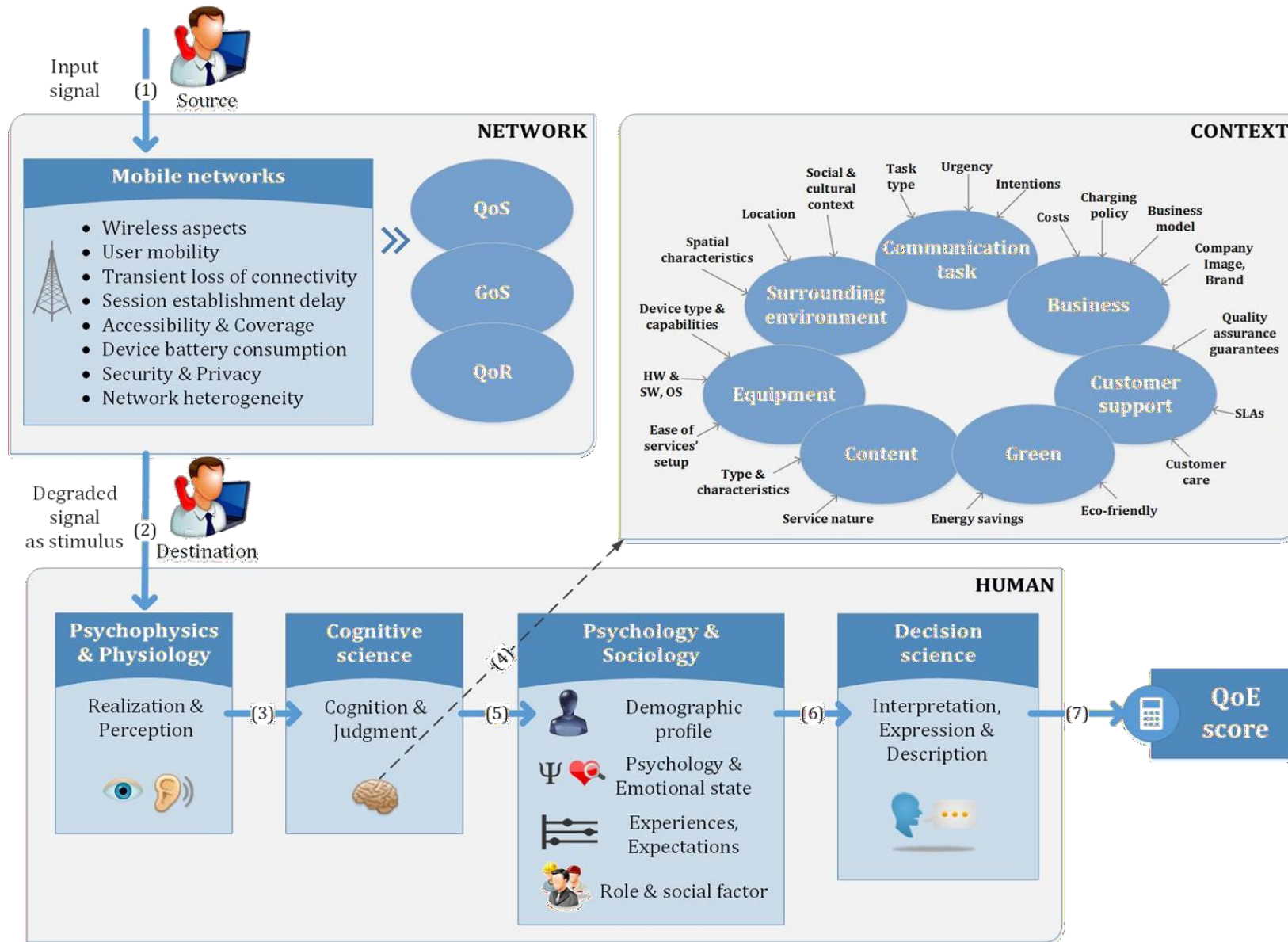
Έλλειψη μηχανισμού απαιτήσεων: Τα τερματικά (stations) δεν έχουν τρόπο να μεταδώσουν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις τους.

Υψηλή Επιβάρυνση (Overhead): Η διαδικασία δημοσκόπησης (polling) από το AP δημιουργεί μεγάλο overhead, μειώνοντας την αποτελεσματική ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων.

Καθυστερήσεις και Αστάθεια: Δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, καθώς παρουσιάζει απρόβλεπτες καθυστερήσεις (jitter) σε συνθήκες φόρτου.

Πολυπλοκότητα Υλοποίησης: Είναι πολύ πιο περίπλοκο στην υλοποίηση σε σχέση με τον μηχανισμό DCF που βασίζεται στον ανταγωνισμό.

QoE: A multidisciplinary field



1. Human

Age, gender, education level, cultural background, sociological and psychological factors, cognitive and perceptual abilities, user expectations, experiences, emotion, mood, perception, preferences



2. Network (Key Performance Indicators - KPIs)

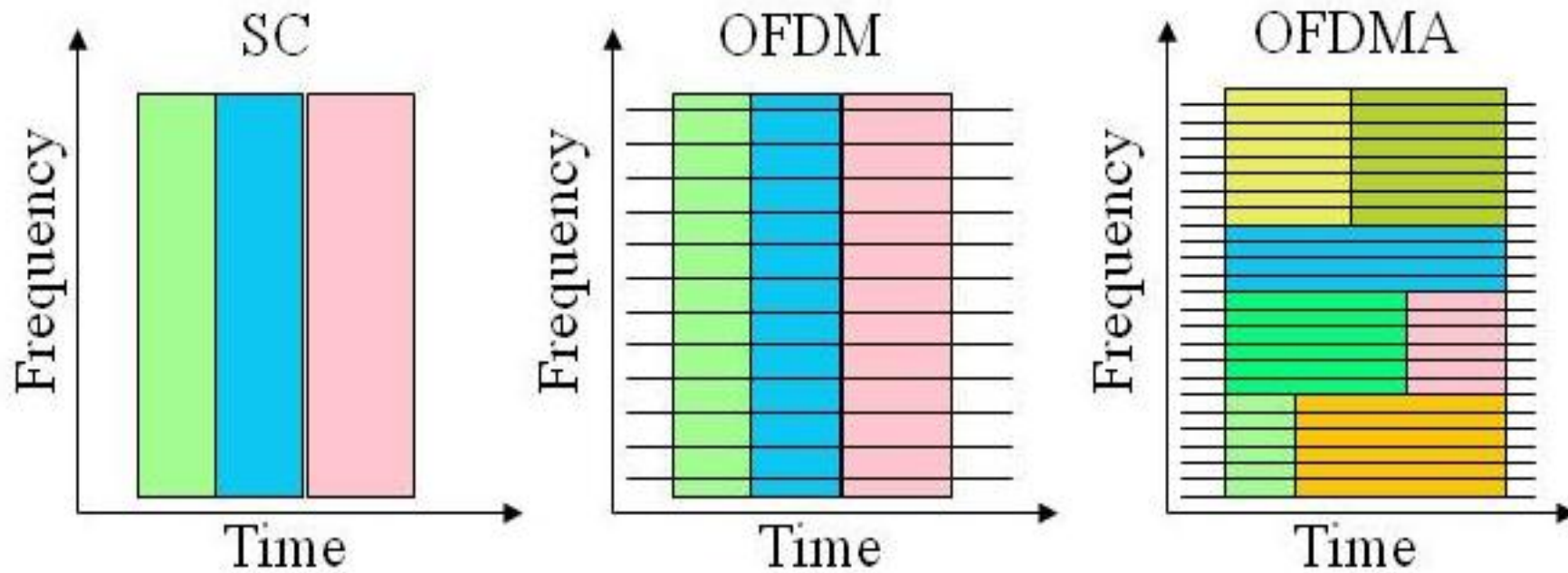
Aspect	Quality Influence Factors	Aspect	Quality Influence Factors
Video specific	- Frame Rate - Video bit rate - Video content - Terminal type - Display size, type and resolution - Codec type and implementation - Video resolution and video format	Transport / Network	- Round trip / one-way delay - Jitter - Packet loss ratio - Delay burstiness distribution - Loss burstiness distribution - Bottleneck bandwidth - Congestion period
Video on Demand	- Number of stalling events - Duration of stalling events - Total video duration - Initial delay (start-up delay) - Time on highest layer (HTTP Adaptive Streaming - HAS) - Number of switches (HAS) - Altitude (HAS)	Physical	- SNR / SIR / SINR - Bit rate - BLER - Outage probability - Packet / Symbol / Bit Error Probability - Outage capacity - Ergodic capacity / throughput - Diversity order / coding gain - Area spectral efficiency - Energy efficiency

3. Context

- Energy consumption
- Terminal type
- Human role
- Communication task, Urgency
- Customer support, ease of setup & use
- Charging policy & price
- Environment
- **Content**

