



Department of Computer Engineering & Informatics



Laboratory for Signal Processing and Communications



Wireless and Mobile Communications

Key Technologies:

Multiple Access Techniques and Multiuser Systems



Τι θα δούμε στο μάθημα



- Εισαγωγή στα συστήματα πολλαπλών χρηστών
- Βασικά συστήματα πολλαπλής πρόσβασης
 - TDMA, FDMA, CDMA, SDMA
- Ποικιλομορφία πολλαπλών χρηστών
- Σύγχρονες τάσεις



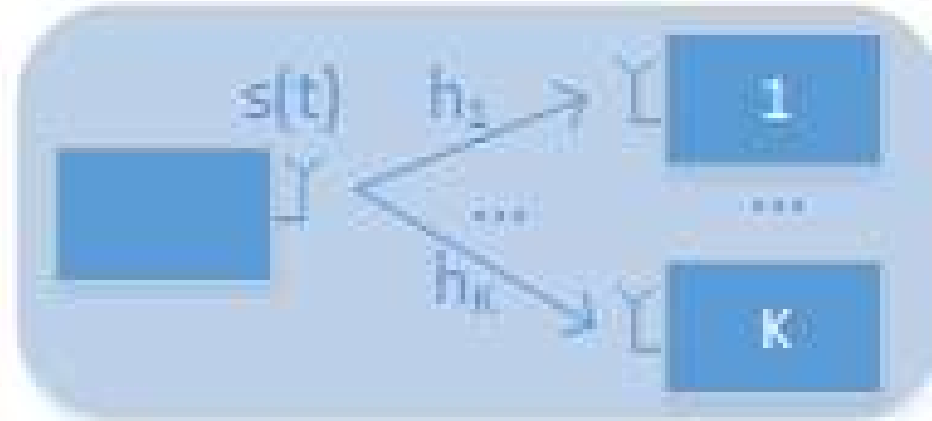
Συστήματα πολλαπλών χρηστών (1/4)



- Σε συστήματα πολλαπλών χρηστών, οι τηλεπικοινωνιακοί πόροι πρέπει να διαμοιραστούν μεταξύ των χρηστών
 - Εύρος ζώνης, χρόνος εκπομπής, ισχύς, κεραίες, κ.λπ.
- Η διαδικασία του διαμοιρασμού πόρων επιτελείται από μηχανισμούς πρόσβασης στο κανάλι.
- Το κανάλι πολλαπλών χρηστών χωρίζεται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση της μετάδοσης.
 - Ονομάζεται downlink όταν η μετάδοση γίνεται από το BS προς τους πολλαπλούς χρήστες.
 - Ονομάζεται uplink (ή multiple access ή reverse) όταν η μετάδοση γίνεται από τους πολλαπλούς χρήστες προς το BS.



Συστήματα πολλαπλών χρηστών (2/4)



- Το κανάλι Downlink μπορεί να είναι τύπου broadcast (ή multicast). Στην περίπτωση αυτή:

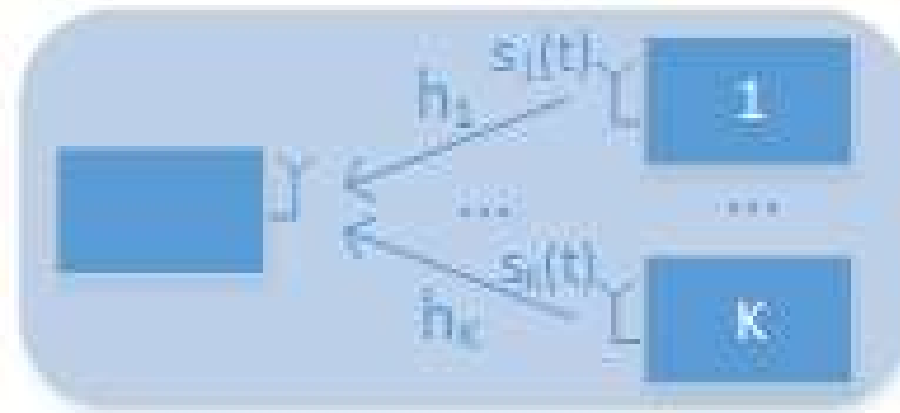
- Το μεταδιδόμενο σήμα από τον μοναδικό πομπό είναι

