



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

# Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών

Τεχνολογίες και Τεχνικές Ασύρματων Αναμεταδοτών (Relays)

Δημοσθένης Βουγιούκας (dnougiou@aegean.gr)

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών & Επικοινωνιακών Συστημάτων



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- Ερευνητικές Προκλήσεις
- Στοιχεία αλγορίθμων
- Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση
- Σχήματα Ευκαιριακής Αναμετάδοσης με Καταχωρητές
- Ενδεικτικές Εφαρμογές
- Ευκαιριακή Αναμετάδοση με Περιορισμούς Εμπιστευτικότητας
- Συμπεράσματα
- Μελλοντικές Κατευθύνσεις



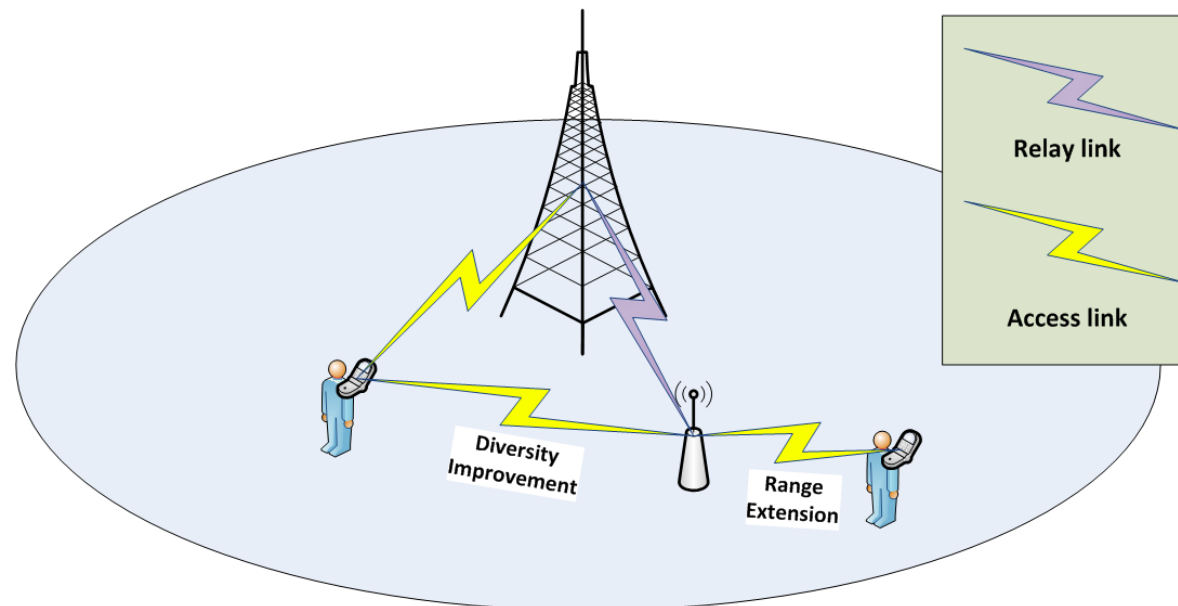
# Εισαγωγή

- Η φασματική αποδοτικότητα είναι ένας βασικός στόχος των σύγχρονων ασύρματων δικτύων:
  - Η βέλτιστη εκμετάλλευση του φάσματος συχνοτήτων οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητας
  - Η συχνή επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος εισάγει φαινόμενα παρεμβολών
- Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για την βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας:
  - Εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών των συνεργατικών αναμεταδοτών (relays)
  - Αξιοποίηση της ετερογένειας που παρατηρείται στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα



# Εισαγωγή (Συνεργατική Αναμετάδοση)

- Ο αναμεταδότης είναι ένας δικτυακός κόμβος ο οποίος προσφέρει:
  - Επέκταση της κάλυψης
  - Βελτιωμένα χαρακτηριστικά ζεύξης
  - Οι συνεργατικοί αναμεταδότες έχουν συμπεριληφθεί στα πρωτόκολλα των δικτύων 4G (LTE-Advanced, WiMAX 16.j)





# Εισαγωγή (Συνεργατική Αναμετάδοση)

- Οι συνεργατικοί αναμεταδότες – Cooperative Relays (CR) εισάγουν τρία κέρδη:
  - Διαφορικότητα στη μετάδοση
  - Μειωμένες απώλειες διάδοσης
  - Αποφυγή φαινομένων σκίασης
- Οι περιοχές εφαρμογής των συνεργατικών αναμεταδοτών ποικίλουν:
  - Δίκτυα Αισθητήρων – Wireless Sensor Networks (WSN)
  - Δίκτυα μεταξύ Τερματικών Συσκευών – Device-to-Device (D2D) Networks
  - Δίκτυα μεταξύ Μηχανών – Machine-to-Machine (M2M) Networks
  - Έξυπνα ενεργειακά δίκτυα – Smart Energy Grid
  - Κυψελωτά Δίκτυα – Cellular Networks



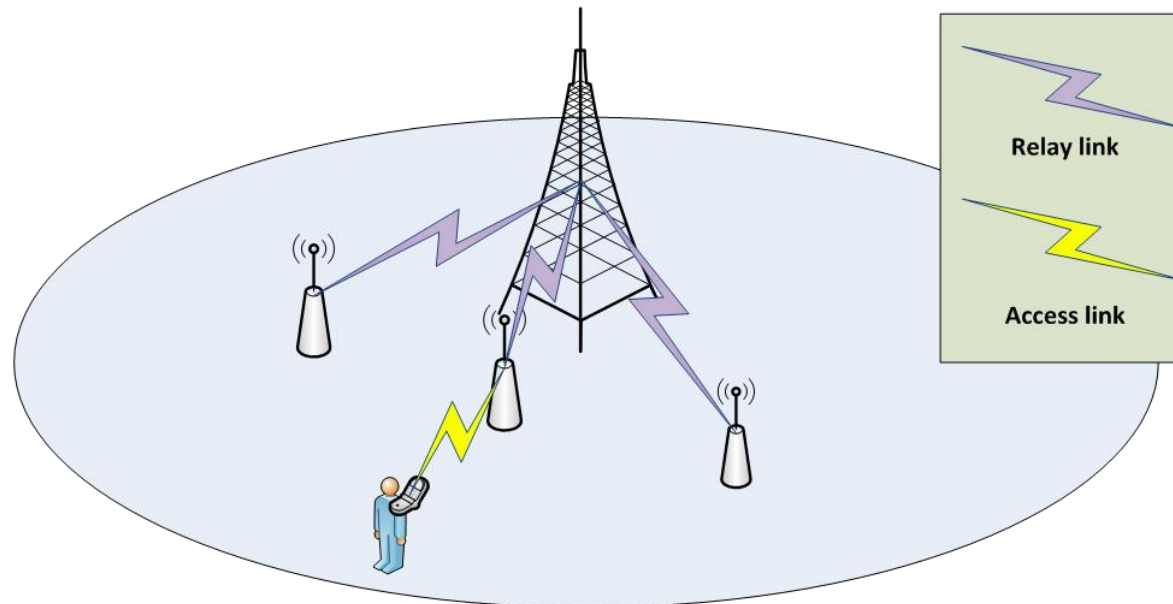
# Εισαγωγή (Συνεργατική Αναμετάδοση)

- Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες αναμεταδοτών:
  - Ενίσχυσης και Προώθησης – Amplify and Forward (AF)
  - Αποκωδικοποίησης και Προώθησης – Decode and Forward (DF)
  - Ημιδιπλεξίας – Half-Duplex (HD)
  - Πλήρους Διπλεξίας – Full-Duplex (FD)
- Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές συνεργατικής αναμετάδοσης:
  - Με Πολλαπλές Μεταδόσεις
  - Ευκαιριακή Αναμετάδοση – Opportunistic Relaying (OR)
  - Διαδοχική Αναμετάδοση – Successive Relaying (SR)
  - Αναμετάδοση Πλήρους Διπλεξίας – Full-Duplex (FD) Relaying
  - Αναμετάδοση με Καταχώρηση – Buffer-Aided (BA) Relaying
- Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι:
  - Συνδυάζουν διάφορες τεχνικές αναμετάδοσης
  - Ικανοποιούν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών



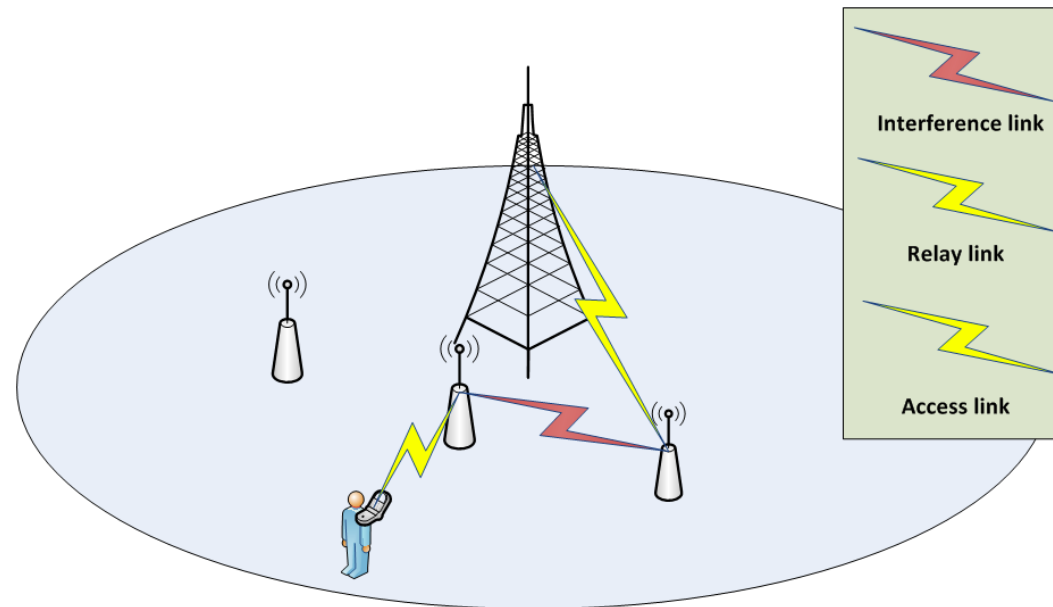
# Εισαγωγή (Ευκαιριακή Αναμετάδοση)

- Η ευκαιριακή αναμετάδοση (opportunistic relaying) χρησιμοποιεί μόνο έναν αναμεταδότη έπειτα από μία διαδικασία επιλογής
  - *Πλεονέκτημα*: Διατήρηση κέρδους διαφορικότητας με χρήση μόνο ενός επιπρόσθετου καναλιού
  - *Μειονέκτημα*: Υψηλές απαιτήσεις εκτίμησης καναλιών και επεξεργασίας κατά την επιλογή



# Εισαγωγή (Διαδοχική Αναμετάδοση)

- Η διαδοχική αναμετάδοση (successive relaying) επιτρέπει δύο ταυτόχρονες μεταδόσεις από τον πομπό και τον αναμεταδότη
  - *Πλεονέκτημα:* Ανάκτηση του ρυθμού μετάδοσης των αναμεταδοτών ημιδιπλεξίας
  - *Μειονέκτημα:* Εμφάνιση παρεμβολής μεταξύ αναμεταδοτών



# Εισαγωγή (Εξομάλυνση Παρεμβολών)

- Η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων εισάγει παρεμβολές:
  - Στην τεχνική SR, μεταξύ αναμεταδοτών – Inter-Relay Interference (IRI)
  - Στην τεχνική FD, μεταξύ της κεραίας λήψης και της κεραίας μετάδοσης – Loop Interference (LI) του αναμεταδότη
- Οι τεχνικές εξομάλυνσης βασίζονται σε:
  - Προσαρμογή της ισχύος εκπομπής – Power Adaptation (PA)
  - Ακύρωση των παρεμβολών – Interference Cancellation (IC)
  - Αποφυγή των παρεμβολών με επιλογή αναμεταδότη – Interference Avoidance (IA)

# Εισαγωγή (Ετερογενή Δίκτυα)

- Η ετερογένεια των σύγχρονων ασύρματων δικτύων εντοπίζεται στα εξής:
  - Χρήση διαφορετικού φάσματος από κάθε πρωτόκολλο (2G/3G/4G, Wi-Fi κλπ)
  - Σταθμοί βάσης διαφόρων τύπων (Macro, micro, pico, femto-cells, relays)
  - Αναμεταδότες διαφόρων τύπων (σταθερής υποδομής, κινητοί, τερματικές συσκευές, αισθητήρες)
  - Συνέργεια δικτύων διαφόρων τύπων (επίγεια, στρατοσφαιρικά, δορυφορικά)
  - Εφαρμογές με διαφορετικά χαρακτηριστικά (Cellular, D2D, M2M, WSNs, με ή χωρίς εμπιστευτικότητα)

# Ερευνητικές Προκλήσεις

- Οι προκλήσεις της ερευνητικής περιοχής συνοψίζονται στα παρακάτω:
  - Ενσωμάτωση της συνεργατικής αναμετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα
  - Βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας
  - Αντιμετώπιση των αυξημένων επιπέδων παρεμβολών
  - Εκμετάλλευση της ετερογένειας για τη βελτίωση της δικτυακής απόδοσης
  - Προώθηση των Πράσινων Επικοινωνιών – Green Communications



# Στοιχεία Αλγορίθμων

- Οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται συνδυάζουν τα παρακάτω στοιχεία:
  - Παρέχονται φασματικά αποδοτικοί αλγόριθμοι αναμετάδοσης με μεγάλο εύρος εφαρμογών
  - Οι αλγόριθμοι συνδυάζουν OR, SR και FD
  - Αξιολογείται η επίδοση για διάφορα κριτήρια:
    - *Πιθανότητα διακοπής*
    - *Ρυθμός μετάδοσης*
    - *Μείωση ισχύος εκπομπής*
    - *Μείωση επίβαρων συντονισμού*
    - *Μέση καθυστέρηση*





# Στοιχεία Αλγορίθμων

- Παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές εξομάλυνσης IRI και LI:
  - Προσαρμογή των επιπέδων ισχύος
  - Ακύρωση των παρεμβολών
  - Αποφυγή των παρεμβολών
- Προωθείται η συνέργεια της ετερογενούς δικτύωσης:
  - Χρήση διαφορετικών συχνοτήτων
  - Μελέτη επίγειων-στρατοσφαιρικών τοπολογιών
  - Εξασφάλιση της εμπιστευτικότητας στο φυσικό επίπεδο
- Υποστηρίζεται η περιοχή των Πράσινων Επικοινωνιών