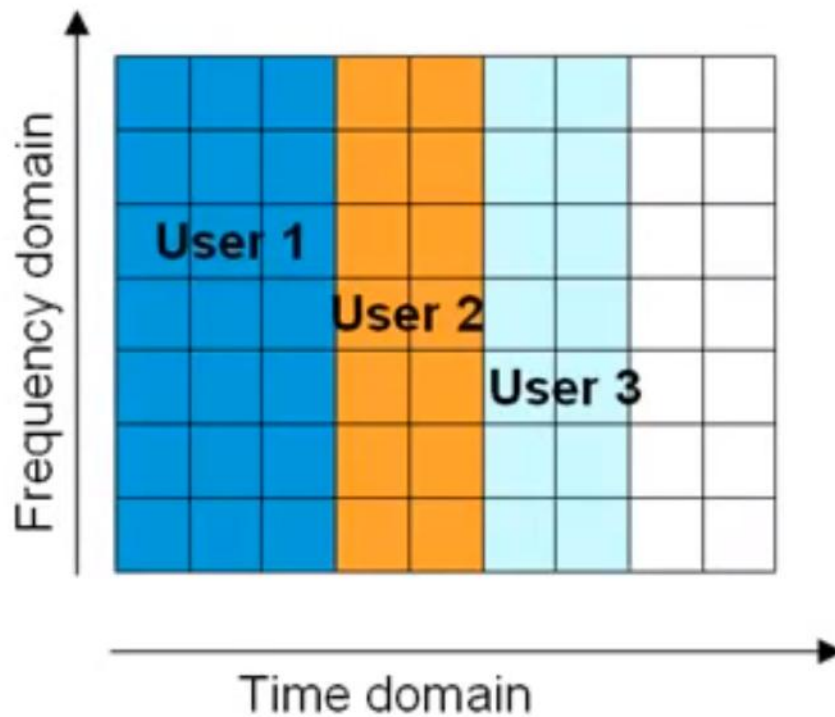


SC/OFDM/OFDMA

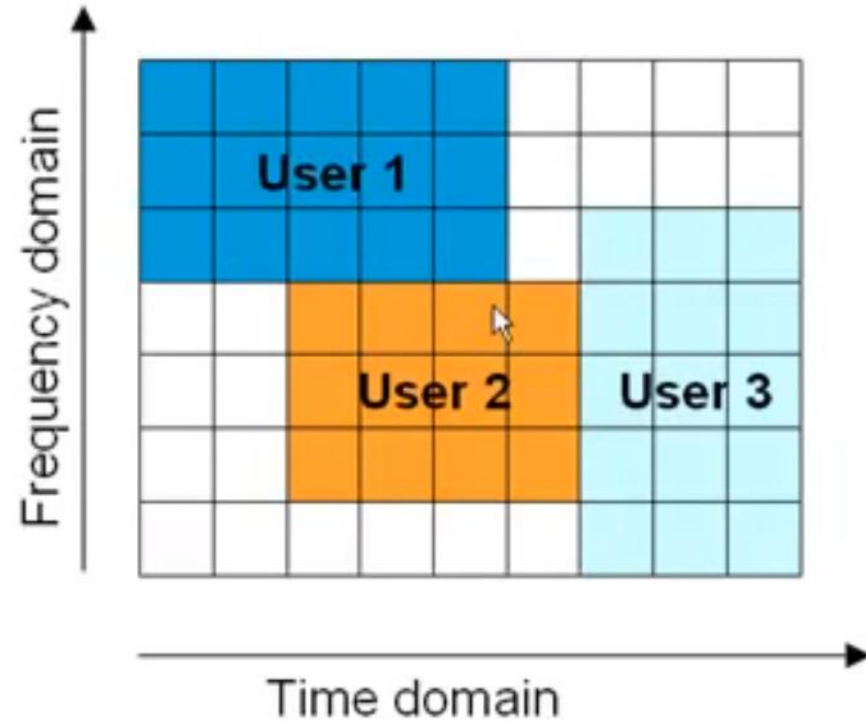


OFDMA allocation

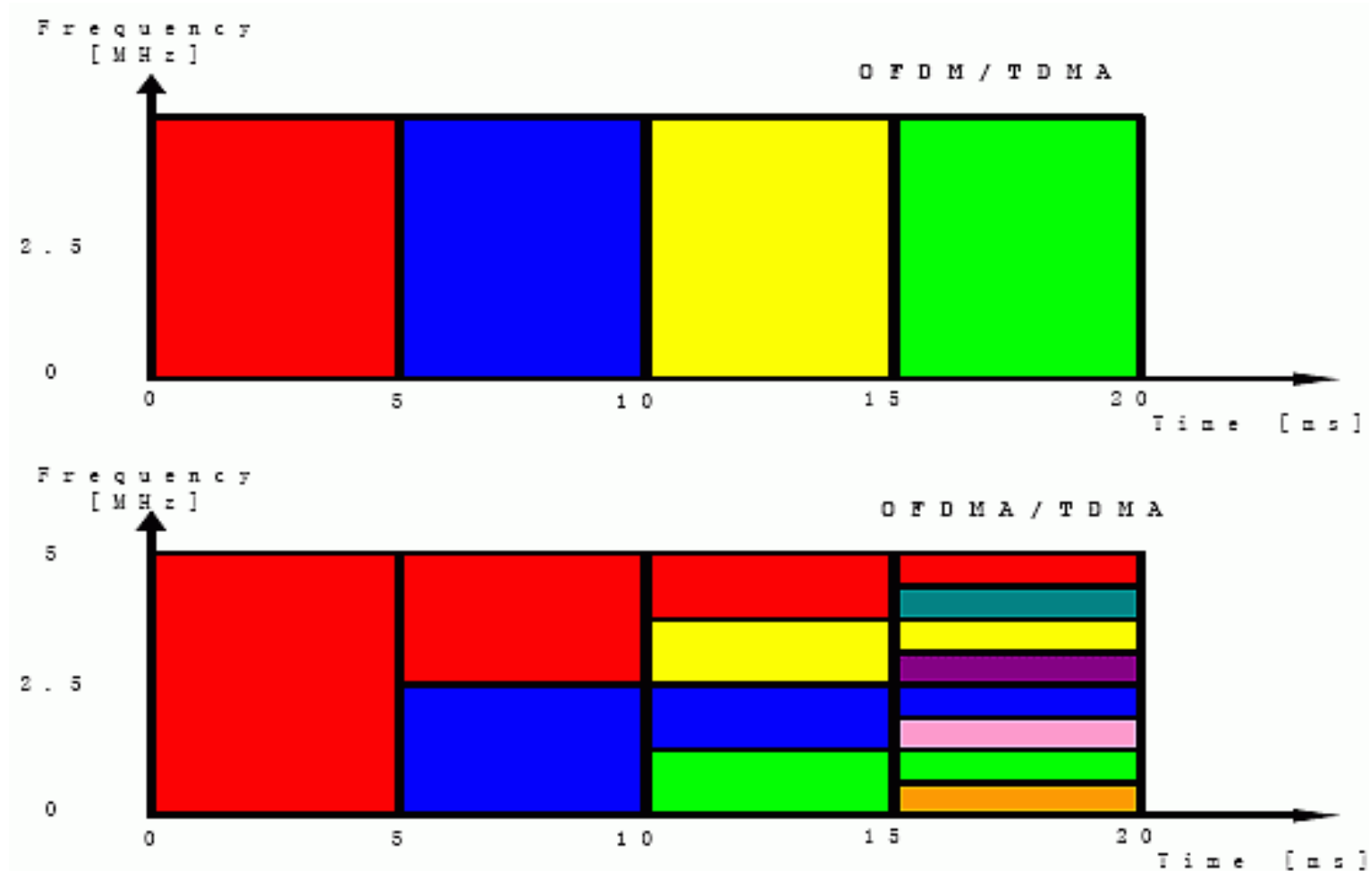
I OFDM allocates users in time domain only



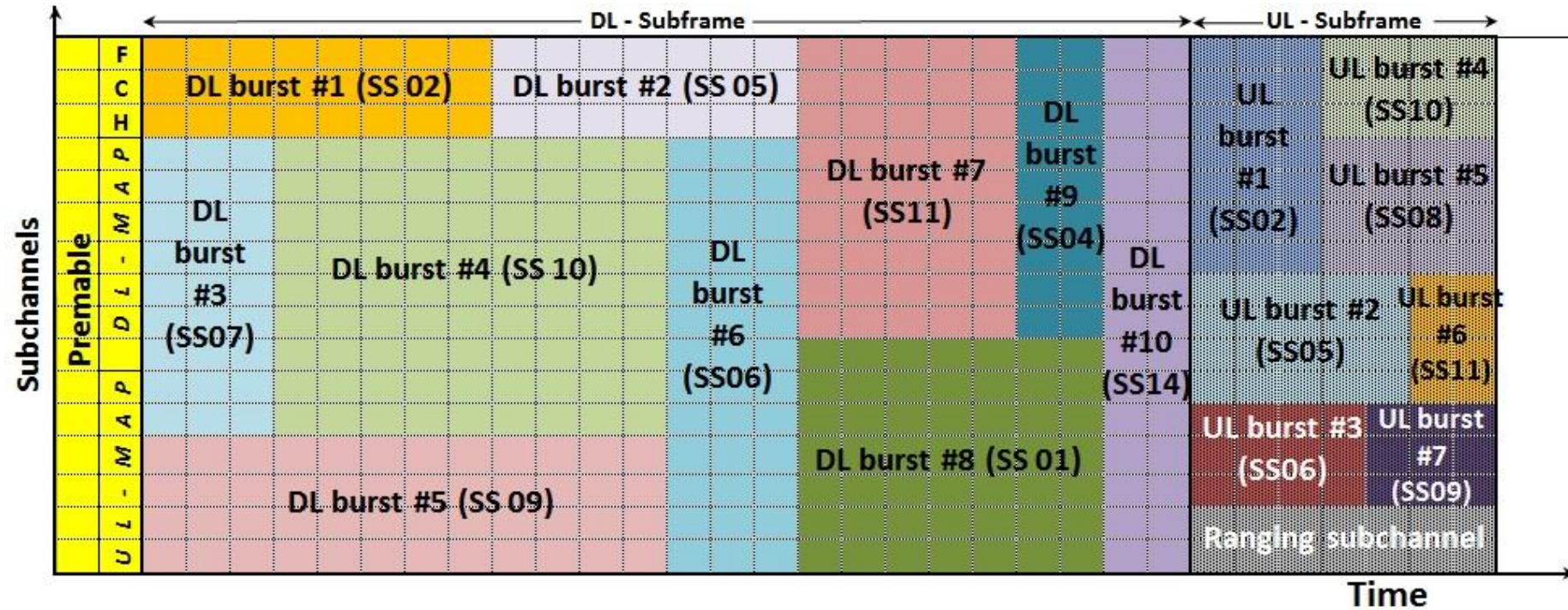
I OFDMA allocates users in time and frequency domain