$$s(t) = \sum_k s_k(t), k = 1, 2, \dots, K.$$

- Δεν υφίστανται θέματα συγχρονισμού μεταξύ των χρηστών.
- Το λαμβανόμενο σήμα στον χρήστη k , τόσο το $s_k(t)$ όσο και τα υπόλοιπα σήματα (παρεμβολή) διέρχονται από το ίδιο κανάλι.



Συστήματα πολλαπλών χρηστών (3/4)

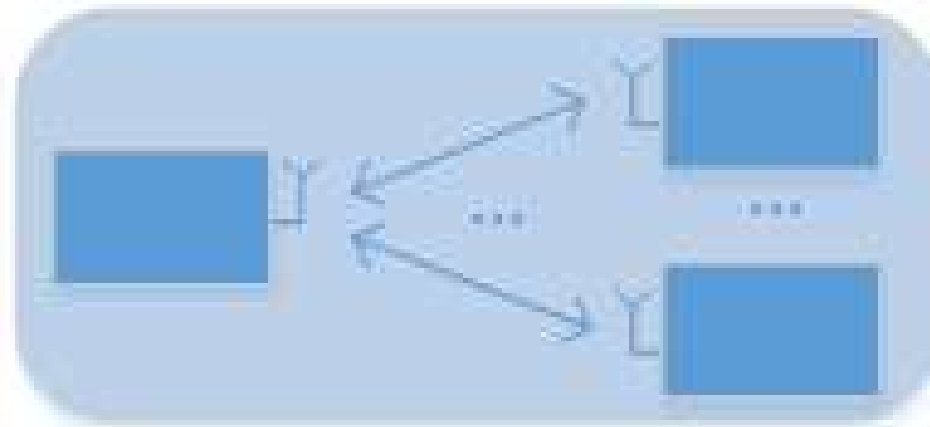


■ Στο κανάλι Uplink

- Ο χρήστης k αποστέλλει το σήμα $s_k(t)$ στον μοναδικό δέκτη.
- Το κάθε σήμα $s_k(t)$ μεταδίδεται υπό τοπικό περιορισμό ισχύος P_k και μέσω διαφορετικού καναλιού h_k .
- Μπορεί να υφίσταται θέμα συγχρονισμού μεταξύ των χρηστών.
- Δορυφορικά και κυψελωτά δίκτυα, τοπικά δίκτυα.



Συστήματα πολλαπλών χρηστών (4/4)



- Στα περισσότερα συστήματα τηλεπικοινωνιών η μετάδοση είναι αμφίδρομη, δηλαδή και προς τις δυο κατευθύνσεις.
- Για τον διαχωρισμό των δυο κατευθύνσεων χρησιμοποιούνται τεχνικές duplexing είτε στον χρόνο είτε στην συχνότητα.
 - Time Division Duplexing (TDD), Frequency Division Duplexing (FDD). Ποιο είναι ένα πλεονέκτημα του TDD όταν έχουμε συχνотικά επιλεκτικά κανάλια;



Μηχανισμοί πρόσβασης στο κανάλι (1/2)



- Οι μηχανισμοί πρόσβασης στο κανάλι διαχωρίζονται σε
 - Μηχανισμούς πολλαπλής πρόσβασης,
 - Μηχανισμούς τυχαίας πρόσβασης.
- Μηχανισμοί πολλαπλής πρόσβασης.
 - Ανατίθενται κανάλια αποκλειστικής χρήσης για κάποιο χρονικό διάστημα.
 - Αποδοτικοί για εφαρμογές με συνεχή μετάδοσης, με χρονικούς περιορισμούς, όπως φωνή και βίντεο.
- Οι μηχανισμοί τυχαίας πρόσβασης είναι αποδοτικοί για μεταδόσεις κατά ριπές (bursty).
 - Δεν εξασφαλίζουν ωστόσο την πρόσβαση.