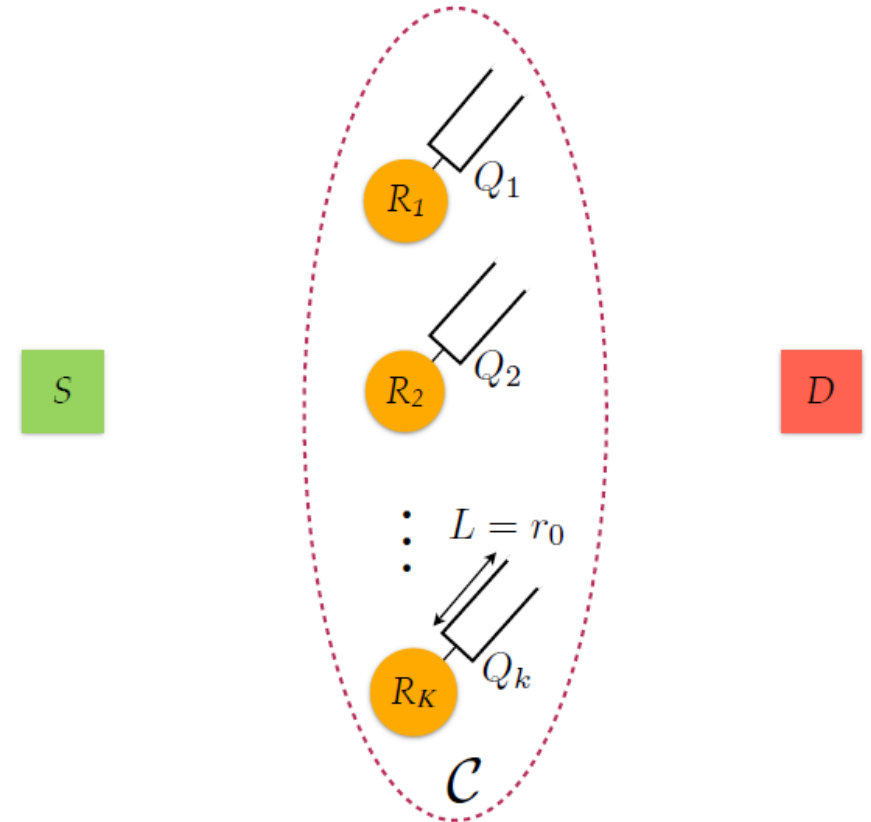
# Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση

- Οι αναπτυσσόμενοι αλγόριθμοι συνδυάζουν τις τεχνικές SR και OR:
  - Συγκεκριμένα, η τεχνική SR οδηγεί σε:
    - *Αυξημένη φασματική αποδοτικότητα μέσω των ταυτόχρονων μεταδόσεων σε διαφορετικές ζεύξεις*
    - *IRI από τον αναμεταδότη που μεταδίδει στον προορισμό, προς τον αναμεταδότη που λαμβάνει από την πηγή*
  - Η τεχνική OR οδηγεί σε:
    - *Αύξηση του κέρδους διαφορικότητας μέσω των ανεξάρτητων διαδρομών διάδοσης του σήματος*
    - *Αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας χάρις στην αποφυγή των πολλαπλών μεταδόσεων σε κάθε ζεύξη*
- Η IRI εξομαλύνεται μέσω τεχνικών:
  - *PA, IC και IA*
  - *Εξετάζεται η δυνατότητα μετάδοσης σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων (εκμηδενισμός IRI)*
- Ο συνδυασμός SR και OR οδηγεί στην τεχνική Διαδοχικής Ευκαιριακής Αναμετάδοσης – Successive Opportunistic Relaying (SOR)



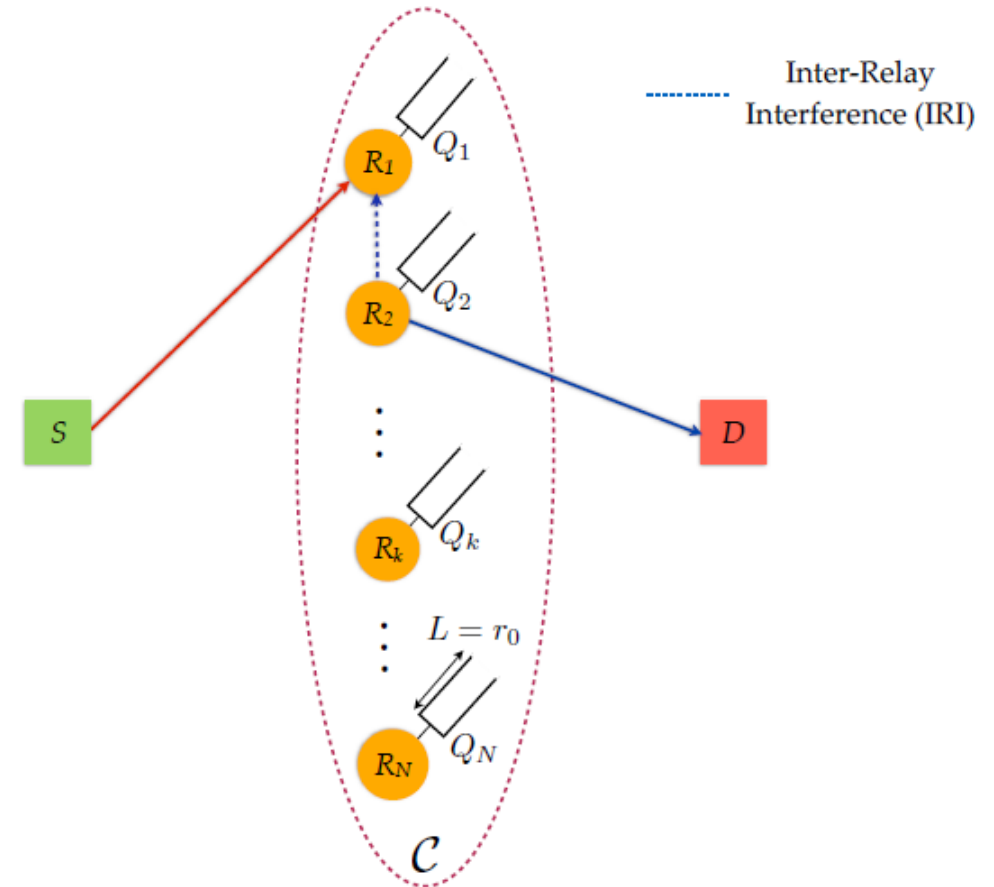
# Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση (Τοπολογία)

- Εξετάζεται μία τοπολογία όπου:
  - Μία πηγή (S) επικοινωνεί με έναν προορισμό (D)
  - Η επικοινωνία είναι εφικτή μόνο μέσω αναμεταδοτών
  - Όλες οι ζεύξεις υπόκεινται σε:
    - Διαλείψεις τύπου *Rayleigh* (ίδιες στατιστικές παραμέτρους – *i.i.d.*)
    - Προσθετικό Λευκό Γκαουσιανό Θόρυβο
  - Η πηγή έχει συνεχώς δεδομένα προς μετάδοση
  - Οι μεταδόσεις χωρίζονται σε χρονοθυρίδες
  - Υπάρχει γνώση των πληροφοριών καναλιού – Channel State Information (CSI)



# Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση (Με IRI)

- Γίνεται χρήση της ίδιας ζώνης συχνοτήτων στις δύο ζεύξεις:
  - Εισαγωγή IRI
  - Αυξημένη φασματική αποδοτικότητα αν αντιμετωπιστεί η IRI
- Σχηματίζονται διάφορα πιθανά ζεύγη αναμεταδοτών σε κάθε χρονοθυρίδα
- Επιλέγεται το ζεύγος το οποίο:
  - Ικανοποιεί τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης
  - Απαιτεί τη μικρότερη συνολική ισχύ μετάδοσης



# Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση (Με IRI)

- Ένα πακέτο μεταδίδεται επιτυχώς στη ζεύξη  $R_t-D$  όταν:

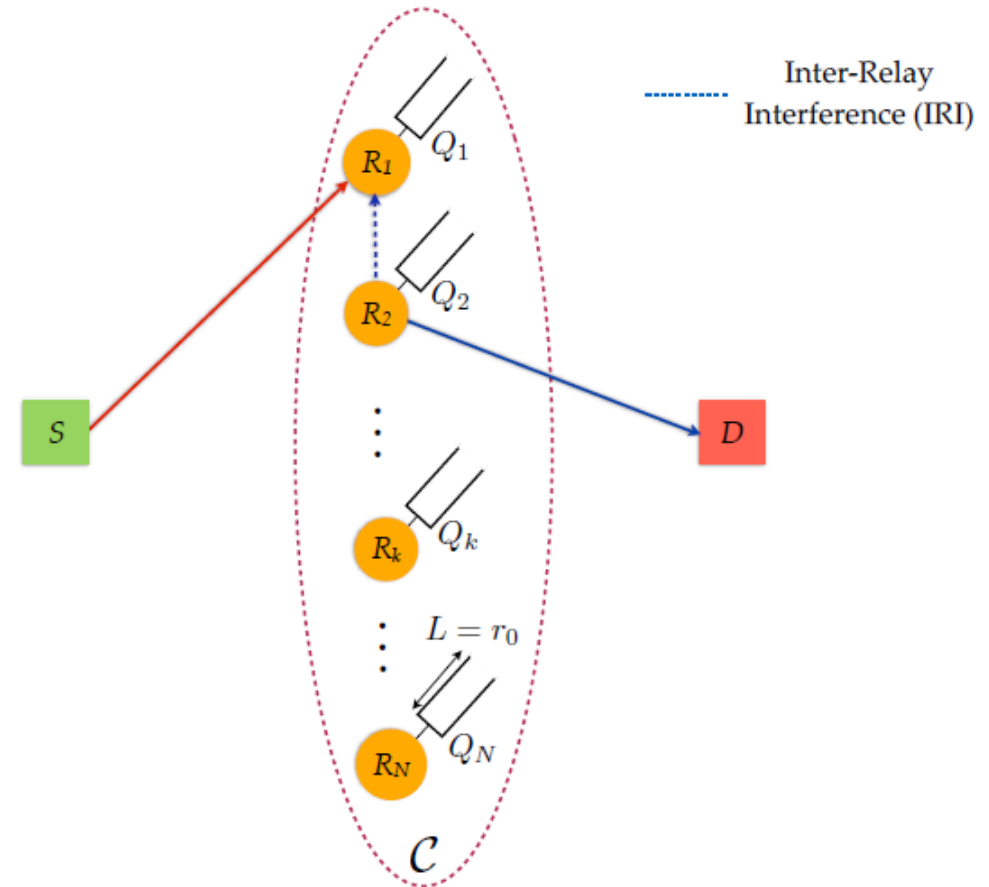
$$\frac{g_{R_t D} P_{R_t}}{n_D} \geq \gamma_0$$

- Αντίστοιχα, στη ζεύξη  $S-R_r$ :

$$\frac{g_{S R_r} P_S}{g_{R_t R_r} P_{R_t} I(R_t R_r) + n_{R_r}} \geq \gamma_0$$

- Όπου ο δείκτης IC ορίζεται ως:

$$I(R_t R_r) = \begin{cases} 0, & \text{if } \frac{g_{R_t} g_{R_r} P_{R_t}}{g_{S R_r} P_S + n_{R_r}} \geq \gamma_0 \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



# Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση (Με IRI)

- Εφόσον έχει επιτευχθεί IC τα ζεύγη ισχύος είναι:

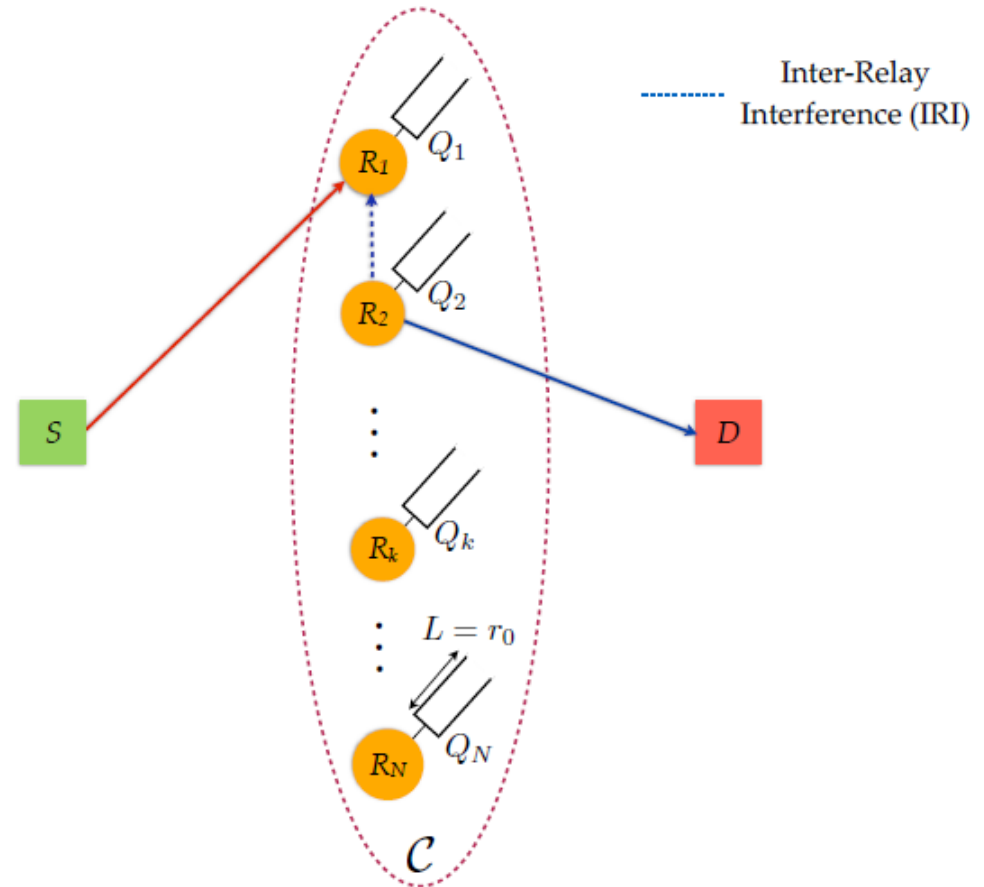
$$P_S^* = \frac{\gamma_0 n_{R_r}}{g_{SR_r}}, \quad P_{R_t}^* = \max \left\{ \frac{\gamma_0 n_D}{g_{R_t D}}, \frac{n_{R_r} \gamma_0 (\gamma_0 + 1)}{g_{R_t R_r}} \right\}$$

- Σε αντίθετη περίπτωση:

$$P_S^\dagger = \gamma_0 \left( \frac{g_{R_t} g_{R_r}}{g_{SR_r}} \frac{\gamma_0 n_D}{g_{R_t D}} + \frac{n_{R_r}}{g_{SR_r}} \right), \quad P_{R_t}^\dagger = \frac{\gamma_0 n_D}{g_{R_t D}}$$