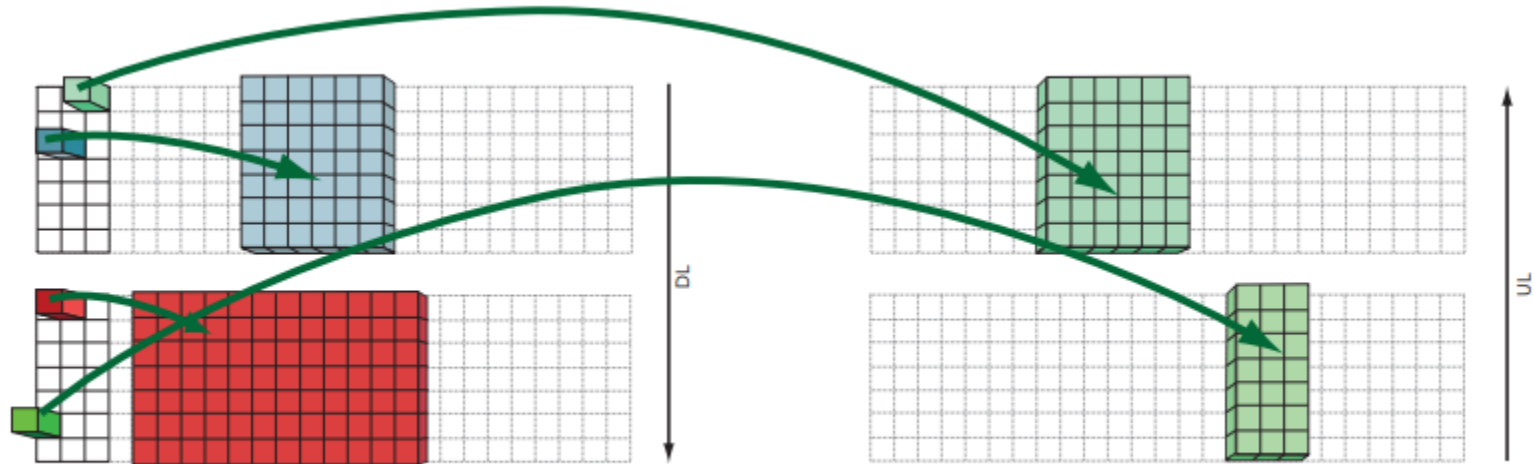
OFDMA allocation



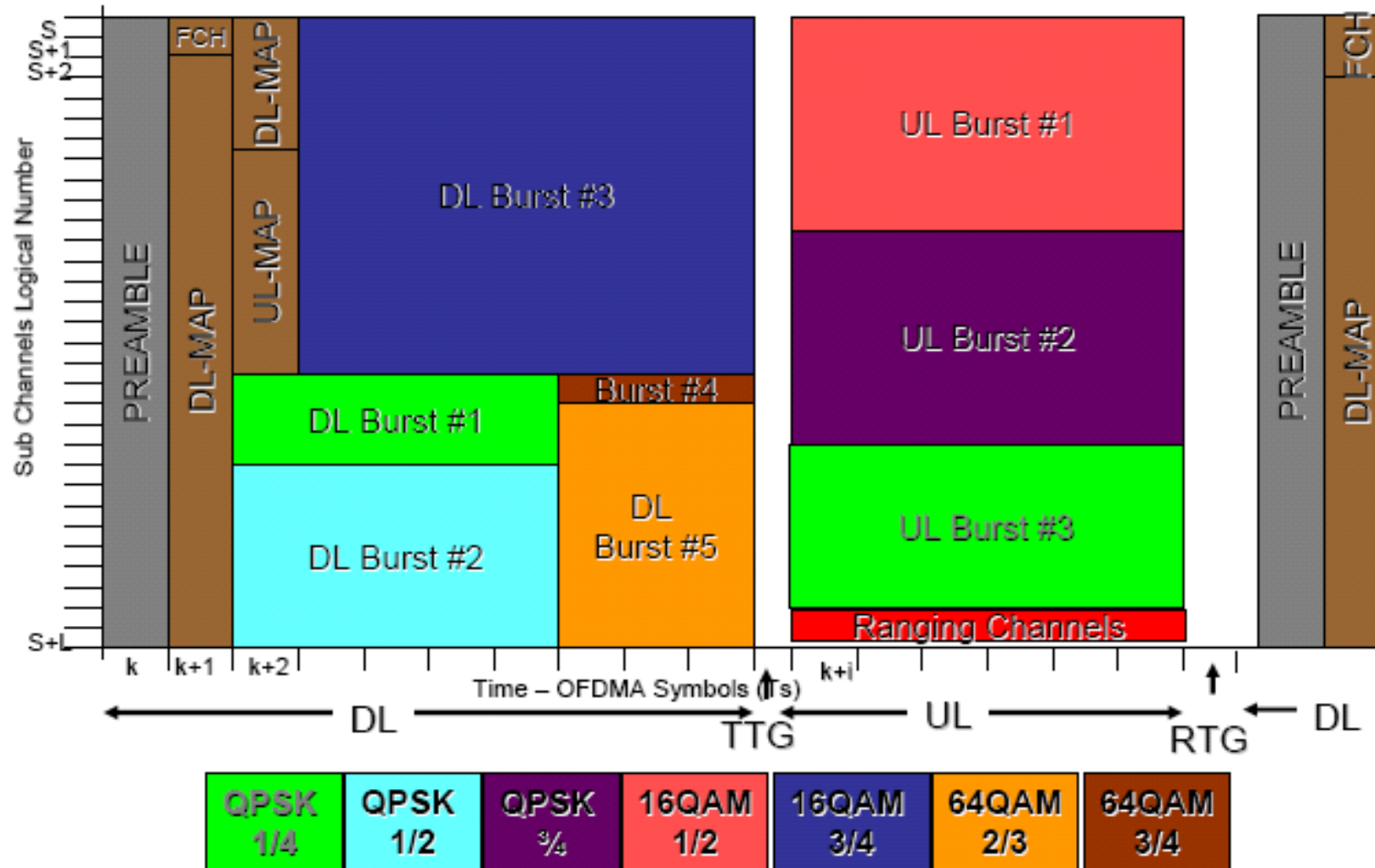
4G OFDMA/TDD structure



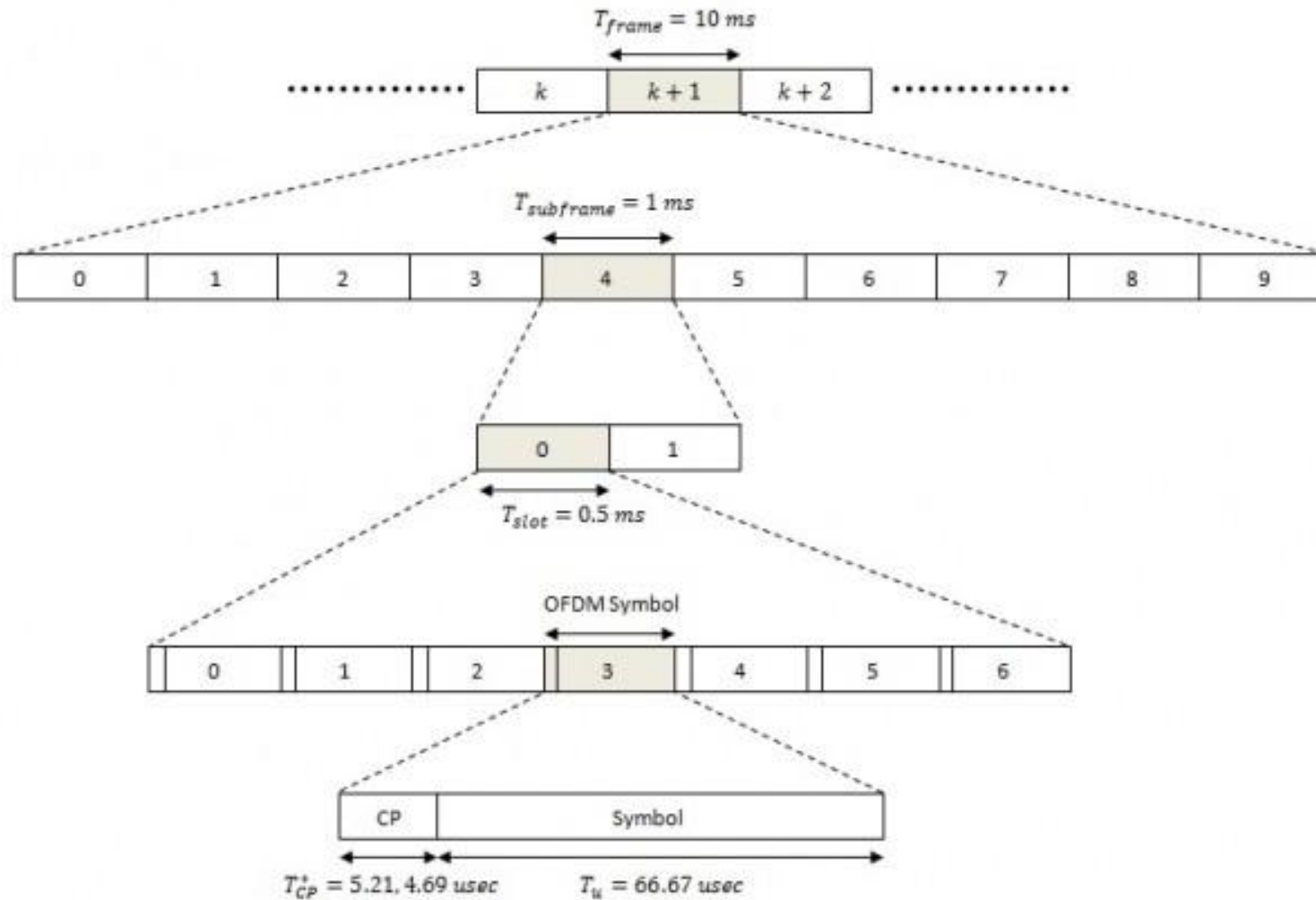
4G OFDMA/TDD structure



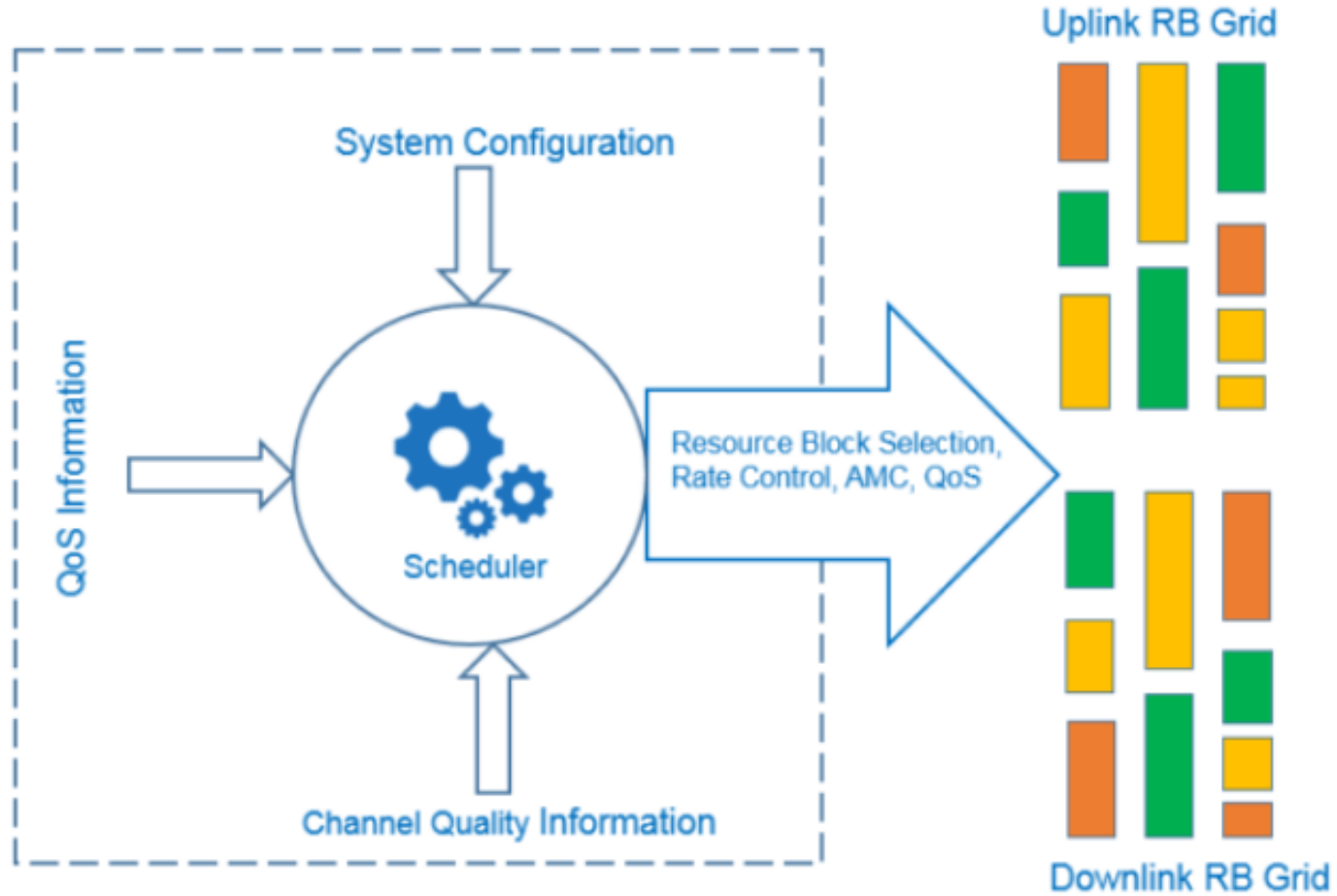
OFDMA/TDD structure