Μηχανισμοί πρόσβασης στο κανάλι (2/2)



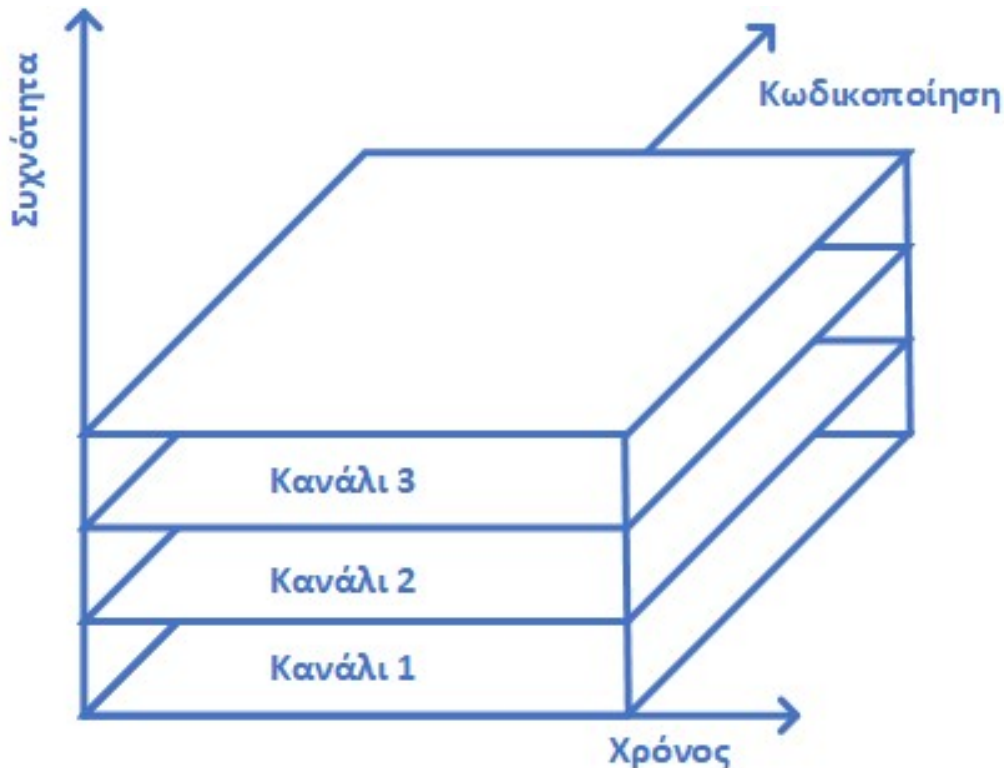
- Οι μηχανισμοί πολλαπλής πρόσβασης διαχωρίζουν το κανάλι στην βάση του χρόνου (TDMA), της συχνότητας (FDMA) ή με βάση κατάλληλη κωδικοποίηση (CDMA).
 - Ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να είναι είτε ορθογώνιος (TDMA, FDMA, CDMA) είτε μη ορθογώνιος.
 - Στην περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών κεραιών, υπεισέρχεται ακόμη μια διάσταση διαχωρισμού στην βάση του χώρου (SDMA).
- Παραδείγματα μηχανισμών τυχαίας πρόσβασης αποτελούν το Aloha (με ή χωρίς χρονικές σχισμές) και το CSMA.



Διαχωρισμός στην συχνότητα



- Frequency Division Multiple Access (FDMA)
 - Το κάθε κανάλι έχει το δικό του εύρος ζώνης.
 - Μεταξύ των καναλιών υπάρχουν περιοχές προστασίας (λόγω των φίλτρων, διακαναλική παρεμβολή).