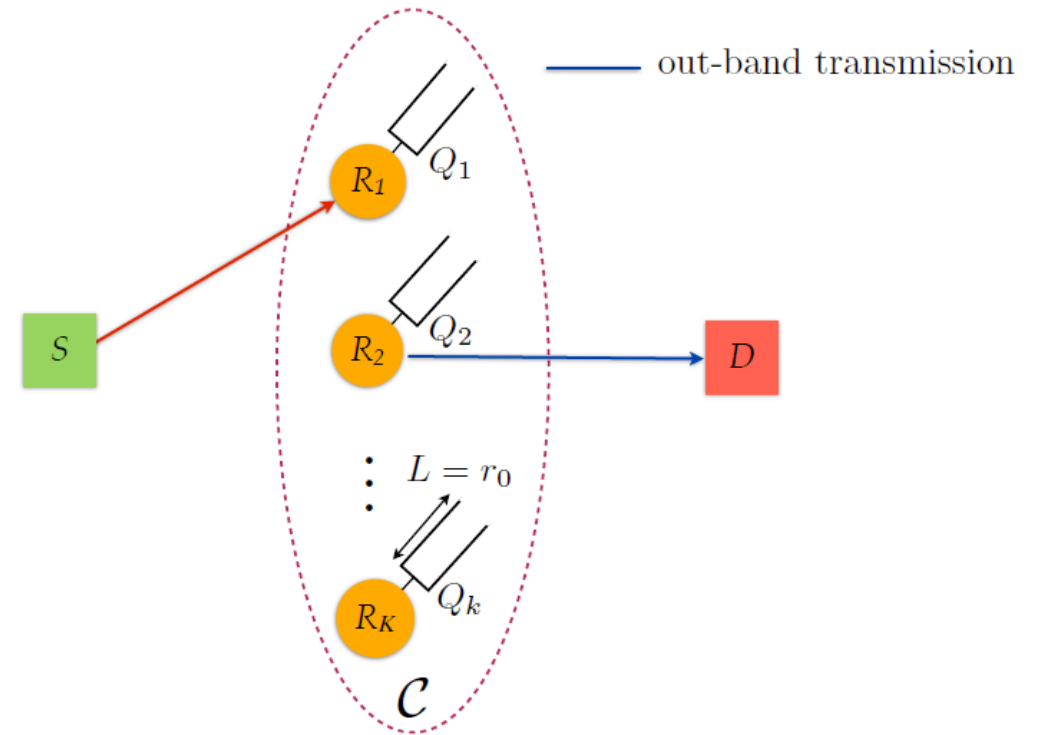
- Τελικά ο αλγόριθμος επιλογής του ζεύγους  $(R_r, R_t)$  διαμορφώνεται ως:

$$\min \{ P_S^* + P_{R_t}^*, P_S^\dagger + P_{R_t}^\dagger \}$$



# Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση (Χωρίς IRI)

- Γίνεται χρήση διαφορετικής ζώνης συχνοτήτων σε κάθε μία ζεύξη:
  - Εκμηδενισμός IRI
  - Μειωμένη φασματική αποδοτικότητα εξαιτίας της δεύτερης ζώνης συχνοτήτων
  - Σχηματίζονται διάφορα πιθανά ζεύγη αναμεταδοτών σε κάθε χρονοθυρίδα
  - Επιλέγεται το ζεύγος το οποίο:
    - Ικανοποιεί τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης
    - Απαιτεί τη μικρότερη συνολική ισχύ μετάδοσης



# Διαδοχική Ευκαιριακή Αναμετάδοση (Χωρίς IRI)

- Ένα πακέτο μεταδίδεται επιτυχώς στη ζεύξη  $S-R_r$  όταν:

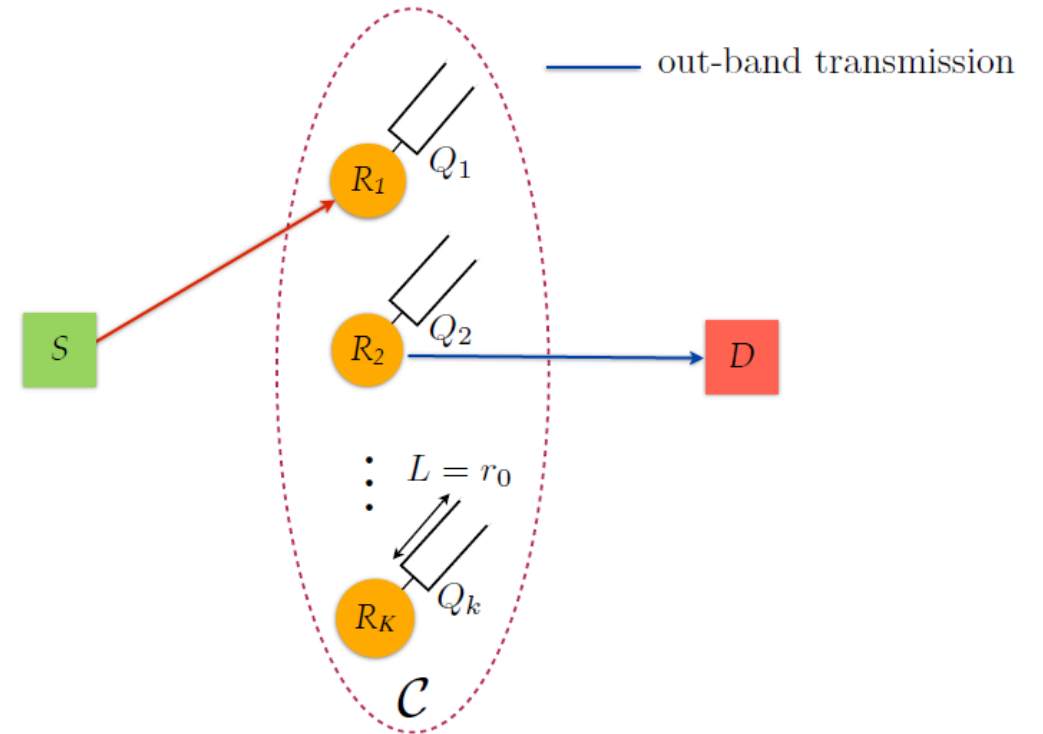
$$\frac{g_{R_t D} P_{R_t}}{n_D} \geq \gamma_0$$

- Αντίστοιχα, στη ζεύξη  $R_t-D$ :

$$\frac{g_{S R_r} P_S}{n_{R_r}} \geq \gamma_0$$

- Τελικά ο αλγόριθμος επιλογής του ζεύγους  $(R_r, R_t)$  διαμορφώνεται ως:

$$\min \{ P_S + P_{R_t} \} = \min \left\{ \frac{\gamma_0 n_{R_r}}{g_{S R_r}} + \frac{\gamma_0 n_D}{g_{R_t D}} \right\}$$





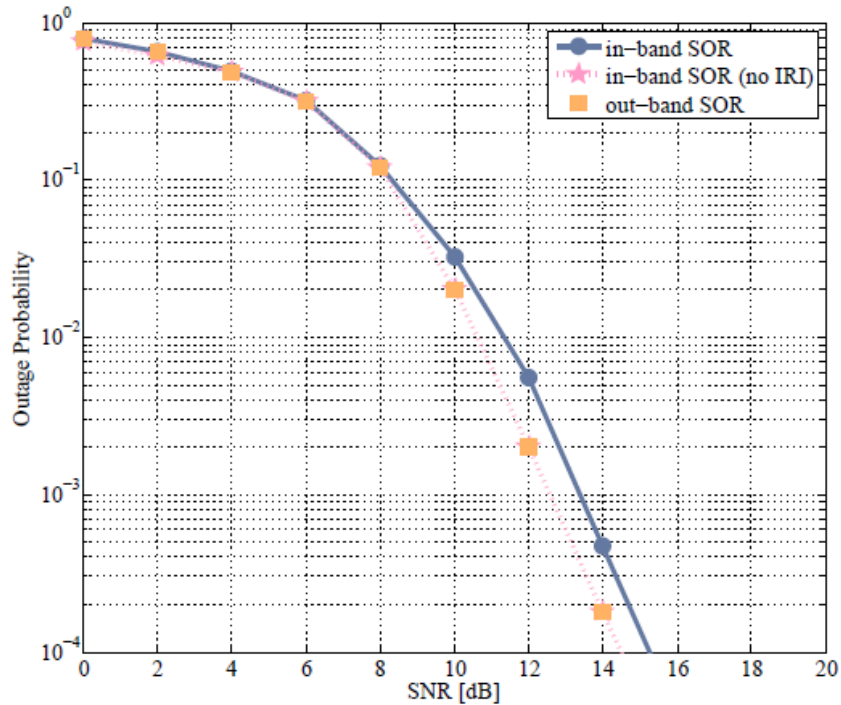
# Αξιολόγηση επίδοσης

- Τα δύο σχήματα SOR αξιολογήθηκαν με τη χρήση Matlab
- Ανεξάρτητα ασύρματα κανάλια με όμοια κατανομή διαλείψεων Rayleigh
- Σταθεροί συντελεστές διαλείψεων για μία χρονοθυρίδα
- Απαιτούμενος ρυθμός για αποκωδικοποίηση πακέτων  $r_0 = 3\text{bps/Hz}$
- Υλοποιήθηκε τοπολογία με  $K = 3$  αναμεταδότες
- Η λόγος σήματος προς θόρυβο – Signal-to-Noise Ratio (SNR) εκπομπής εκφράζεται ως  $\gamma = \frac{P}{n}$
- Θεωρήθηκαν τα εξής κριτήρια:
  - Πιθανότητα Διακοπής
  - Μέσος ρυθμός μετάδοσης
  - Μείωση της ισχύος εκπομπής
- Σύγκριση SOR με και χωρίς IRI και τοπολογίας χωρίς IRI με μία ζώνη συχνοτήτων

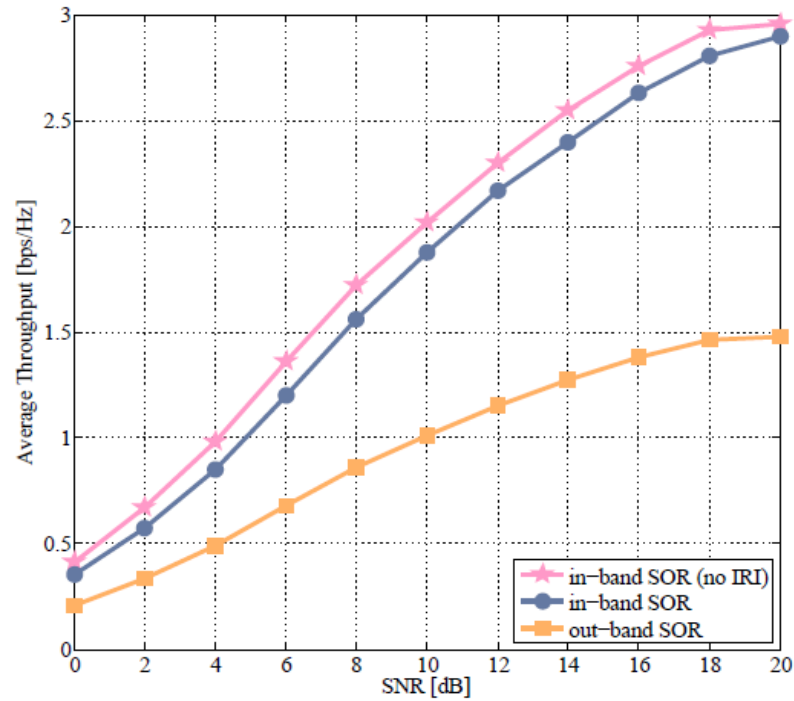


# Αξιολόγηση επίδοσης

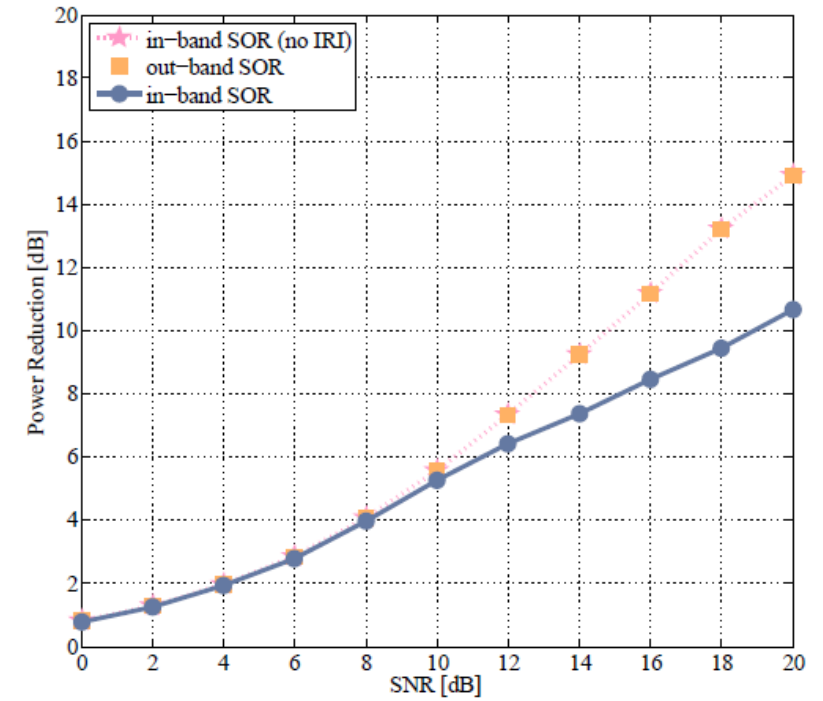
## Πιθανότητα διακοπής



## Μέσος ρυθμός μετάδοσης



## Μέση μείωση ισχύος εκπομπής



# Βιβλιογραφία

- Διεθνή περιοδικά:
  - A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, “Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, pp. 3450–3460, Sept. 2007
  - B. Rankov, and A. Wittneben, “Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 8, no. 2, pp. 379–389, Feb. 2007
  - D. S. Michalopoulos and G. K. Karagiannidis, “Performance analysis of single relay selection in Rayleigh fading,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, pp. 3718–3724, Oct. 2008
  - N. Nomikos, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, C. Verikoukis and C. Skianis, “Capacity maximization through energy-aware multi-mode relaying,” *Springer Wireless Personal Communications*, vol. 74, no. 1, pp. 83–99, Jan. 2014
- Διεθνή συνέδρια:
  - C. Wang, Y. Fan, I. Krikidis, J. S. Thompson and H. V. Poor, “Superposition-coded concurrent decode-and-forward relaying,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, vol., no., pp. 2390-2394, July 2008
  - N. Nomikos and D. Vouyioukas, “A successive opportunistic relaying protocol with inter-relay interference mitigation,” *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 228–333, Aug. 2012
  - N. Nomikos, D.N. Skoutas, D. Vouyioukas and C. Skianis, “A spectral efficient multi-mode relaying technique,” *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 5701–5705, June 2012