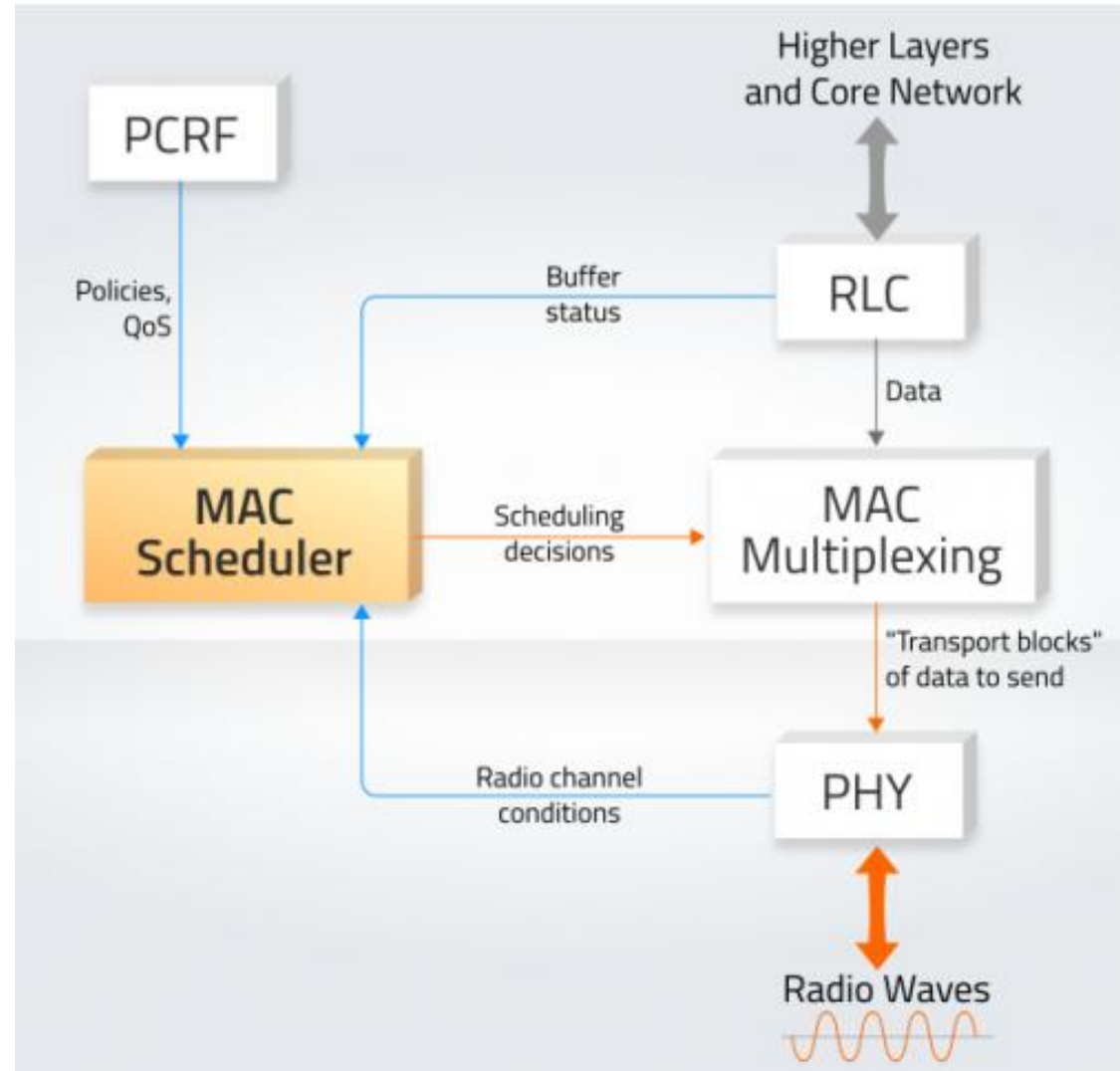
4G Generic Frame Structure



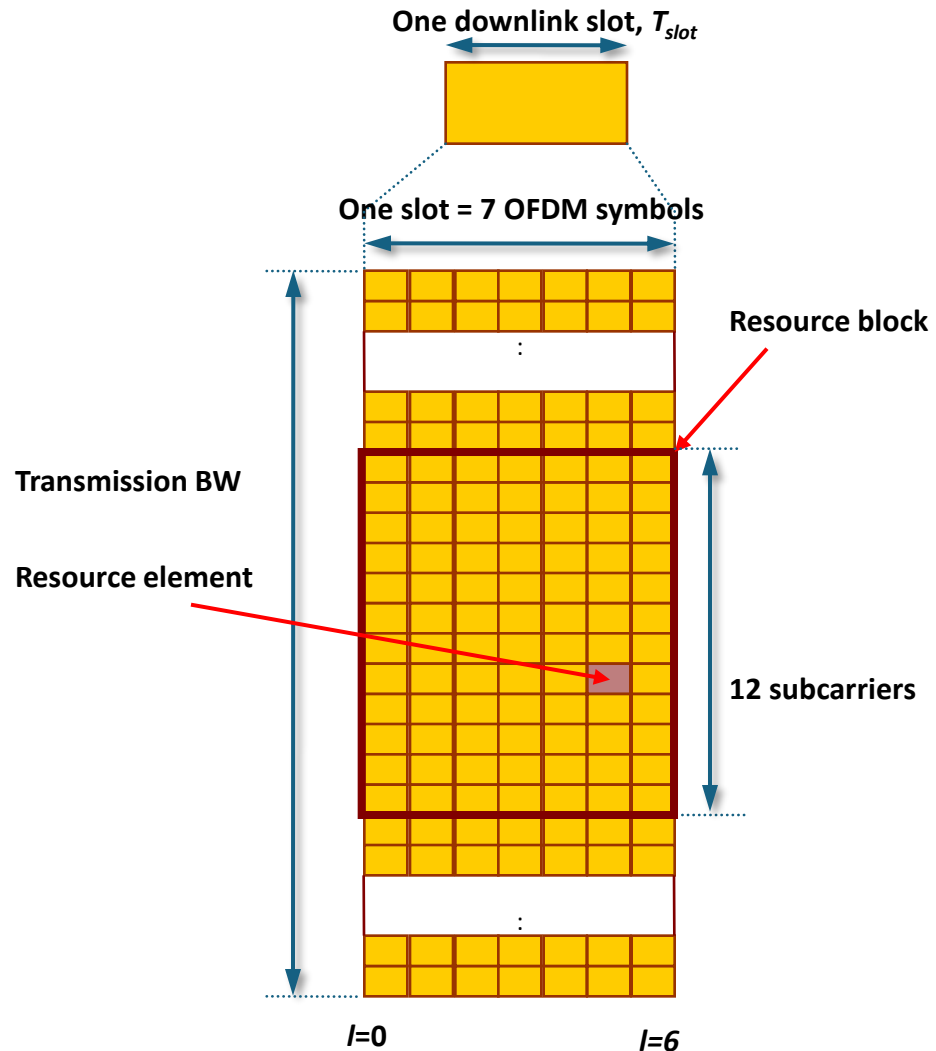
Traffic Scheduling



Traffic Scheduling

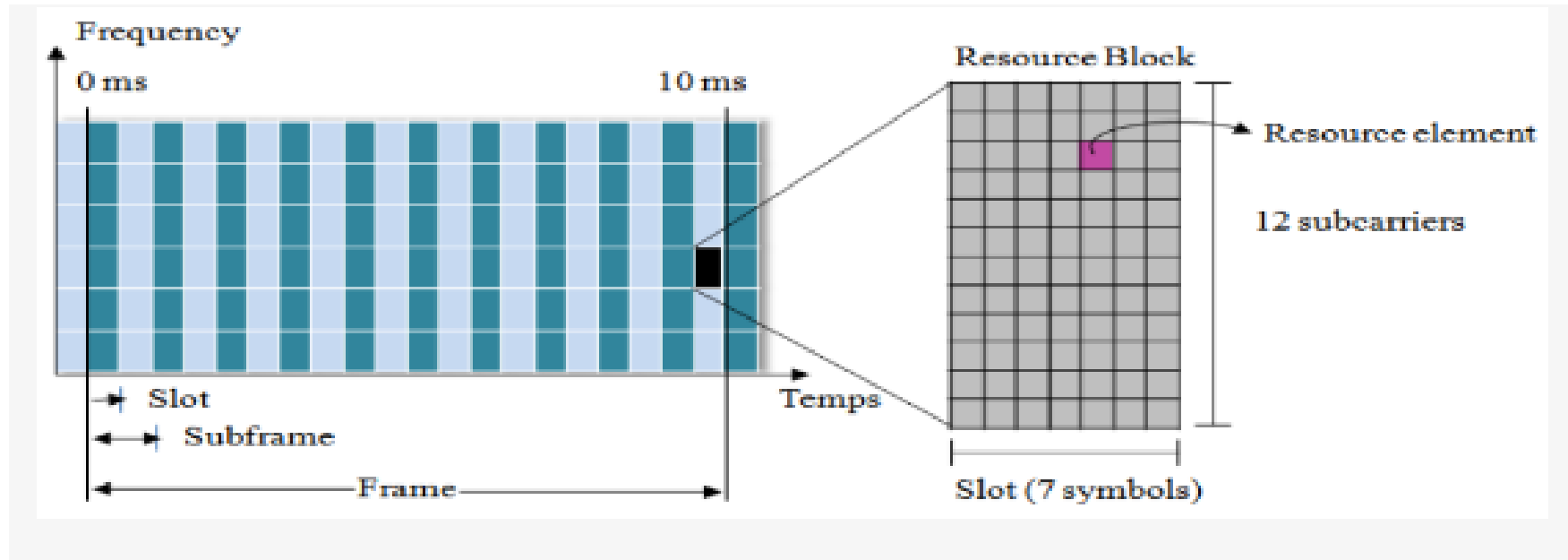


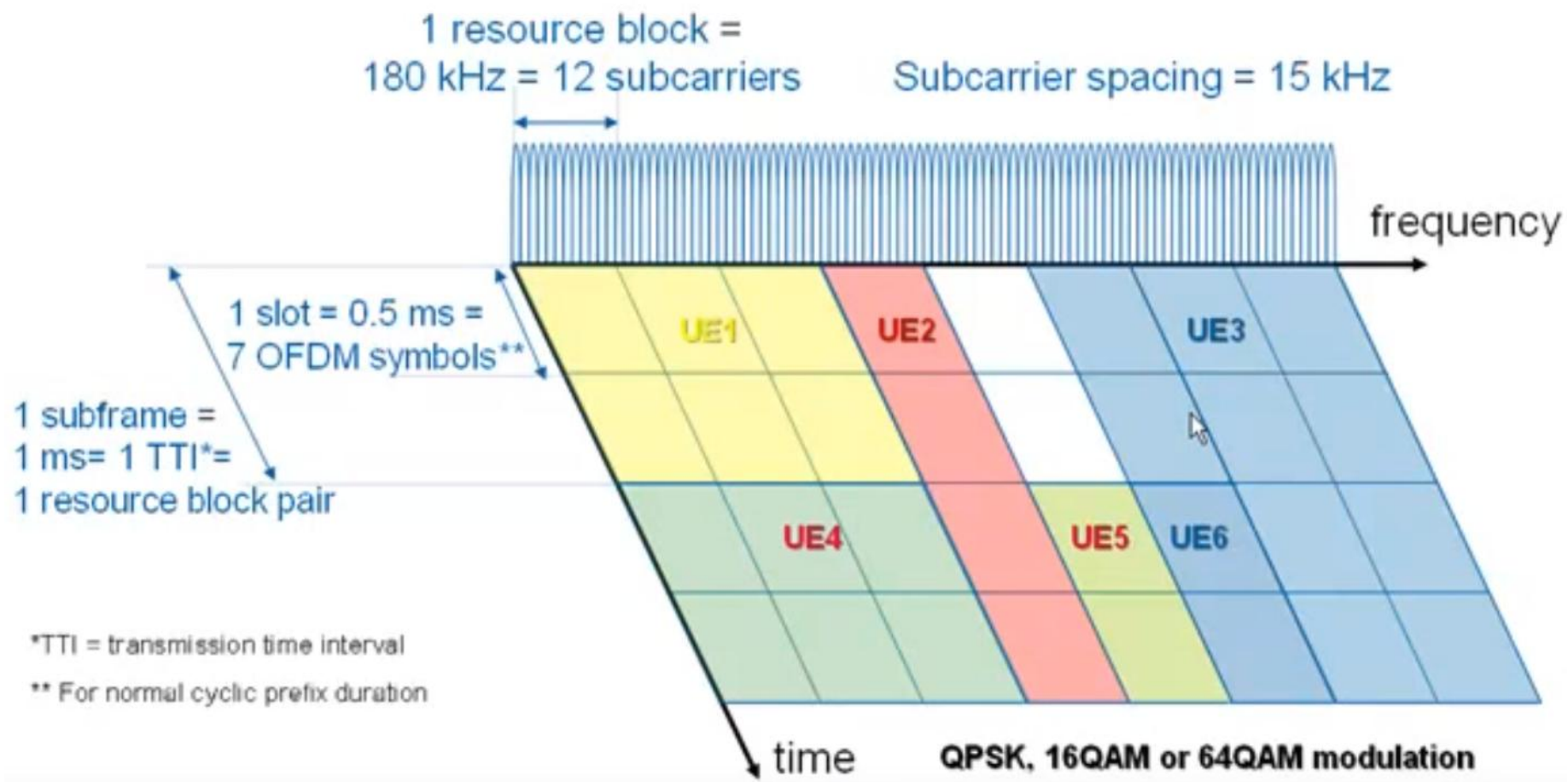
Resource Grid



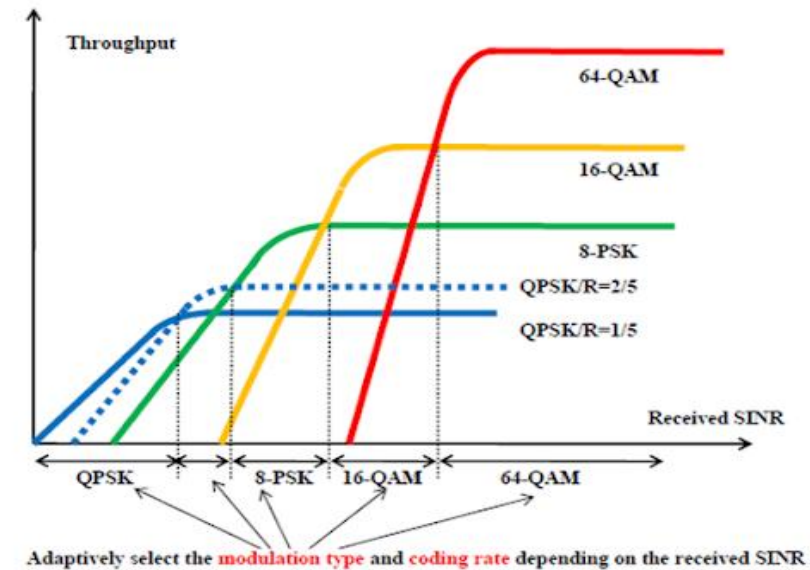