- Δυνατότητα συχνοτικά επίπεδων καναλιών (γιατί;)
- Τι πρόβλημα υπάρχει π.χ. με την εκτίμηση καναλιού;
- Δύσκολη η ανάθεση πολλαπλών καναλιών σε έναν χρήστη.
- OFDMA, SC-FDMA

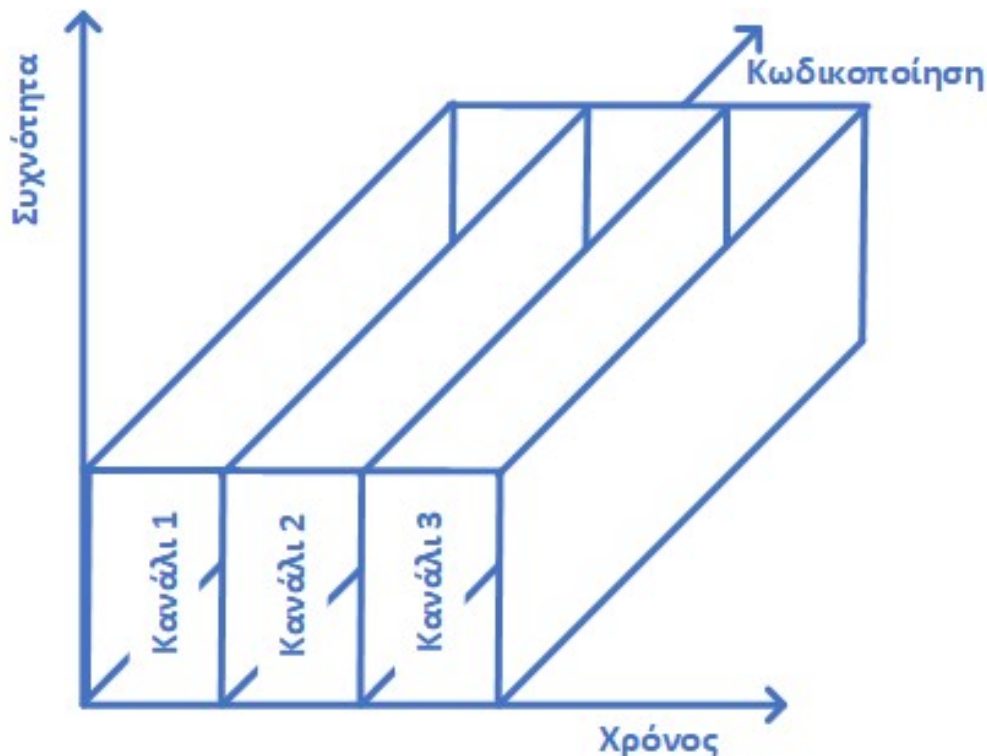


Διαχωρισμός στον χρόνο



■ Time Division Multiple Access (TDMA)

- Τα κανάλια διαφοροποιούνται στον χρόνο (χρήση όλου του φάσματος) και έχουν επίσης διαστήματα προστασίας.
- Τα κανάλια είναι συνήθως συχνοτικά επιλεκτικά.