# Σχήματα Ευκαιριακής Αναμετάδοσης με Καταχωρητές

- Στόχος των αναπτυσσόμενων αλγορίθμων είναι:
  - Η εκμετάλλευση του βαθμού ελευθερίας που προσφέρει η αποθήκευση πακέτων στους αναμεταδότες
  - Η συνέργεια υβριδικών σχημάτων πλήρους διπλεξίας (SR, FD) και ημι-διπλεξίας (max-link)
- Οι τεχνικές SR, FD οδηγούν σε:
  - Αυξημένη φασματική αποδοτικότητα μέσω των ταυτόχρονων μεταδόσεων σε διαφορετικές ζεύξεις
  - IRI στην περίπτωση SR και LI στην περίπτωση FD
- Ο αλγόριθμος max-link επιλέγει την καλύτερη ζεύξη μεταξύ όλων των S-R και R-D διαθέσιμων:
  - Αύξηση του κέρδους διαφορικότητας μέσω των διπλάσιων ανεξάρτητων διαδρομών διάδοσης του σήματος
  - Εκμετάλλευση της δυνατότητας αποθήκευσης δεδομένων από τους αναμεταδότες
- Οι IRI και LI εξομαλύνονται μέσω τεχνικών:
  - PA, IC και IA

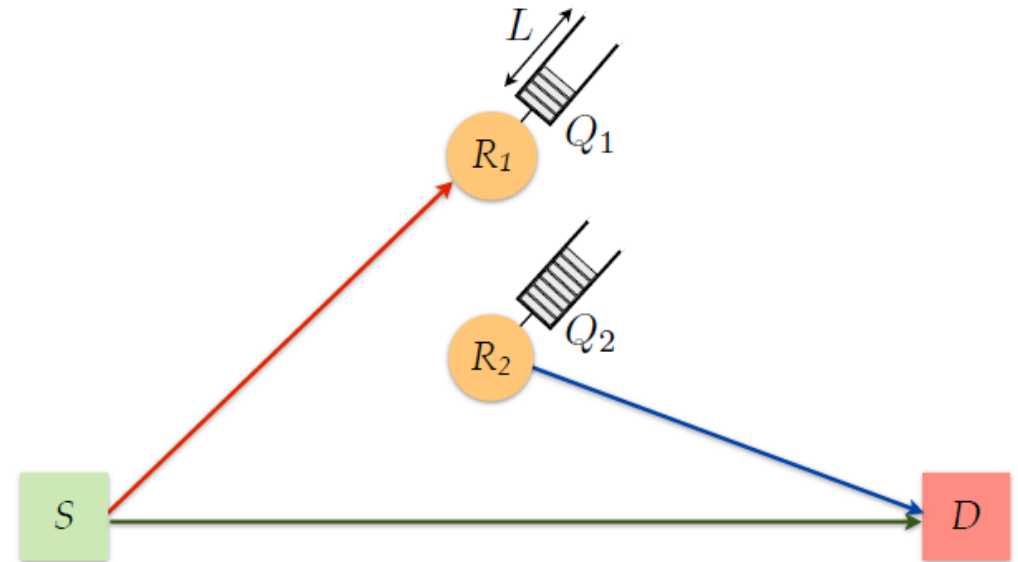


# Σχήματα Ευκαιριακής Αναμετάδοσης με Καταχωρητές

- Ο συνδυασμός OR, SR και max-link οδηγεί στον αλγόριθμο υβριδικής διαδοχικής αναμετάδοσης με ελαχιστοποίηση της ισχύος (min-power)
- Ο συνδυασμός OR, SR, FD και max-link οδηγεί στους αλγορίθμους πλήρους διπλεξίας με αποθήκευση – Buffer-Aided Full-Duplex Algorithms (BAFDA)
- Για τη μοντελοποίηση των καταστάσεων των καταχωρητών των αναμεταδοτών χρησιμοποιούνται Μαρκοβιανές αλυσίδες
- Επίσης, μοντελοποιείται η περίπτωση max-link με απευθείας μετάδοση S-D

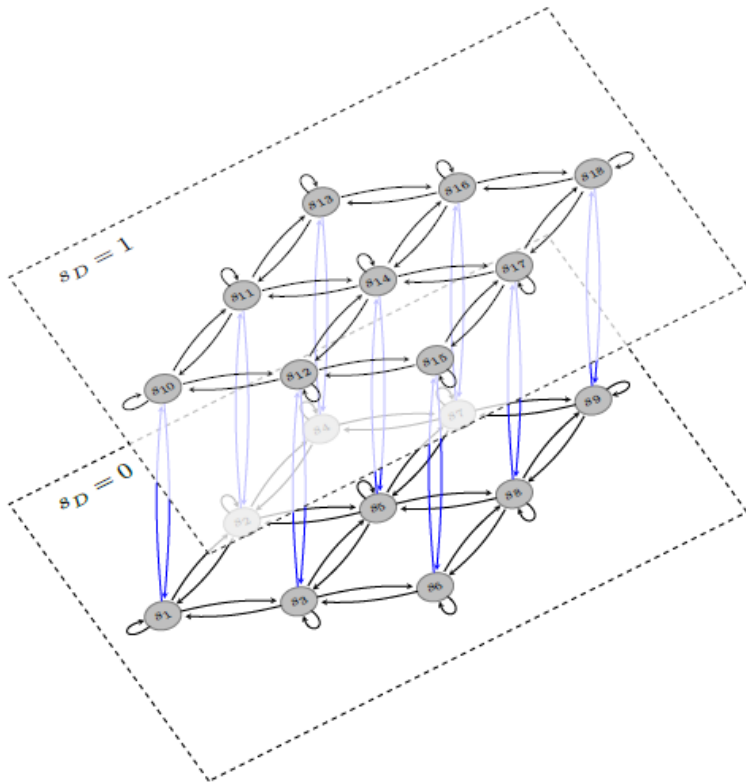
# Max-link με απευθείας μετάδοση S-D

- Δυνατότητα μετάδοσης στη ζεύξη S-D
- $K$  αναμεταδότες με δυνατότητα αποθήκευσης
- Μέγιστο μήκος καταχωρητή  $L$  bits
- Κανάλια i.i.d. με διαλείψεις Rayleigh
- Πολυεκπομπή από την πηγή στον αναμεταδότη με το καλύτερο κανάλι και τον προορισμό:
  - Αν ο προορισμός αποκωδικοποίησε το πακέτο ο αναμεταδότης απορρίπτει το πακέτο
  - Διαφορετικά, το κρατά για μελλοντική αποστολή και επιλέγεται το καλύτερο κανάλι μεταξύ των  $2K$  διαθέσιμων

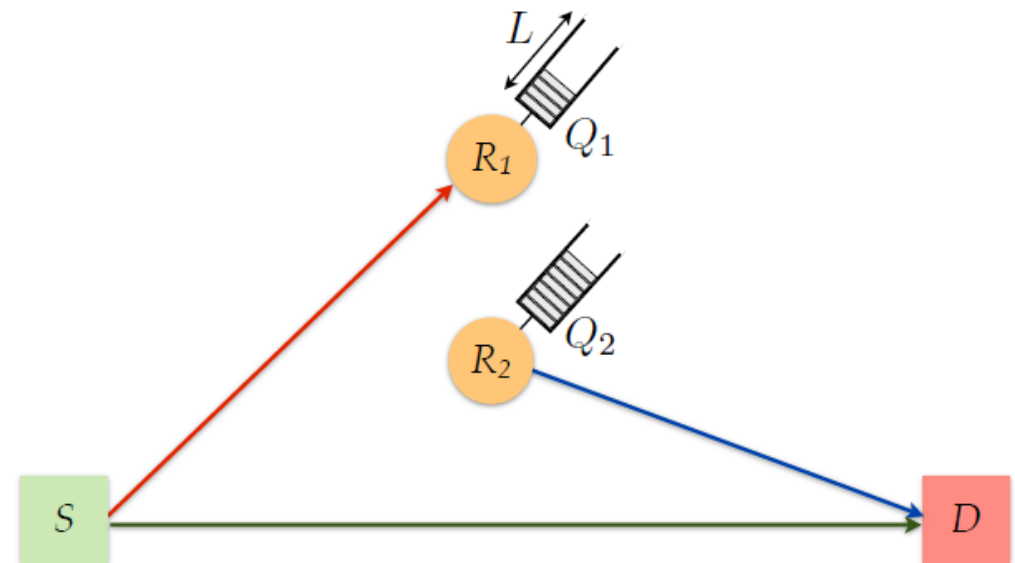


# Max-link με απευθείας μετάδοση S-D ( $K=2, L=2$ )

- Η απευθείας ζεύξη μοντελοποιείται με τη μεταβλητή  $s_D$
- Με επιτυχή μετάδοση S-D, έχουμε μετάβαση μεταξύ των δύο επιπέδων των καταστάσεων του συστήματος



State	$\Psi(Q_1)$	$\Psi(Q_2)$
$S_1$	00	
$S_2$	01	
$S_3$	10	
$S_4$	02	
$S_5$	11	
$S_6$	20	
$S_7$	12	
$S_8$	21	
$S_9$	22	

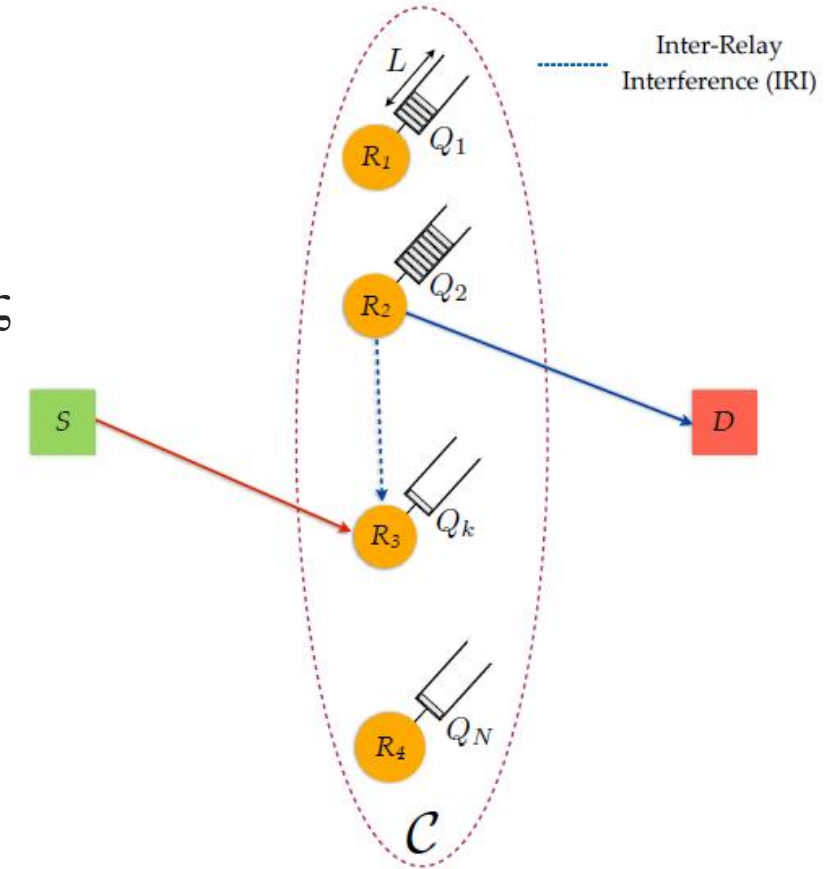


# Ο αλγόριθμος min-power

- Ο min-power χρησιμοποιεί αναμεταδότες με δυνατότητα αποθήκευσης, έτσι:
  - Αποκτά μεγαλύτερη ελευθερία στην επιλογή του ζεύγους  $(R_t, R_r)$ :
    - Η επιλογή δεν εξαρτάται από την προηγούμενη μετάδοση
    - Ενσωματώνει το max-link όταν δεν είναι δυνατή η λειτουργία SR
  - Ο min-power αναζητά το ζεύγος  $(R_t, R_r)$  για SR, με SNR λήψης  $\gamma_0$ , με την ελάχιστη ισχύ εκπομπής
  - Αν η μετάδοση SR δεν είναι δυνατή τότε:
    - Καταφεύγει στο max-link
    - Στοχεύει στον αναμεταδότη  $R_k$  ο οποίος απαιτεί την ελάχιστη ισχύ:

$$R_k = \arg \min_{\substack{k \in A \\ j \in T}} \min (P_S, P_{R_k})$$

- Όπου  $A = \{R_k : l_k < L\}$  και  $T = \{R_k : l_k > 0\}$



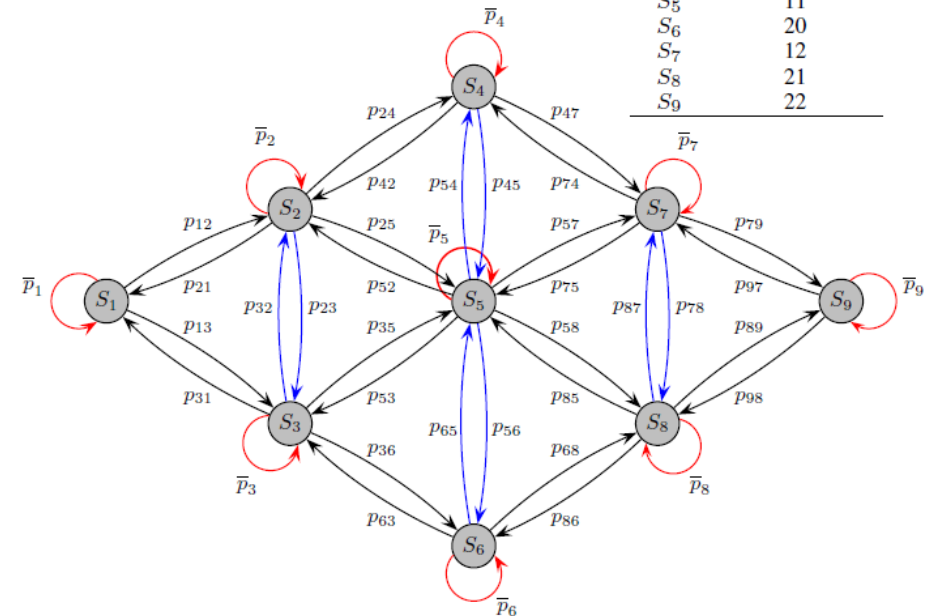


# Ο αλγόριθμος min-power ( $K=2, L=2$ )

- Οι καταστάσεις του συστήματος μοντελοποιούνται ως Μαρκοβιανή αλυσίδα  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{(L+1)^K \times (L+1)^K}$
- Κάθε στοιχείο  $\mathbf{A}_{i,j} = \mathbb{P}(s_i \rightarrow s_j) = \mathbb{P}(X_{t+1} = s_j | X_t = s_i)$
- Στην περίπτωση  $K=2, L=2$  υπάρχουν 9 καταστάσεις:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \bar{p}_1 & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & \bar{p}_2 & p_{23} & p_{24} & p_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{32} & \bar{p}_3 & 0 & p_{35} & p_{36} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{42} & 0 & \bar{p}_4 & p_{45} & 0 & p_{47} & 0 & 0 \\ 0 & p_{52} & p_{53} & p_{54} & \bar{p}_5 & p_{56} & p_{57} & p_{58} & 0 \\ 0 & 0 & p_{63} & 0 & p_{65} & \bar{p}_6 & 0 & p_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{74} & p_{75} & 0 & \bar{p}_7 & p_{78} & p_{79} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{85} & p_{86} & p_{87} & \bar{p}_8 & p_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{97} & p_{98} & \bar{p}_9 \end{pmatrix}$$