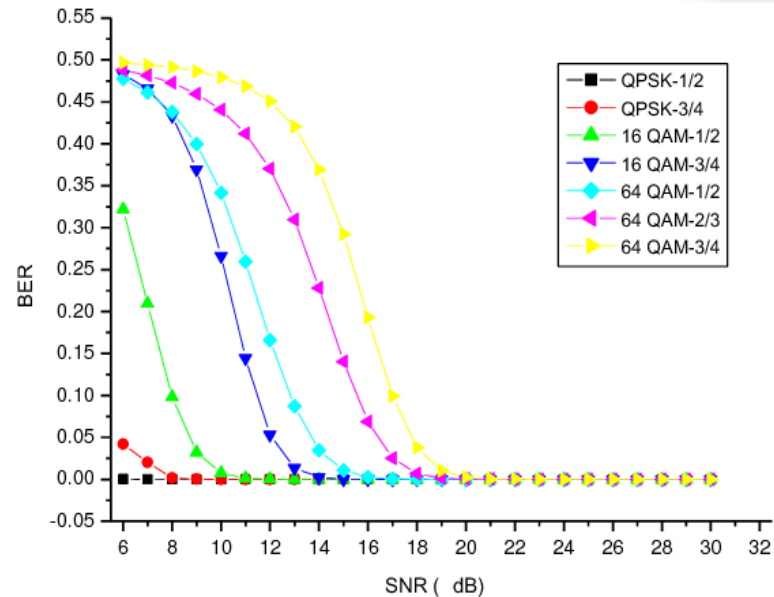
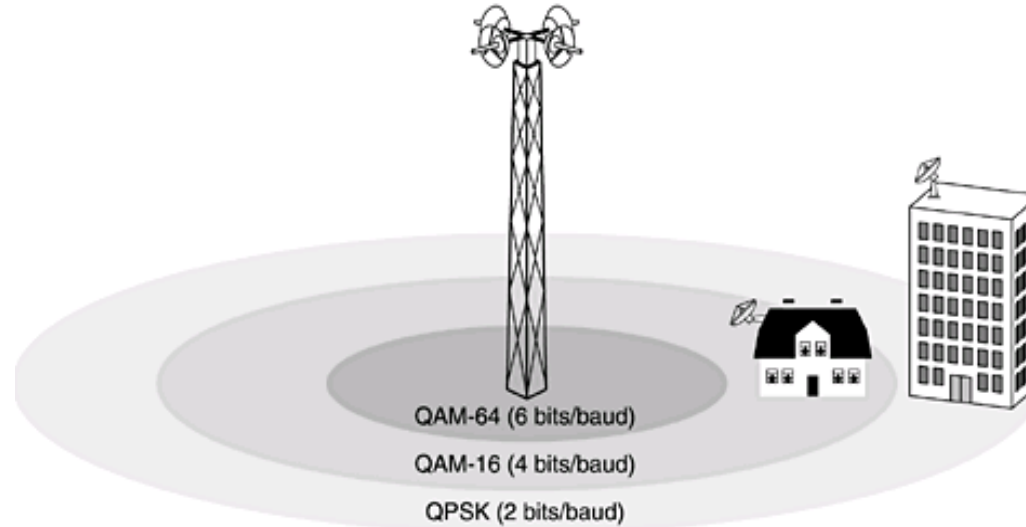
- 6 or 7 OFDM symbols in 1 slot
- Subcarrier spacing = 15 kHz
- Block of 12 SCs in 1 slot = 1 RB
 - $0.5\text{ ms} \times 180\text{ kHz}$
 - Smallest unit of allocation