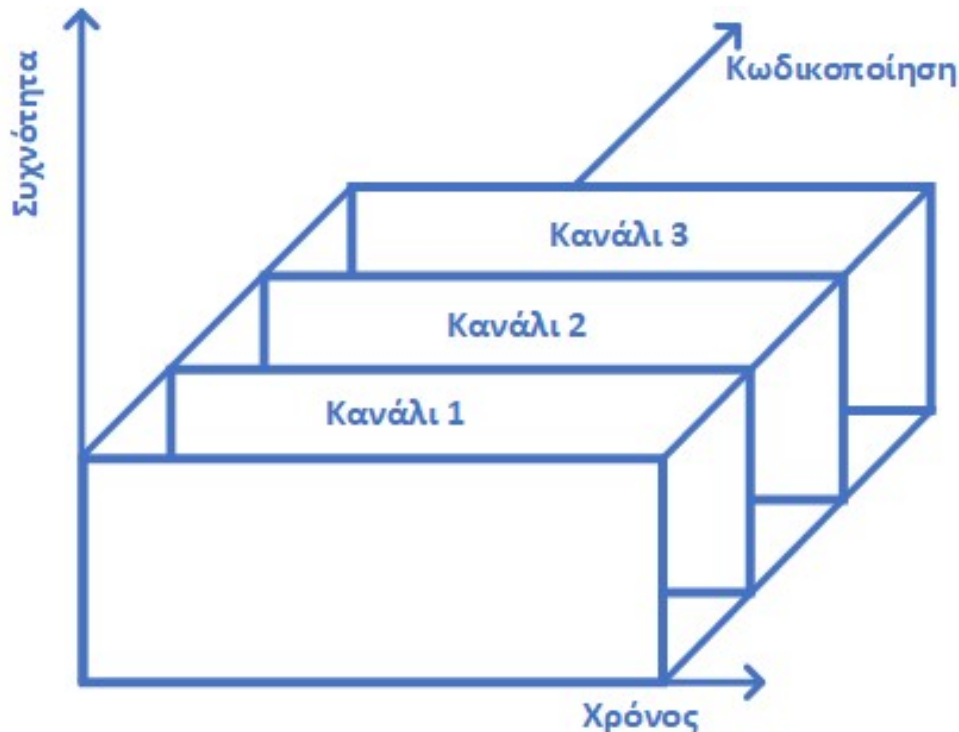
- Λειτουργίες όπως η εκτίμηση καναλιού μπορεί να γίνει στην διάρκεια που ένας χρήστης δεν μεταδίδει.
- Εύκολη η ανάθεση πολλαπλών καναλιών σε έναν χρήστη.
- Στο uplink η πολυδιόδευση και η έλλειψη συγχρονισμού επιδρούν στην ορθογωνιότητα.¹⁰



Διαχωρισμός με βάση την κωδικοποίηση (1/2)



- Code Division Multiple Access (CDMA)
 - Οι χρήστες διαχωρίζονται με βάση ορθογώνιους (ή μη) κωδικούς διάχυσης (spreading codes).



- Στο downlink συνήθως ορθογώνιοι κωδικοί (π.χ., Walsh-Hadamard).
- Στο uplink συνήθως μη ορθογώνιοι κωδικοί λόγω έλλειψης συντονισμού μεταξύ των χρηστών.



Διαχωρισμός με βάση την κωδικοποίηση (2/2)



- Οι μη ορθογώνιοι κωδικοί δεν θέτουν κάποιον αυστηρό περιορισμό στον αριθμό των καναλιών που μπορούν να οριστούν.
 - Ωστόσο, λόγω παρεμβολής, υπάρχει περιορισμός λόγω απόδοσης.
 - Απαιτείται έλεγχος ισχύος (γιατί;).
 - Αυτό το χαρακτηριστικό δεν ισχύει στην περίπτωση του TDMA, FDMA και CDMA με ορθογώνιους κωδικούς.
- Η ανάθεση πολλαπλών καναλιών σε έναν χρήστη είναι απλή υπόθεση.

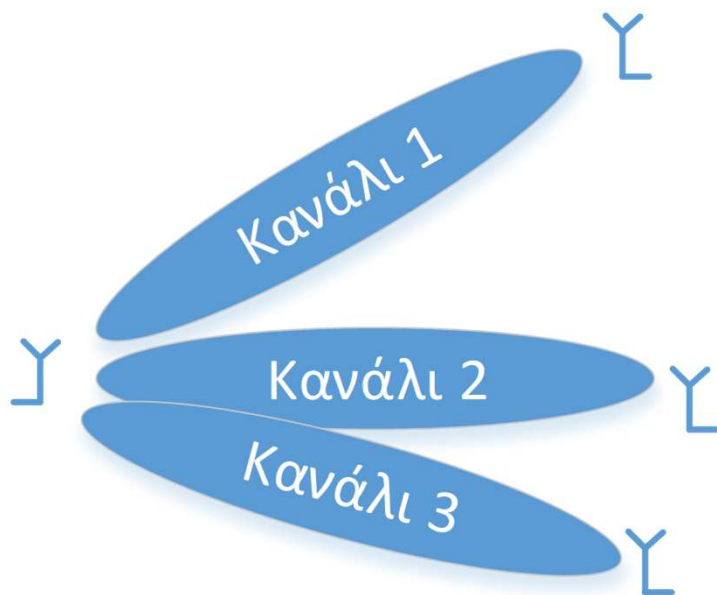


Διαχωρισμός με βάση τον χώρο



■ Space Division Multiple Access (SDMA)

- Τα κανάλια διαφοροποιούνται με βάση την γωνία μετάδοσης.
- Υλοποιείται από κατευθυντικές κεραίες (π.χ., διατάξεις κεραιών).