State	$\Psi(Q_1)$	$\Psi(Q_2)$
$S_1$	00	
$S_2$	01	
$S_3$	10	
$S_4$	02	
$S_5$	11	
$S_6$	20	
$S_7$	12	
$S_8$	21	
$S_9$	22	



- Η πιθανότητα διακοπής ισούται με:

$$P_{\text{out}} = \sum_{i=1}^{(L+1)^K} \pi_i \bar{p}_{D_i} = \text{diag}(\mathbf{A}) \pi$$



# Οι αλγόριθμοι BAFDA

- Οι BAFDA προσθέτουν στο min-power, FD αναμεταδότες
- Ορίζονται τρεις δυνατοί τρόποι μετάδοσης:
  - $S_1$ : FD OR, όπου οι επιλεγόμενες κεραιές εκπομπής και λήψης ανήκουν στον ίδιο αναμεταδότη
  - $S_2$ : SOR, όπου οι επιλεγόμενες κεραιές εκπομπής και λήψης ανήκουν σε διαφορετικούς αναμεταδότες
  - $S_3$ : max-link, με ενεργοποίηση ενός αναμεταδότη για εκπομπή/λήψη
- Ορίζονται τα σύνολα:

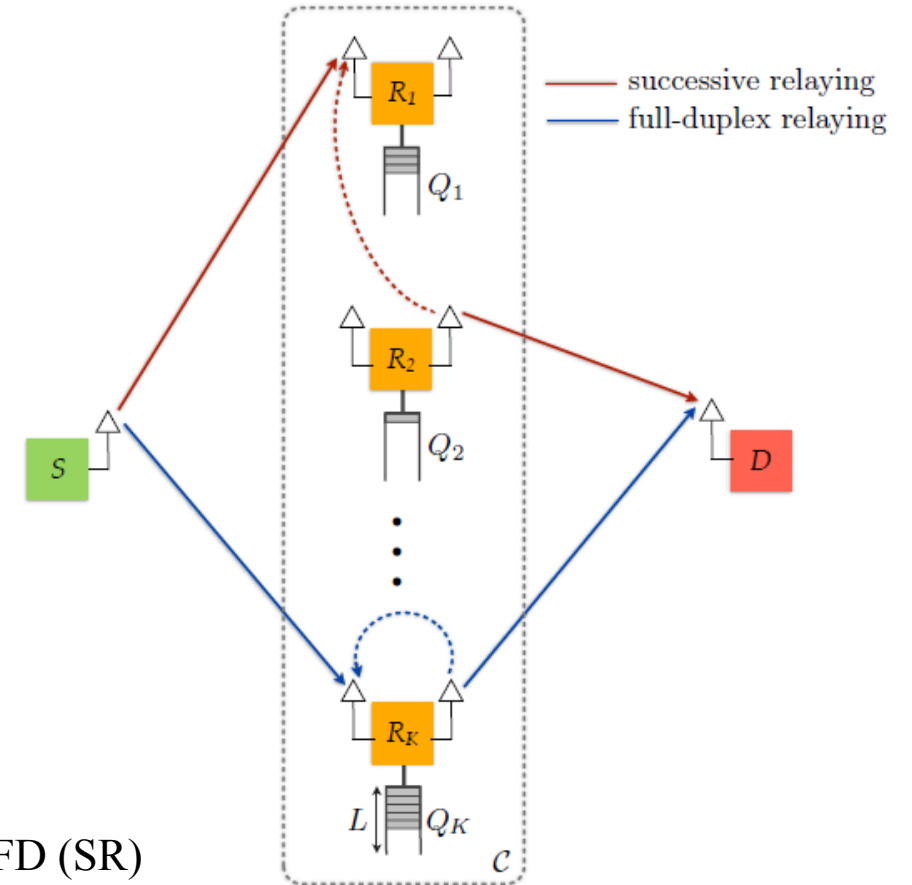
$C$  Το σύνολο όλων των αναμεταδοτών

$T$  Το σύνολο των αναμεταδοτών που μπορούν να μεταδώσουν

$A$  Το σύνολο των αναμεταδοτών που μπορούν να λάβουν

$M$  Το σύνολο των αναμεταδοτών που ανήκουν στο  $T \cup A$

$F$  Το σύνολο των αναμεταδοτών (ζευγών αναμεταδοτών) που υποστηρίζουν FD (SR)



# Οι αλγόριθμοι BAFDA (1<sup>η</sup> εκδοχή)

- Ορίζεται η κατάσταση  $S_{12} \triangleq S_1 \cup S_2$ , η οποία δηλώνει τις μεταδόσεις πλήρους διπλεξίας (SR ή FD)
- Επιλέγεται ο αναμεταδότης ή το ζεύγος αναμεταδοτών που απαιτούν την ελάχιστη ισχύ εκπομπής:

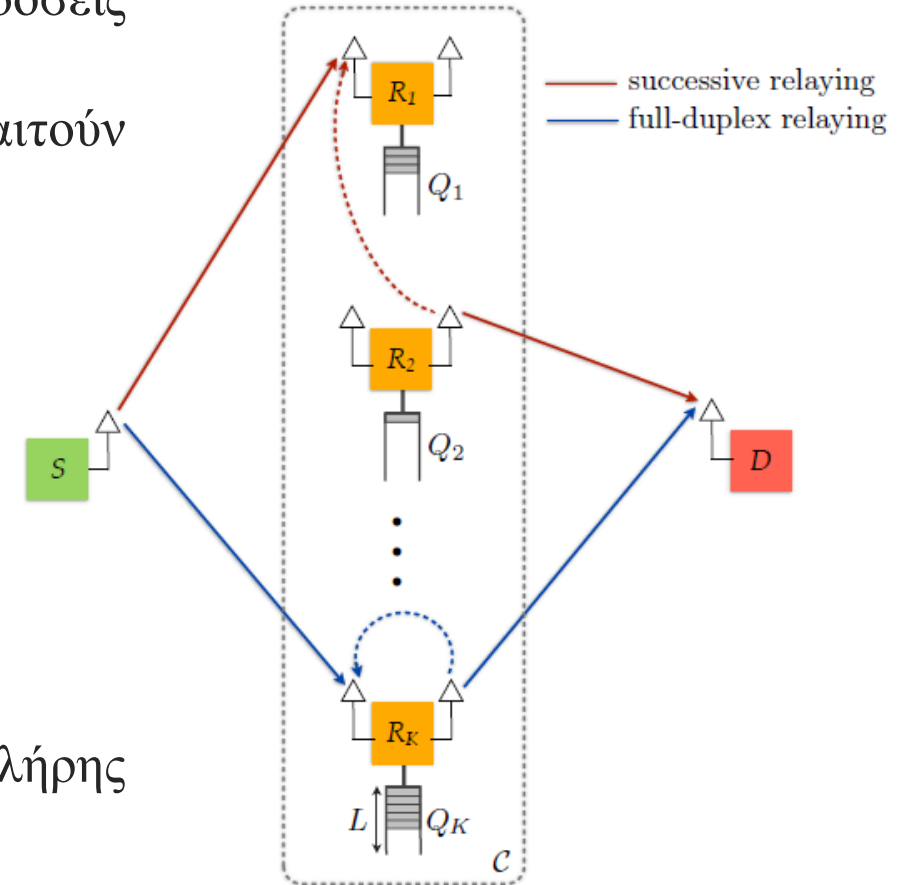
$$b^{(S_{12})} = \arg \min_{(i,j) \in F} (P_{S_i}^* + P_{R_j}^*)$$

- Όπου:

$$P_{R_j}^* = \frac{\gamma_0 n_D}{g_{R_j D}}$$

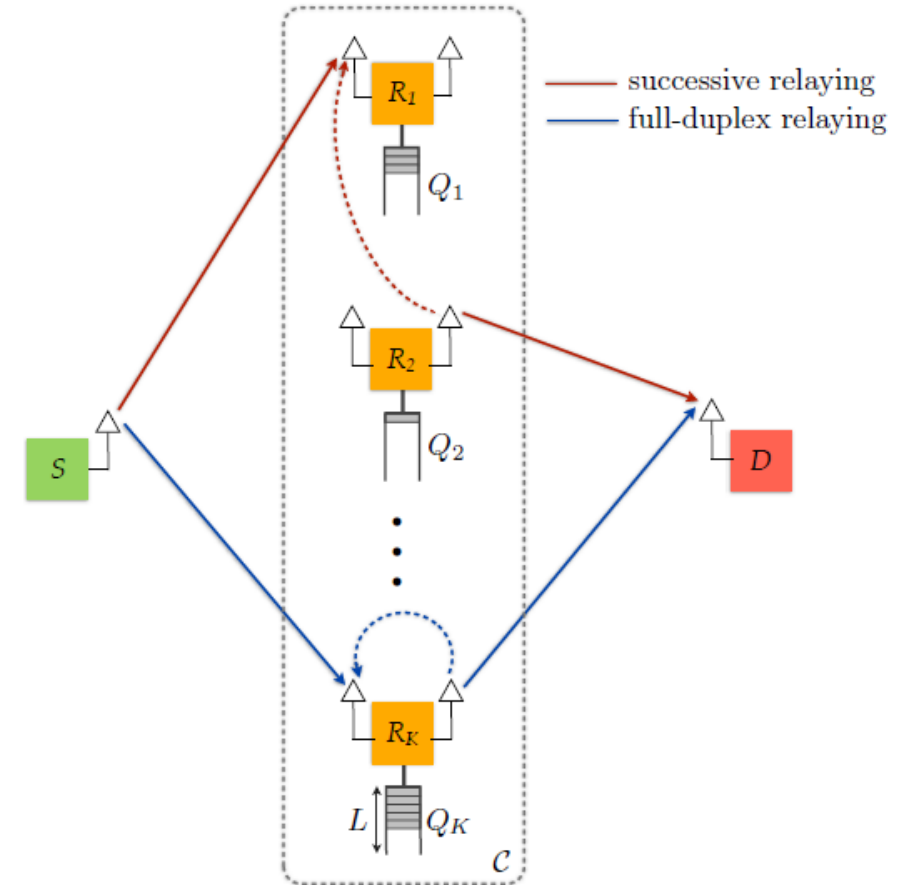
$$P_{S_i}^* = \min_{R_j \in A} \frac{\gamma_0 (g_{R_j R_i} P_{R_j}^* + n_R P_{R_j}^* + n_{R_i})}{g_{S R_i}}$$

- Αν  $F = \emptyset$  ο BAFDA<sub>v1</sub> καταφεύγει στο max-link
- Σημειώνεται ότι κατά τη μελέτη των BAFDA, δε θεωρήθηκε πλήρης IC του LI



# Οι αλγόριθμοι BAFDA (2<sup>η</sup> εκδοχή)

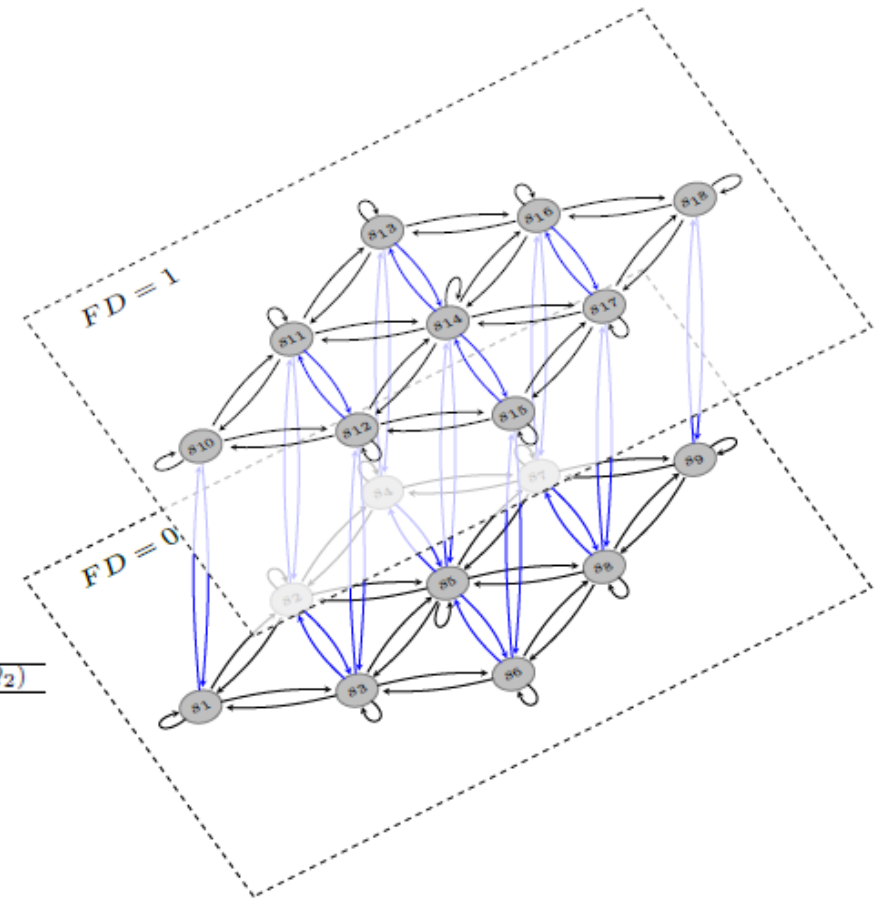
- Ο  $BAFDA_{v2}$  δίνει προτεραιότητα στις FD μεταδόσεις
- Αν είναι δυνατή μία FD μετάδοση για το καθορισμένο SNR λήψης, αποφεύγεται η αναζήτηση ζεύγους αναμεταδοτών
- Σε διαφορετική περίπτωση ξεκινά αναζήτηση ζεύγους
- Αν  $F = \emptyset$  ο  $BAFDA_{v2}$  καταφεύγει στο max-link
- Με την αποφυγή αναζήτησης για SR, μειώνεται το επίβαρο CSI για τα IR κανάλια



# Οι αλγόριθμοι BAFDA ( $K=2, L=2$ )

- Οι FD μεταδόσεις μοντελοποιούνται με τη μεταβλητή  $FD$ :
  - Η  $FD$  αλλάζει τιμή όταν επιτευχθεί μία  $FD$  μετάδοση
  - Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε μετάβαση μεταξύ των δύο επιπέδων
- Η πιθανότητα διακοπής ορίζεται ως:

$$P_{\text{out}} = \sum_{i=1}^{2L} \pi_i \bar{p}_{D_i} = \text{diag}(\mathbf{A}) \boldsymbol{\pi}$$