Resource Grid



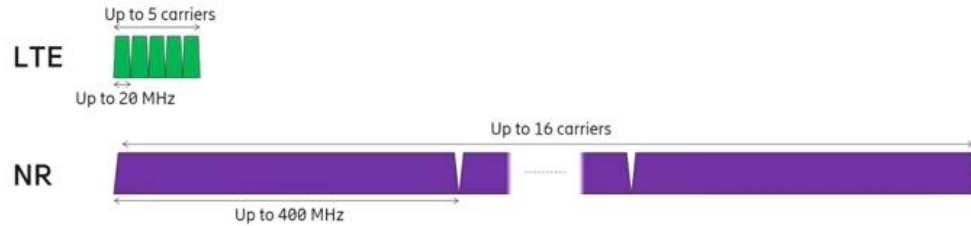


Adaptive modulation



	WCDMA (UMTS)	HSPA HSDPA / HSUPA	HSPA+	LTE	LTE ADVANCED (IMT ADVANCED)
Max downlink speed (bps)	384k	14 M	28 M	100 M	1 G
Max uplink speed (bps)	128 k	5.7 M	11 M	50 M	500 M
Latency round trip time (approx.)	150 ms	100 ms	50 ms (max)	~10 ms	Less than 5 ms
3GPP releases	Rel 99/4	Rel 5/6	Rel 7	Rel 8/9	Rel 10
Approx years of initial roll out	2003/4	2005/6 HSDPA 2007/8 HSUPA	2008/9	2009/10	
Access methodology	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA/SC- FDMA	OFDMA/SC- FDMA

5G New Radio Carriers



LTE

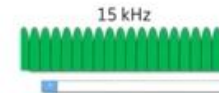
- Per carrier bandwidth up to 20 MHz
- Minimum carrier bandwidth: 1.25 MHz
- Carrier aggregation up to 5 carriers
⇒ Maximum bandwidth: 100 MHz

NR

- Per-carrier bandwidth up to 400 MHz
- Minimum carrier bandwidth: 5 MHz
- Carrier aggregation up to 16 carriers
⇒ Maximum bandwidth: 6.4 GHz (!)

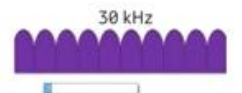
LTE

- Downlink: Conventional OFDM
- Uplink: DFT-precoded OFDM
- A single numerology with 15 kHz sub-carrier spacing

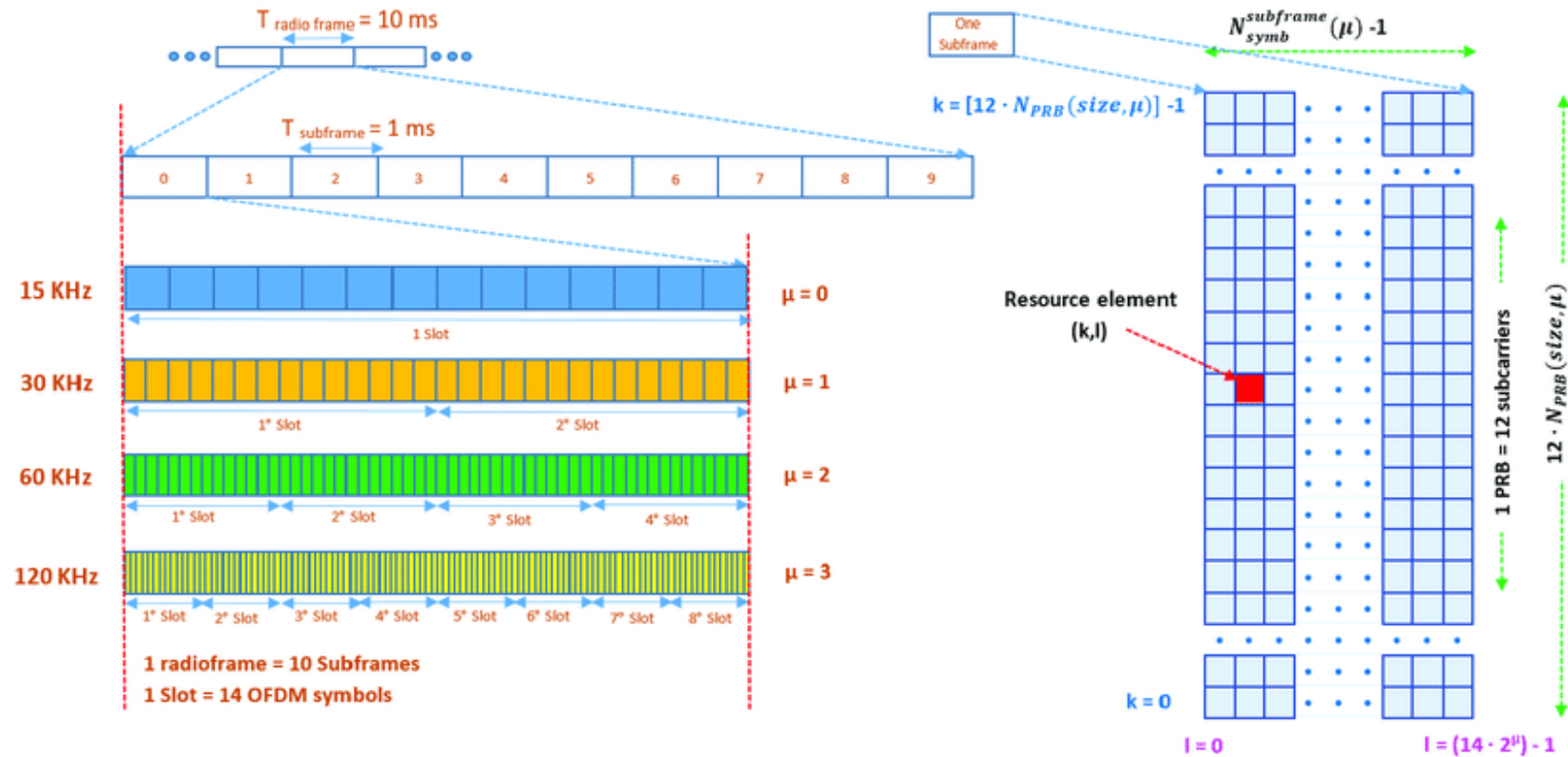


NR

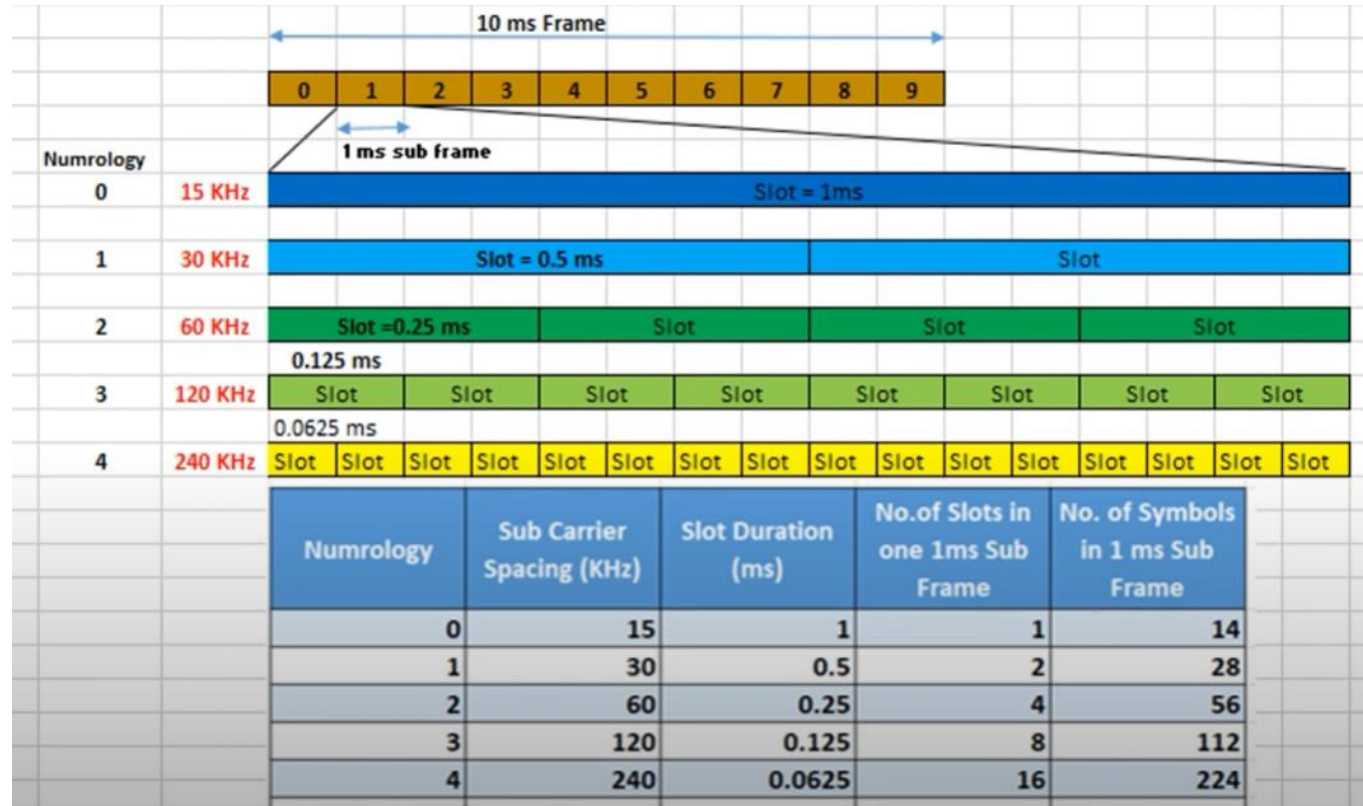
- Downlink: Conventional OFDM
- Uplink: Conventional OFDM or DFT-precoded OFDM
- Flexible/scalable numerology
 - 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz, 120 kHz
 - Correspondingly scaled symbol length