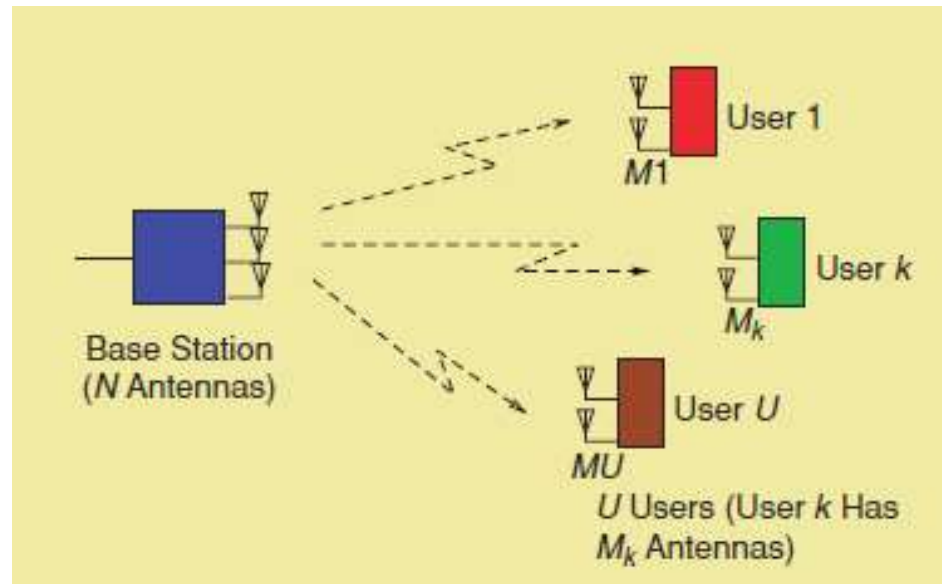
- Η ορθογωνιότητα των καναλιών εξαρτάται από το μέγεθος της διάταξης των κεραιών.

- Στην πράξη, χρησιμοποιούνται «τμηματικές» (sectorized) κεραίες.

- Σε κάθε τμήμα μπορεί επιπλέον να εφαρμοστεί π.χ., TDMA ή FDMA



Πολλαπλοί χρήστες και παρεμβολή (1/3)



- Έστω ένας σταθμός βάσης με N κεραιές και U χρήστες όπου ο k -στος χρήστης έχει M_k κεραιές.
- Ο σταθμός βάσης μπορεί να επικοινωνήσει ταυτόχρονα με όλους τους χρήστες αποστέλλοντας, για παράδειγμα, το σήμα

$$\mathbf{s} = \sum_k \mathbf{s}_k$$



Πολλαπλοί χρήστες και παρεμβολή (2/3)



- Το λαμβανόμενο σήμα στο k -στο χρήστη δίνεται ως:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{s} + \mathbf{n}_k$$

- Δηλαδή θεωρείται ένα μοντέλο συχνοτικά επίπεδης εξασθένησης.
- Για την αποκωδικοποίηση της πληροφορίας που περιέχεται στο \mathbf{s}_k από τον χρήστη k , απαιτείται η κατάλληλη προκωδικοποίηση των εν λόγω δεδομένων από τον σταθμό βάσης.

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{W}_k \mathbf{x}_k$$

- Όπου ο πίνακας \mathbf{W}_k είναι «ψηλός» πίνακας.
- Πως μπορεί ο σταθμός βάσης να καθορίσει τους πίνακες προκωδικοποίησης ώστε να υποβοηθήσει την ανίχνευση του \mathbf{x}_k στον χρήστη k ;



Πολλαπλοί χρήστες και παρεμβολή (3/3)



■ Έστω $U = 3$.