State	$\Psi(Q_1)$	$\Psi(Q_2)$
$S_1$	00	
$S_2$	01	
$S_3$	10	
$S_4$	02	
$S_5$	11	
$S_6$	20	
$S_7$	12	
$S_8$	21	
$S_9$	22	

# Οι αλγόριθμοι BAFDA με μειωμένο επίβαρο CSI

- Η συνεχής εκτίμηση του CSI δημιουργεί σημαντικό επίβαρο στην επικοινωνία
- Για τη μείωση του επίβαρου CSI, υιοθετείται η κατανεμημένη τεχνική μετάβασης-παραμονής – Distributed-Switch-and-Stay-Combining (DSSC):
  - Στην αρχή της λειτουργίας του δικτύου ορίζεται μία τιμή  $Z$  η οποία εκφράζει το συνολικό SNR εκπομπής
  - Σε μία τυχαία χρονοθυρίδα  $t+1$  η επιλογή ορίζεται ως:

$$b^{t+1} = \begin{cases} (R_i, R_j) \in F, & P_{S_i}^* + P_{R_j}^* \leq Z \\ b^{(\text{BAFDA}_{v_1})}, & \text{in BAFDA}_{v_1\text{-sub}} \\ b^{(\text{BAFDA}_{v_2})}, & \text{in BAFDA}_{v_2\text{-sub}} \end{cases}$$

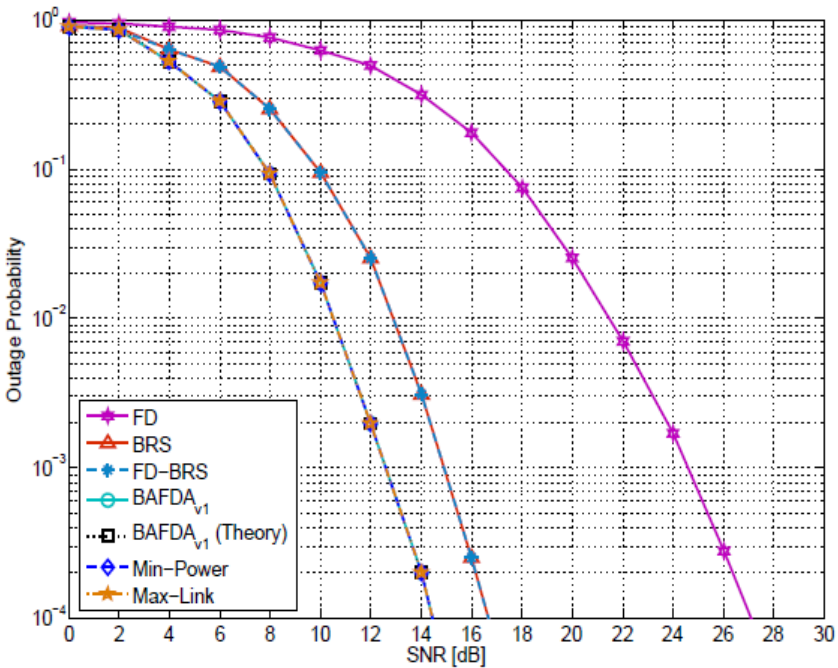
# Αξιολόγηση επίδοσης

- Οι BAFDA αξιολογήθηκαν με τη χρήση Matlab
- Ανεξάρτητα ασύρματα κανάλια με όμοια κατανομή διαλείψεων Rayleigh
- Τα LI κανάλια ακολουθούν Γκαουσιανή κατανομή
- Σταθεροί συντελεστές διαλείψεων για μία χρονοθυρίδα
- Απαιτούμενος ρυθμός για αποκωδικοποίηση πακέτων  $r_0 = 3\text{bps/Hz}$
- Υλοποιήθηκε τοπολογία με  $K = 3$  αναμεταδότες και  $L=6$  bits
- Ο SNR εκπομπής εκφράζεται ως  $\gamma = \frac{P}{n}$
- Θεωρήθηκαν τα εξής κριτήρια:
  - Πιθανότητα Διακοπής
  - Μέσος ρυθμός μετάδοσης
  - Μείωση της ισχύος εκπομπής
  - Μέση καθυστέρηση
  - Μείωση επίβαρων CSI
- Σύγκριση BAFDA με δημοφιλείς αλγόριθμους μισής και πλήρους διπλεξίας

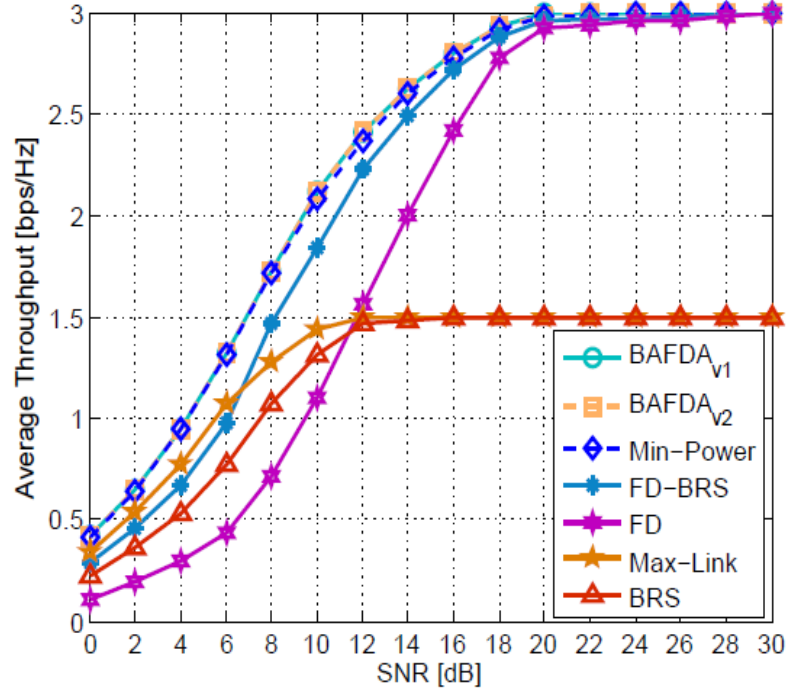


# Αξιολόγηση επίδοσης

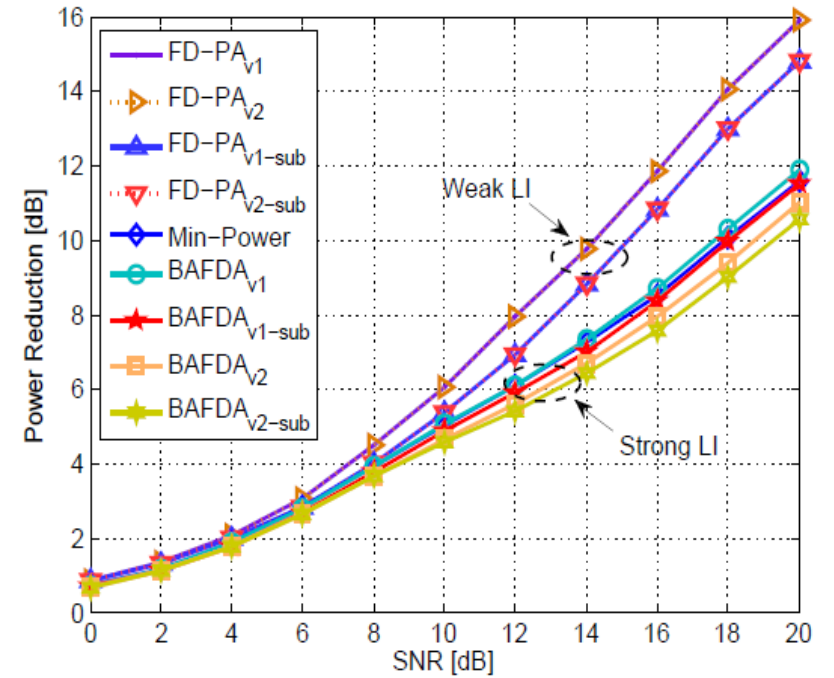
Πιθανότητα διακοπής



Μέσος ρυθμός μετάδοσης



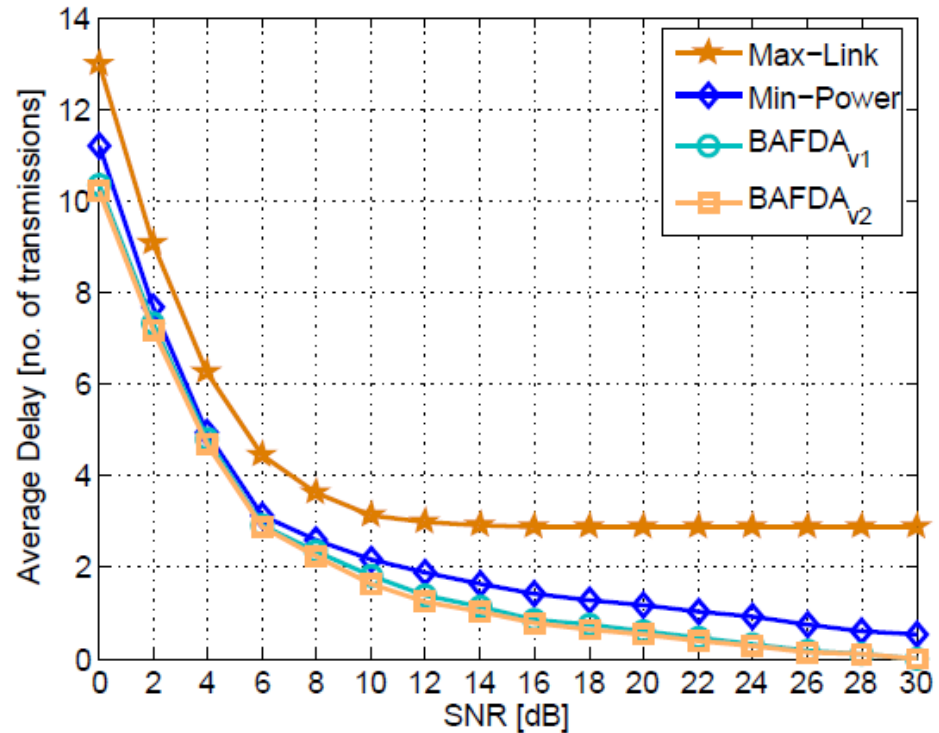
Μέση μείωση ισχύος εκπομπής



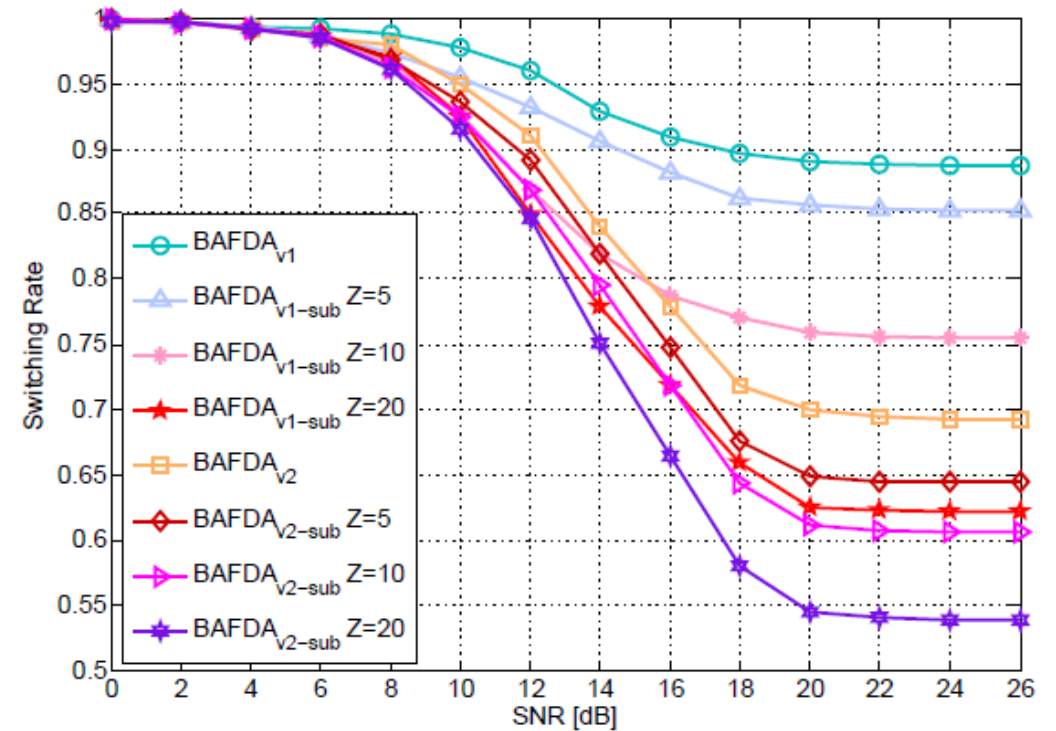


# Αξιολόγηση επίδοσης

## Μέση καθυστέρηση



## Ρυθμός μετάβασης



# Βιβλιογραφία

- Διεθνή περιοδικά:
  - *A. Ikhlef, D. S. Michalopoulos and R. Schober, “Max-max relay selection for relays with buffers,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, pp. 1124-1135, March 2012*
  - *T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 10, no. 9, pp. 3074–3085, Sep. 2011*
  - *I. Krikidis, T. Charalambous, and J. S. Thompson, “Buffer-aided relay selection for cooperative diversity systems without delay constraints,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, pp. 1957–1967, May 2012*
  - *T. Charalambous, N. Nomikos, I. Krikidis, D. Vouyioukas and M. Johansson, “Modeling buffer-aided relaying with direct transmission capability in cooperative networks,” submitted in IEEE Communications Letters, July 2014*
  - *N. Nomikos, D. Vouyioukas, T. Charalambous, I. Krikidis, P. Makris, D. N. Skoutas, M. Johansson and, C. Skianis, “Joint relay-pair selection for buffer-aided successive opportunistic relaying,” Wiley-Blackwell Trans. Emerg. Telecom. Techn., 2013*
  - *N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas and M. Johansson, “A buffer-aided successive opportunistic relay selection scheme with power adaptation and inter-relay interference cancellation for cooperative diversity systems,” IEEE Trans. on Commun. March 2015*