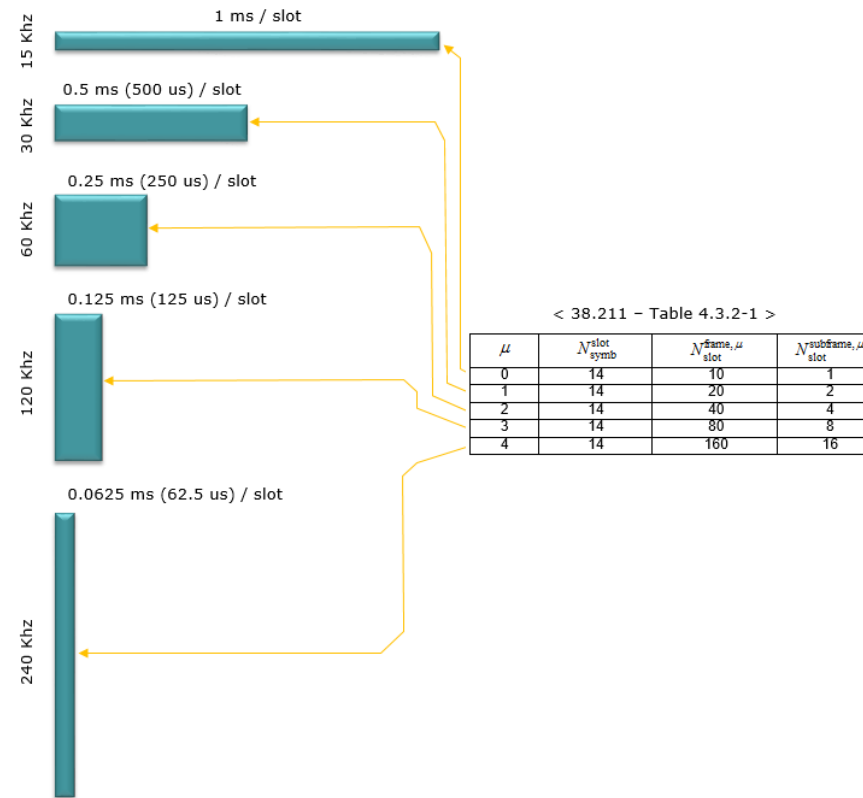
5G New Radio Numerology



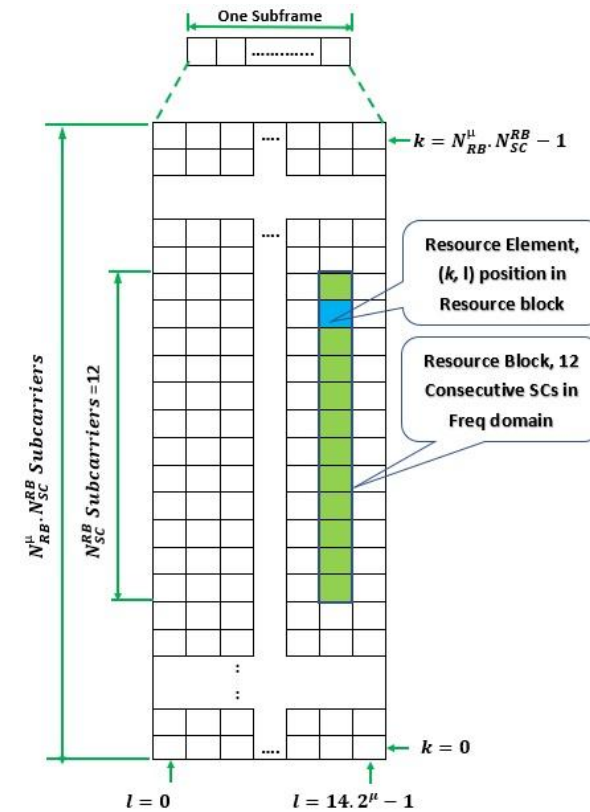
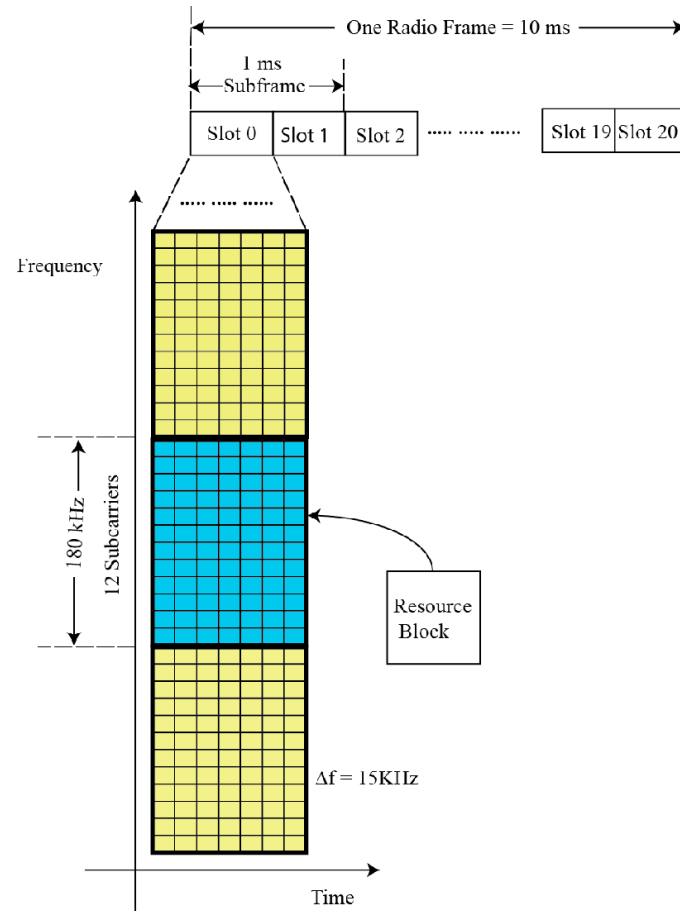
5G New Radio Numerology



5G New Radio Numerology



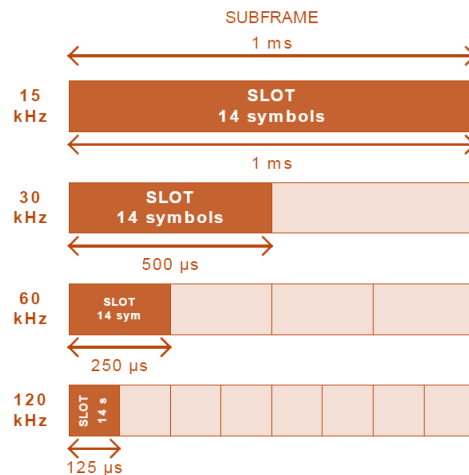
4G vs 5G Resource Block



5G New Radio (Protocol Stack – Layer 1)