■ Τότε τα λαμβανόμενα σήματα για κάθε χρήστη είναι:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{W}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_1 \mathbf{W}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{H}_1 \mathbf{W}_3 \mathbf{x}_3 + \mathbf{n}_1$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{H}_2 \mathbf{W}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_2 \mathbf{W}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{H}_2 \mathbf{W}_3 \mathbf{x}_3 + \mathbf{n}_2$$

$$\mathbf{y}_3 = \mathbf{H}_3 \mathbf{W}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_3 \mathbf{W}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{H}_3 \mathbf{W}_3 \mathbf{x}_3 + \mathbf{n}_3$$

■ Επικεντρώνοντας στον χρήστη 1, το \mathbf{W}_j τι ρόλο καλούνται να παίξουν και τι πρέπει να ισχύει;



- Η ποικιλομορφία πολλαπλών χρηστών βασίζεται στην εξής παρατήρηση:
 - Τα κανάλια μεταξύ των χρηστών είναι ανεξάρτητα.
 - Τη χρονική στιγμή t , ένα σύνολο χρηστών S_t μπορεί να οριστεί με βάση την ποιότητα της μετάδοσης.
 - Αν το σύστημα αναθέτει τηλεπικοινωνιακούς πόρους την στιγμή t μόνο στους χρήστες του S_t , τότε σε κάθε χρονική στιγμή, γίνεται βέλτιστη χρήση αυτών των πόρων.
- **Καιροσκοπική ανάθεση πόρων**
 - Ανάθεση πόρων μόνο στον χρήστη με τις καλύτερες συνθήκες: Κέρδος καναλιού, περιορισμός ισχύος.
 - Βελτίωση της ρυθμαπόδοσης του συστήματος.



- (... συνέχεια) Καιροσκοπική ανάθεση (opportunistic scheduling) πόρων
 - Βελτιώνεται επίσης ο ρυθμός σφαλμάτων.
 - Έστω $\gamma_k(t)$ είναι το SNR του χρήστη k την χρονική στιγμή t .
 - Καιροσκοπικά, επιλέγεται ο χρήστης με το μεγαλύτερο SNR. Οπότε, το SNR του συστήματος την χρονική στιγμή t είναι: $\gamma(t) = \max_k \gamma_k(t)$
 - Το $\gamma(t)$ ορίζει τον ρυθμό σφαλμάτων σε επίπεδο συστήματος.
 - Αναθέτοντας πόρους μόνο στους χρήστες με τις καλύτερες συνθήκες, τι προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν;



- Δυο βασικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν είναι η δικαιοσύνη (fairness) και η καθυστέρηση (latency) στην πρόσβαση.
 - Το πρώτο αναφέρεται στην περίπτωση που κάποιος χρήστης δεν έχει καλές συνθήκες μετάδοσης και έτσι μπορεί να μην εξυπηρετηθεί.
 - Το δεύτερο αναφέρεται στην περίπτωση που ένας χρήστης με καλές συνθήκες μετάδοσης, που δεν μεταβάλλονται γρήγορα, μπορεί να «κρατήσει» το κανάλι για πολύ χρόνο, εισάγοντας καθυστέρηση ως προς τους υπόλοιπους χρήστες.
- Για την αντιμετώπισή τους χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αλγόριθμοι, π.χ., proportional fair scheduling.