# Βιβλιογραφία

- Διεθνή συνέδρια:
  - *N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. Vouyioukas and M. Johansson, “Hybrid cooperation through full-duplex opportunistic relaying and max-link relay selection with transmit power adaptation”, in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2014*
  - *N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D.N. Skoutas, D. Vouyioukas and M. Johansson, “Buffer-aided successive opportunistic relaying with inter-relay interference cancellation,” in Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sep. 2013*
  - *N. Nomikos, P. Makris, D. Vouyioukas, D. N. Skoutas and C. Skianis, “Distributed joint relay-pair selection for buffer-aided successive opportunistic relaying,” Proceedings of IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling Analysis and Design (CAMAD), pp. 318–322, Berlin, Germany, Sept. 2013*
  - *N. Nomikos, D. Vouyioukas, T. Charalambous, I. Krikidis, D.N. Skoutas and M. Johansson, “Capacity improvement through buffer-aided successive opportunistic relaying, ”Proceedings of IEEE Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE), pp.1–5, June 2013*



# Ενδεικτικές εφαρμογές

- Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι είναι εφαρμόσιμοι σε ένα μεγάλο εύρος περιοχών:
  - Μπορούν να υλοποιηθούν σε δίκτυα με ετερογενείς αναμεταδότες:
    - Σταθεροί αναμεταδότες με τροφοδοσία – Power-supplied (PS) fixed relays
    - Σταθεροί αναμεταδότες χωρίς τροφοδοσία – Fixed Battery-Dependent (BD) relays
    - Κινητοί αναμεταδότες – Mobile Battery-Dependent (BD) relays
    - Συσκευές χρηστών με λειτουργία αναμετάδοσης – User Equipments (UEs)
  - Επίσης, κατά τη συνέργεια επίγειων – στρατοσφαιρικών δικτύων
    - Χρήση στατιστικών και τρισδιάστατων μοντέλων καναλιού
    - Ευκαιριακή επιλογή στρατοσφαιρικών αναμεταδοτών για την απ' άκρου εις άκρον επικοινωνία

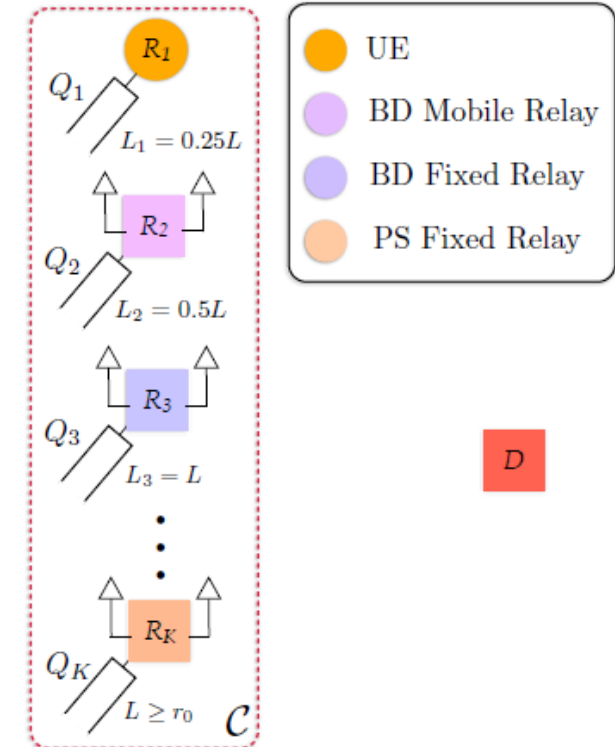


# Ενδεικτικές εφαρμογές (Ετερογενείς αναμεταδότες)

Class / Level	Processing	MIMO	Storage	CSI Estimation	Density
UE	Low/Medium	Low / Medium	Low / Medium	Low	High
BD Mobile Relay	Medium / High	Medium	Medium	Low / Medium	Low / Medium
BD Fixed Relay	Medium / High	High	High	Medium / High	Low / Medium
PS Fixed Relay	High	High	High	High	Low

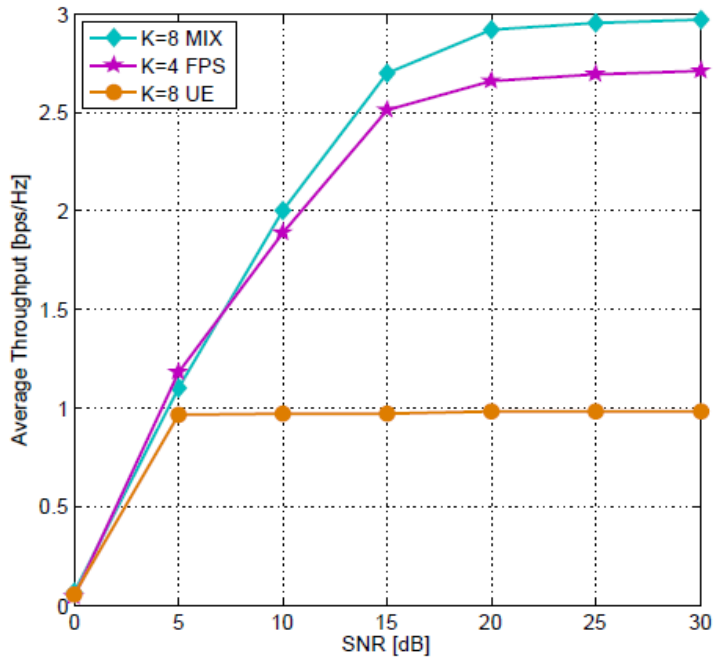
Class / Application	High Mobility	Delay critical	Green Communications
UE	Low	Low/Medium	Medium
BD Mobile Relay	Medium	Low / Medium	Medium
BD Fixed Relay	Medium	Medium	Medium / High
PS Fixed Relay	Medium / High	Medium / High	High

S

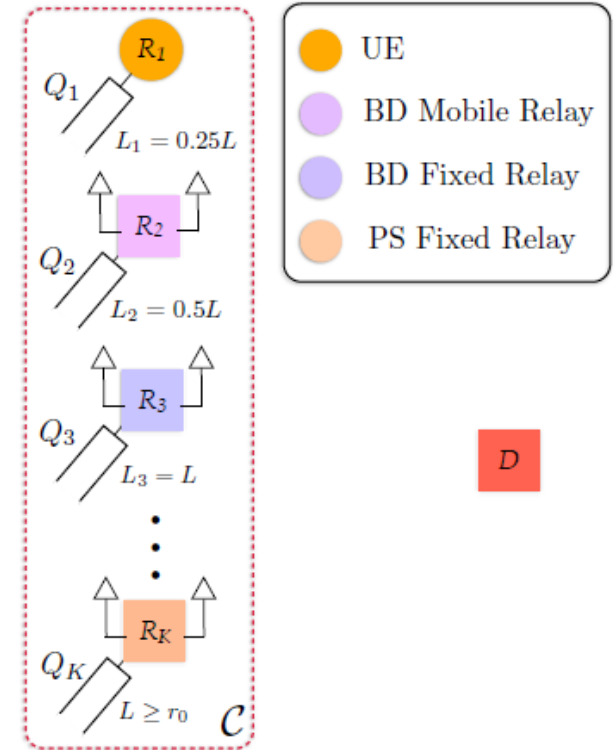
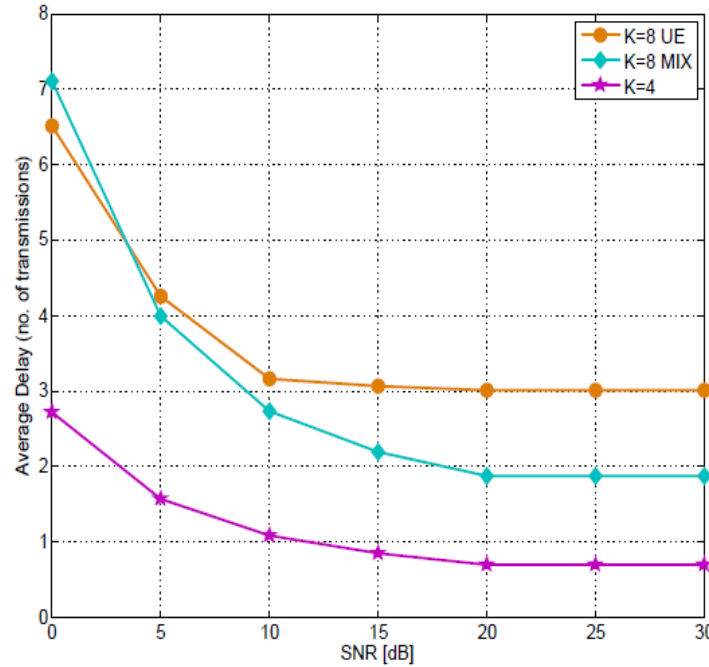


# Ενδεικτικές εφαρμογές (Ετερογενείς αναμεταδότες)

Ρυθμός μετάδοσης  
(Σταθερά επίπεδα ισχύος)

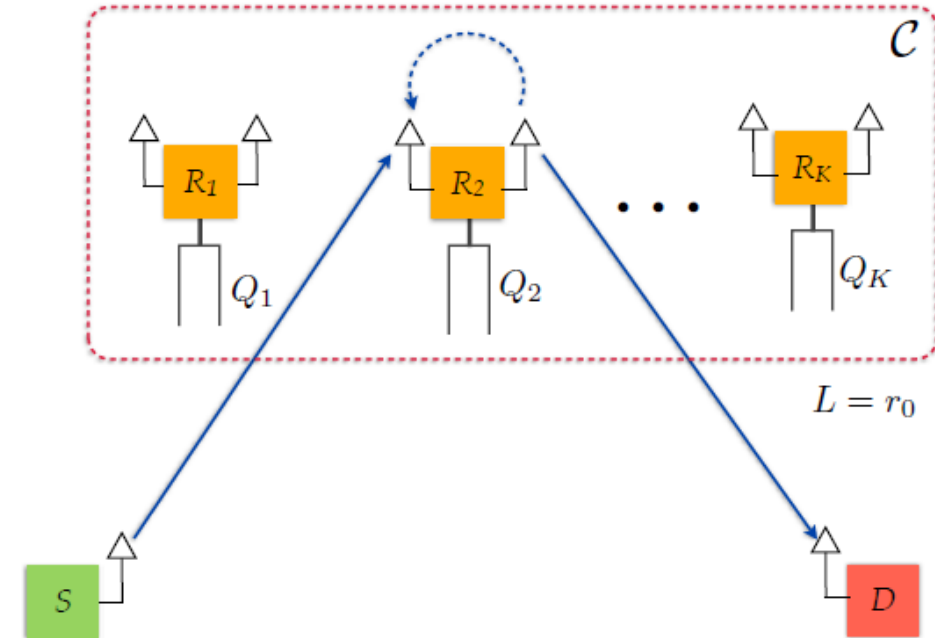
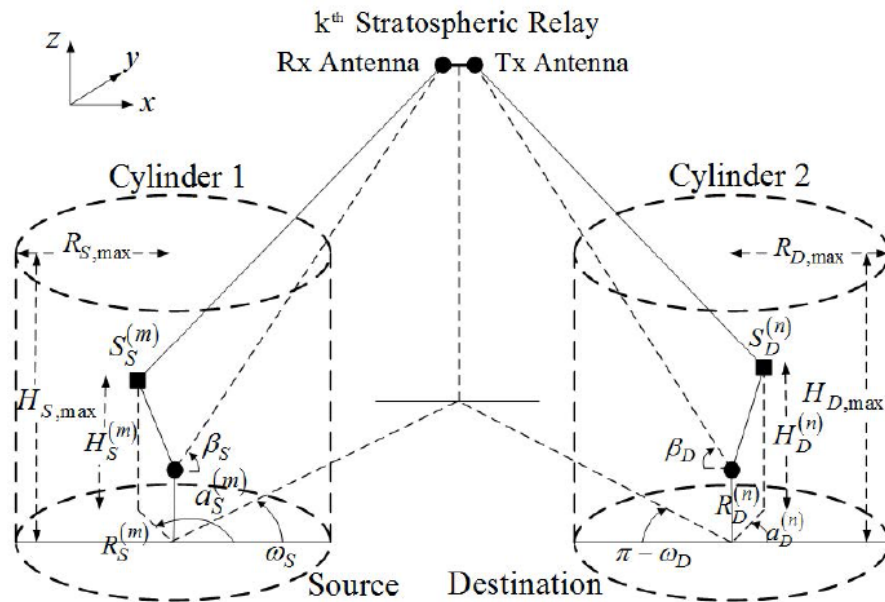


Μέση καθυστέρηση  
(Προσαρμοζόμενα επίπεδα ισχύος)



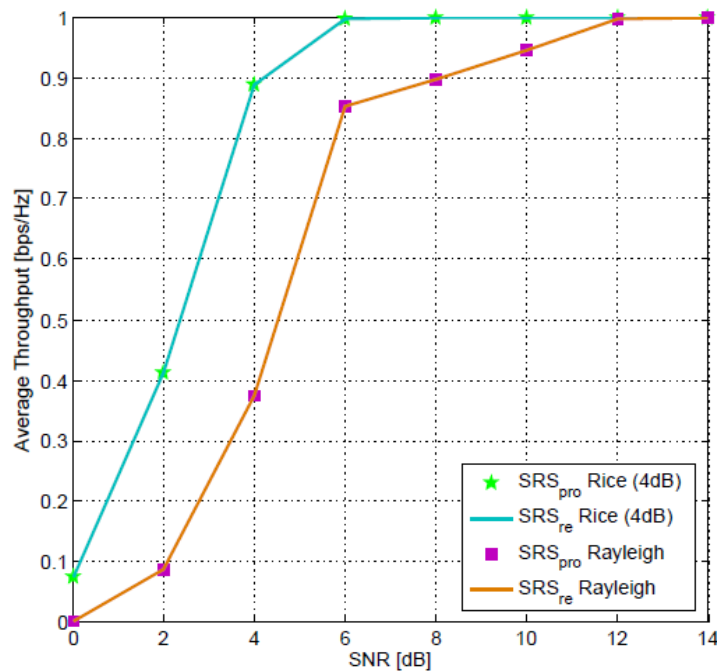
# Ενδεικτικές εφαρμογές (Επίγεια – στρατοσφαιρικά δίκτυα)

- Διαφορετικοί ευκαιριακή αλγόριθμοι ανάλογα με τη γνώση του CSI σε κάθε ζεύξη:
  - Με CSI και στις δύο ζεύξεις:  $b_p = \arg \min_{k \in C} (P_S + P_{R_k})$
  - Με CSI στη δεύτερη ζεύξη:  $b_p = \arg \min_{k \in D} (P_{R_k}), D = \{k : SNR_k \geq \gamma_0\}$
- Χρήση τρισδιάστατου γεωμετρικού καναλιού