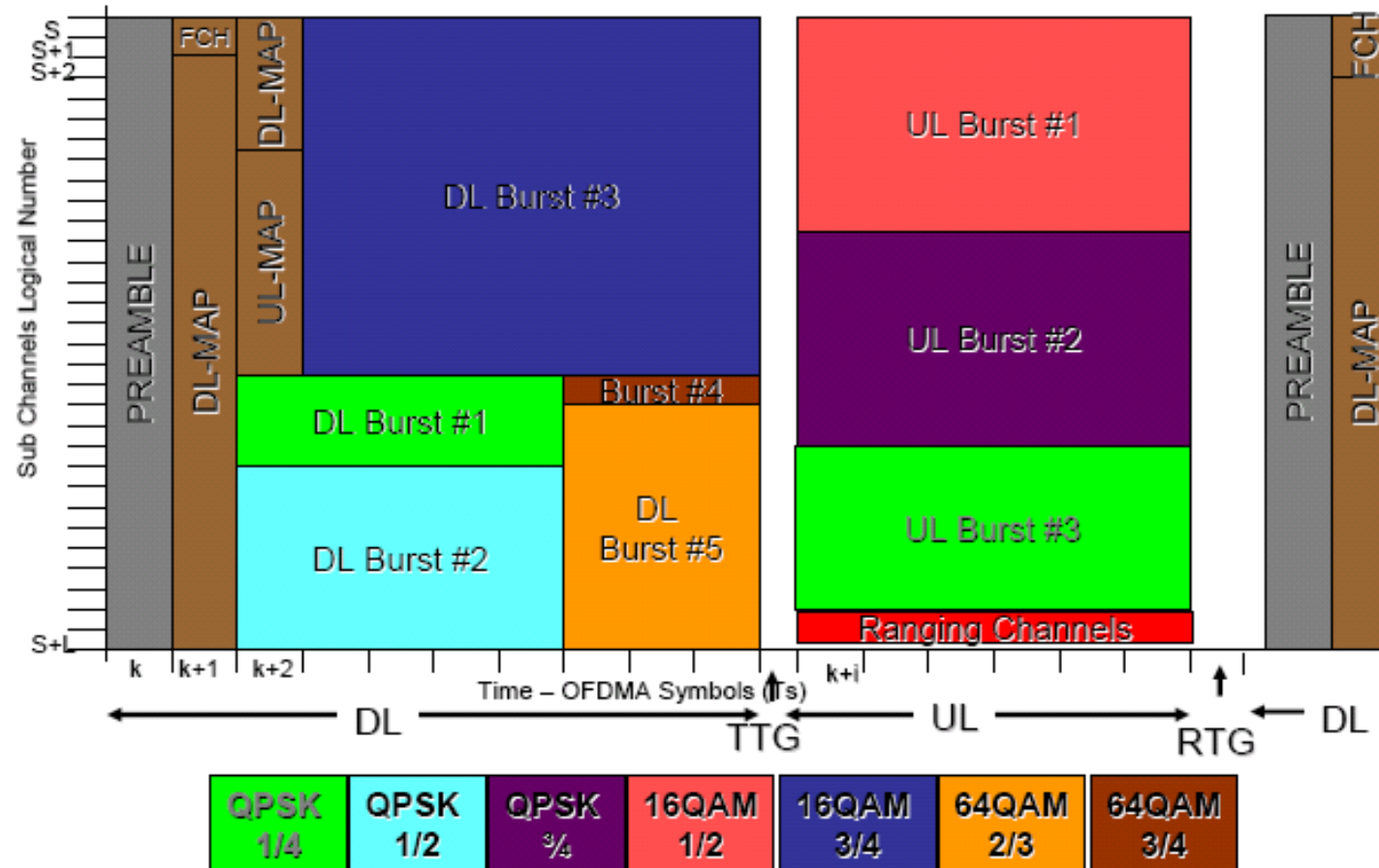
PHY Layer Functions

- Flexible numerology
 - various structures for the subframe (time domain) and subcarriers grouping (frequency-domain))
- Flexible slot format (mixed DL UL)

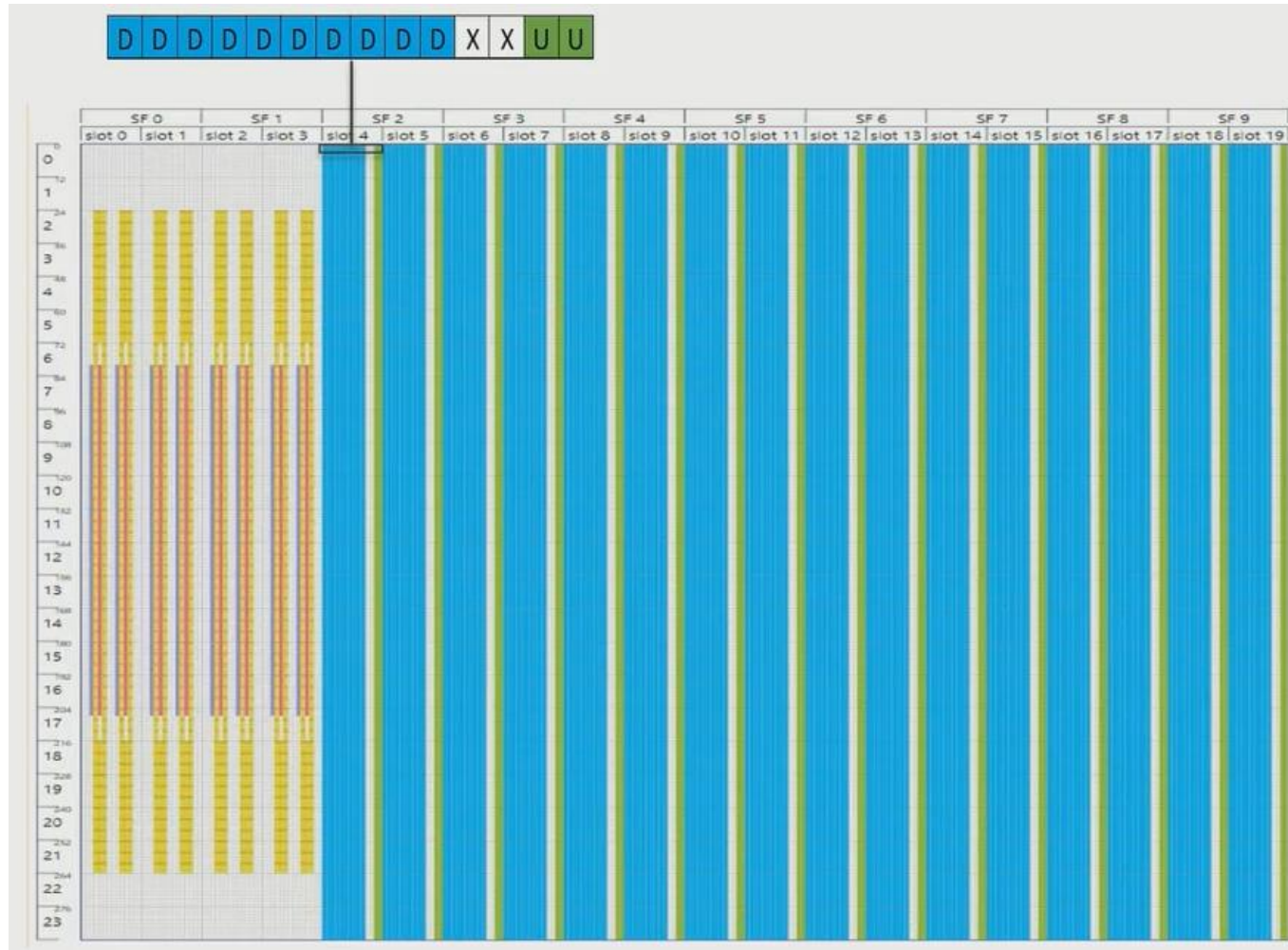


Subcarrier Spacing (μ)	Number of OFDM Symbols per Slot (N_{slot}^{symbol})	Number of Slots per Subframe ($N_{slot}^{subframe,\mu}$)	Number of Slots per Frame ($N_{slot}^{frame,\mu}$)
0 15 kHz	14 1 ms	1 1 slot x 1 ms = 1 ms	10 10 ms
1 30 kHz	14 500 μ s	2 2 slots x 500 μ s = 1 ms	20 10 ms
2 60 kHz (normal CP)	14 250 μ s	4 4 slots x 250 μ s = 1 ms	40 10 ms
2 60 kHz (extended CP)	12 250 μ s	4 4 slots x 250 μ s = 1 ms	40 10 ms
3 120 kHz	14 125 μ s	8 8 slots x 125 μ s = 1 ms	80 10 ms
4 240 kHz	14 62.5 μ s	16 16 slots x 62.5 μ s = 1 ms	160 10 ms
5 480 kHz	14 31.25 μ s	32 32 slots x 31.25 μ s = 1 ms	320 10 ms

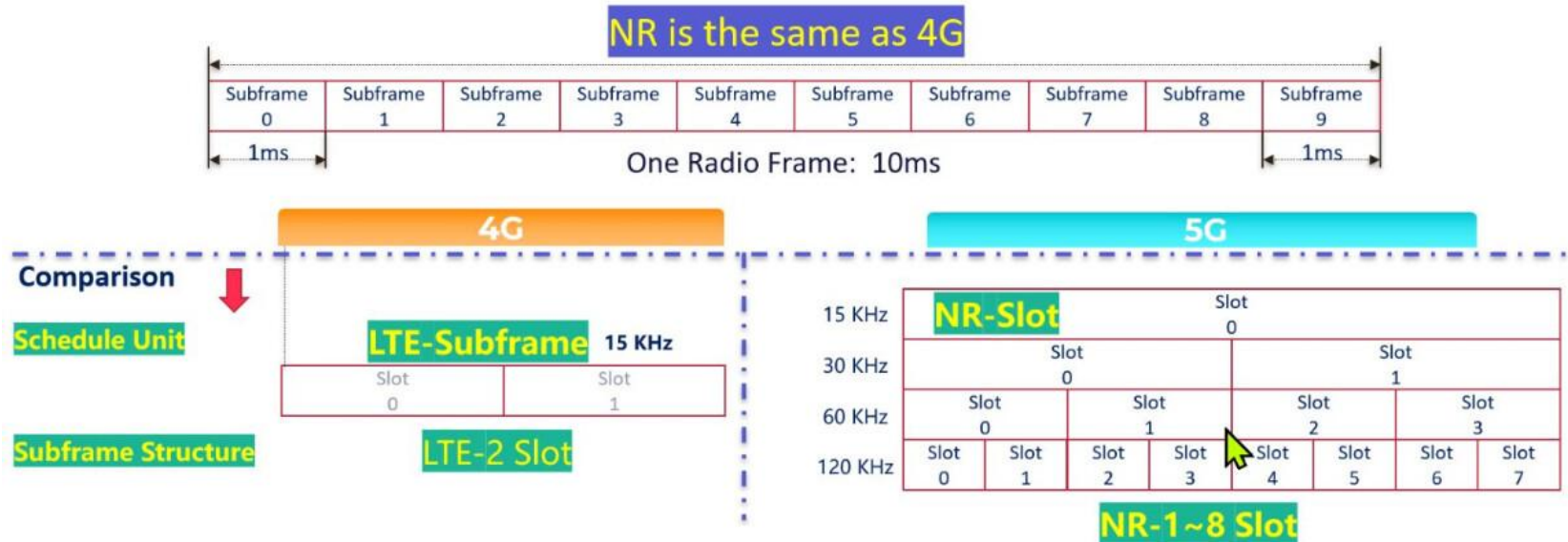
Comparison with 4G



5G New Radio Frame Structure



5G New Radio Frame Structure



5G New Radio Slot Formats

<38.213 v15.7 -Table 11.1.1-1: Slot formats for normal cyclic prefix>
D : Downlink, U : Uplink, F : Flexible

[illegible]

Slot Format Examples