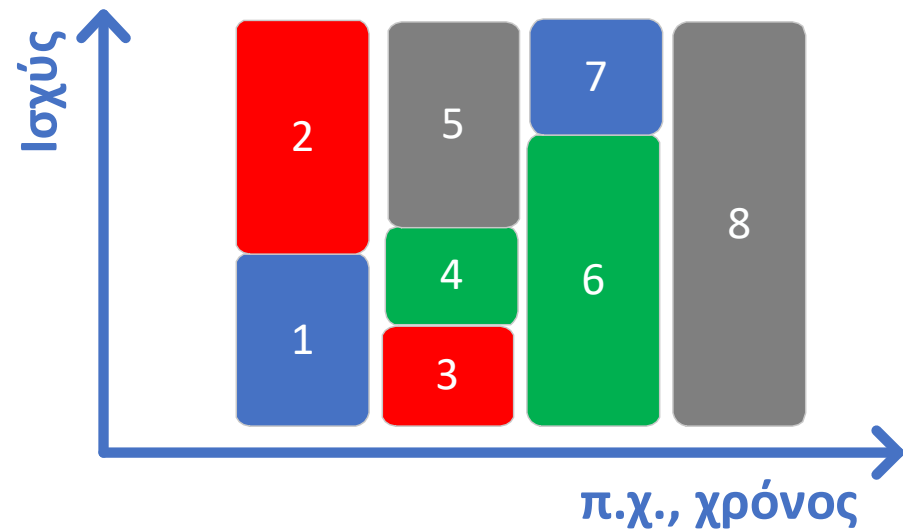
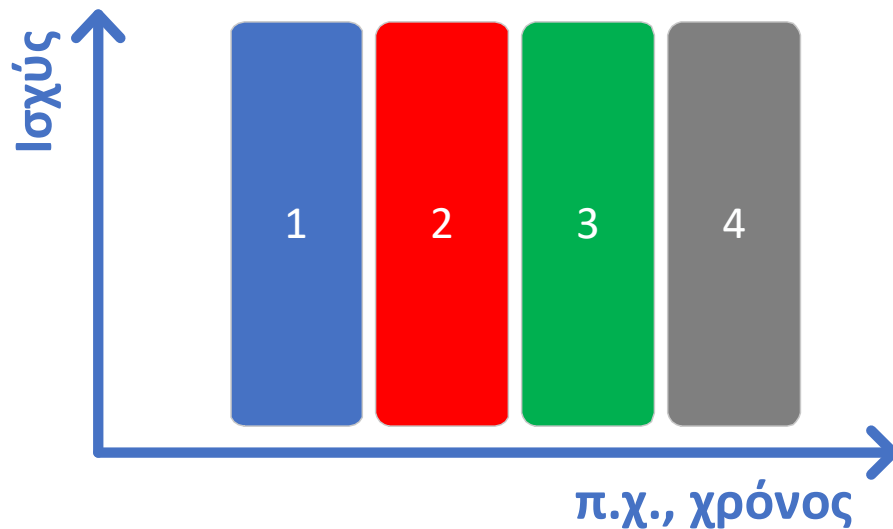
- Στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, οι υποστηριζόμενες υπηρεσίες έχουν υψηλές απαιτήσεις σε επίπεδο ρυθμού μετάδοσης, αριθμού υποστηριζόμενων χρηστών, αποδεχόμενης καθυστέρησης, κ.λπ.
- Οι μηχανισμοί πρόσβασης που αναφέραμε ως τώρα δημιουργούν ορθογώνια κανάλια ανά χρήστη.
 - Υπάρχει επίπτωση στην φασματική αποδοτικότητα.
 - Εισάγονται καθυστερήσεις, κ.λπ.
- Οι μη ορθογώνιοι μηχανισμοί πρόσβασης (Non Orthogonal Multiple Access – NOMA) προσπαθούν να εκμεταλλευτούν πιο αποδοτικά τους διαθέσιμους πόρους.
 - Επιτρέπουν «ελεγχόμενες» παρεμβολές μεταξύ των χρηστών.



Μη ορθογώνιοι μηχανισμοί πρόσβασης (2/3)



- Μια βασική κατηγορία τεχνικών NOMA εισάγει μια νέα διάσταση διαμοιρασμού, αυτή της ισχύος.
 - Άλλες κατηγορίες χρησιμοποιούν π.χ. κατάλληλη κωδικοποίηση.
- Η βασική ιδέα παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.





Μη ορθογώνιοι μηχανισμοί πρόσβασης (3/3)



- Χρησιμοποιούνται τεχνικές κωδικοποίησης υπέρθεσης (superposition coding) για την ταυτόχρονη μετάδοση μέσω του ίδιου καναλιού.
- Χρησιμοποιούνται τεχνικές ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών, π.χ., διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών.
- Παράδειγμα: έστω $h_1 < h_2$