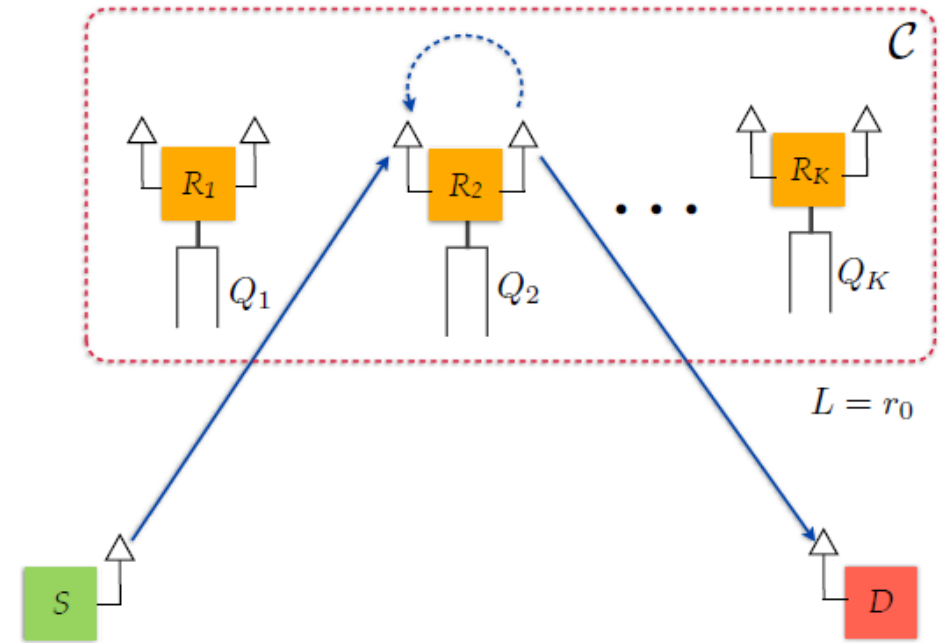
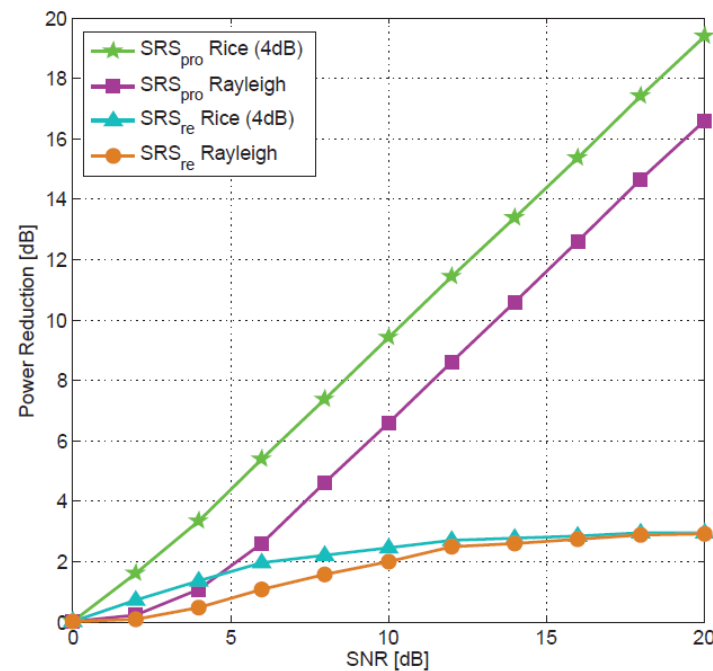


# Ενδεικτικές εφαρμογές (Επίγεια – στρατοσφαιρικά δίκτυα)

Μέσος ρυθμός μετάδοσης



Μέση μείωση της ισχύος





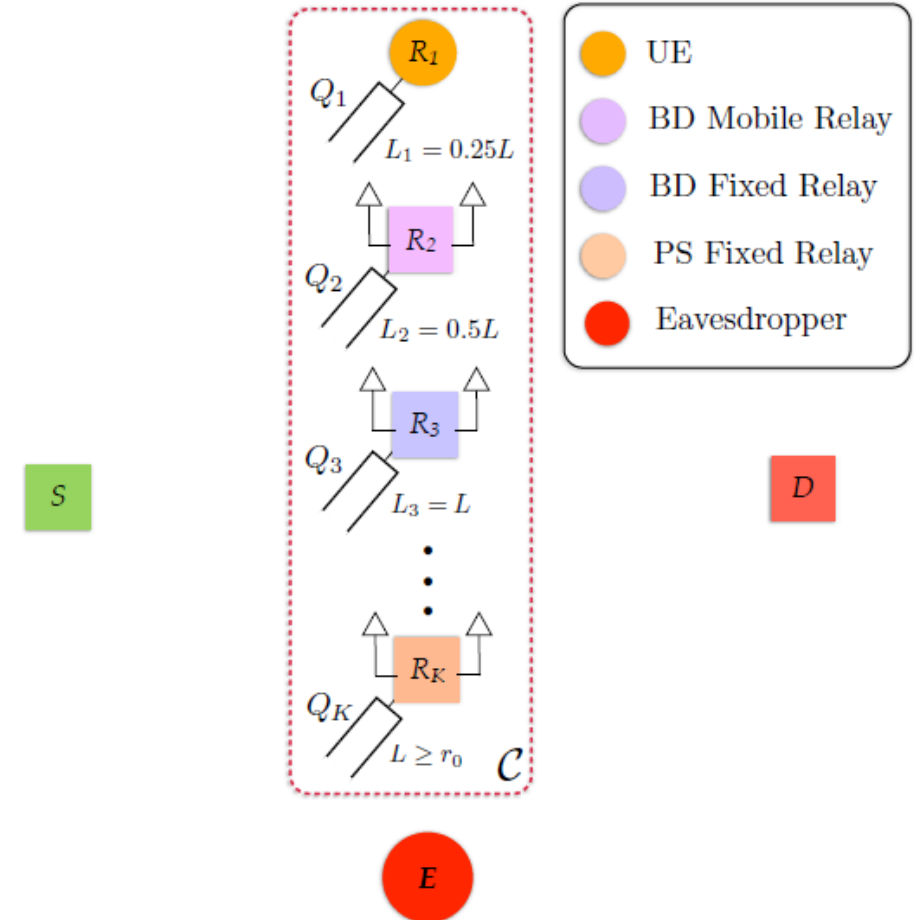
# Βιβλιογραφία

- Διεθνή περιοδικά:
  - *F. Dovis, R. Fantini, M. Mondin, and P. Savi, "Small-scale fading for high-altitude platform (HAP) propagation channels," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 20, no. 3, pp. 641-647, Apr. 2002*
  - *T. Taleb, Y. Hadjadj-Aoul and T. Ahmed, "Challenges, opportunities, and solutions for converged satellite and terrestrial networks," IEEE Wireless Commun. Mag., vol. 18, no. 1, pp. 46-52, Feb. 2011*
  - *N. Nomikos, E.T. Michailidis, D. Vouyioukas and A. G. Kanatas, "Performance analysis of a two-hop MIMO mobile-to-mobile via stratospheric-relay link employing hierarchical modulation," Hindawi International Journal of Antennas and Propagation, 2013*
- Διεθνή συνέδρια:
  - *N. Nomikos, P. Makris, D. Vouyioukas, D. N. Skoutas and C. Skianis, "Relay selection in 5G network," Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Nicosia, Cyprus, Aug. 2014*
- Άλλα:
  - *Google Project Loon, [www.google.com/loon/](http://www.google.com/loon/)*



# Ευκαιριακή Αναμετάδοση με Περιορισμούς Εμπιστευτικότητας

- Εξετάζεται μία τοπολογία όπου:
  - Μία πηγή (S) επικοινωνεί με έναν προορισμό (D)
  - Η επικοινωνία είναι εφικτή μόνο μέσω αναμεταδοτών
  - Όλες οι ζεύξεις υπόκεινται σε:
    - Διαλείψεις τύπου Rayleigh (*i.i.d.*)
    - Προσθετικό Λευκό Γκαουσιανό Θόρυβο
  - Η πηγή έχει συνεχώς δεδομένα προς μετάδοση
  - Ένας κακόβουλος κόμβος - Eavesdropper (E) προσπαθεί να λάβει τα μεταδιδόμενα πακέτα
  - Οι μεταδόσεις χωρίζονται σε χρονοθυρίδες
  - Υπάρχει γνώση του CSI
  - Τρεις περιπτώσεις γνώσης του CSI του E:
    - Μηδενική
    - Πλήρης
    - Στατιστική



# Ευκαιριακή Αναμετάδοση με Περιορισμούς Εμπιστευτικότητας

- Ο ρυθμός μετάδοσης εμπιστευτικότητας ορίζεται:

- Στη ζεύξη  $SR_k$ :

$$r_{SR_k}^* = r_{SR_k} - r_{SE}$$

- Στη ζεύξη  $R_kD$ :

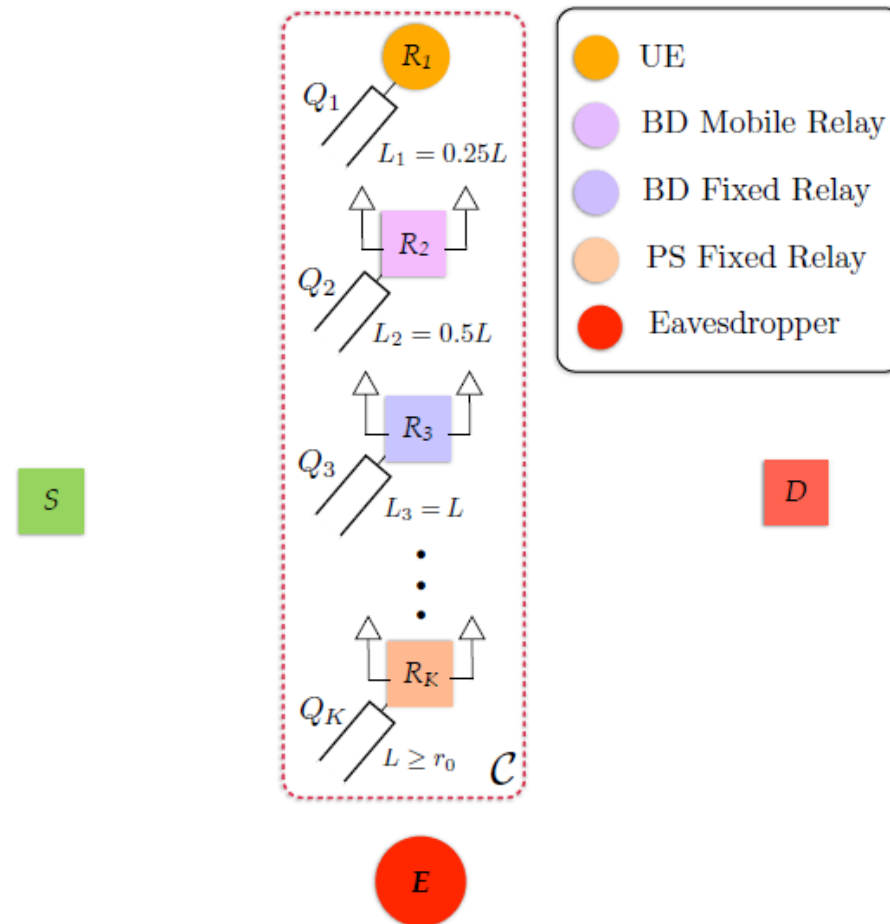
$$r_{R_kE}^* = r_{R_kD} - r_{R_kE}$$

- Απ' άκρου εις άκρον:

$$r_{SR_kD}^* = \min(r_{SR_k}^*, r_{R_kD}^*)$$

- Δύο διαφορετικά σενάρια ανάλογα με τη δυνατότητα προσαρμογής της ισχύος εκπομπής:

- Αν δεν είναι δυνατή, αύξηση του ρυθμού εμπιστευτικότητας
- Αλλιώς, ικανοποίηση κατωφλίου ρυθμού εμπιστευτικότητας με την ελάχιστη δυνατή ισχύ



# Ευκαιριακή Αναμετάδοση με Περιορισμούς Εμπιστευτικότητας

- Ανάλογα με τη γνώση του CSI του E προτείνονται τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι:

- Μηδενική γνώση:

$$b_{FD} = \arg \max \min \left\{ r_{SR_i}, r_{R_jD} \right\}$$

- Πλήρης γνώση:

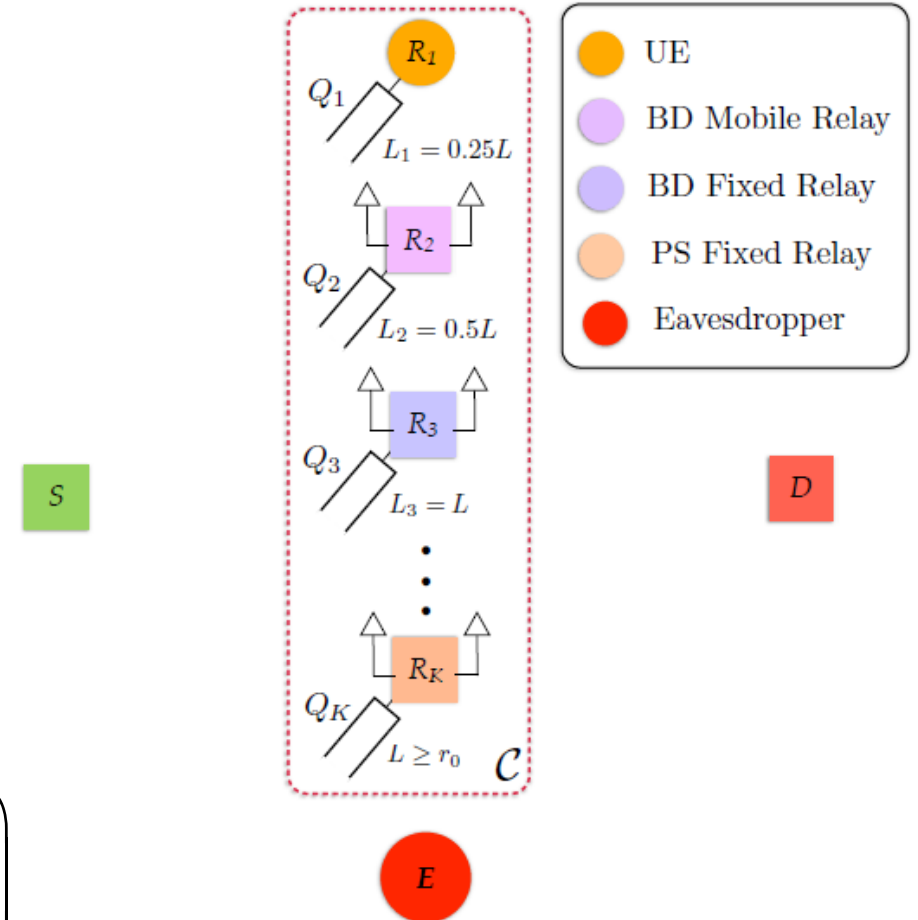
$$b_{FD} = \arg \max \min \left\{ r_{SR_i}^*, r_{R_jD}^* \right\}$$

- Στατιστική γνώση:

$$b_{FD} = \arg \max \min \left\{ r_{SR_i}^{\dagger*}, r_{R_jD}^{\dagger*} \right\}$$

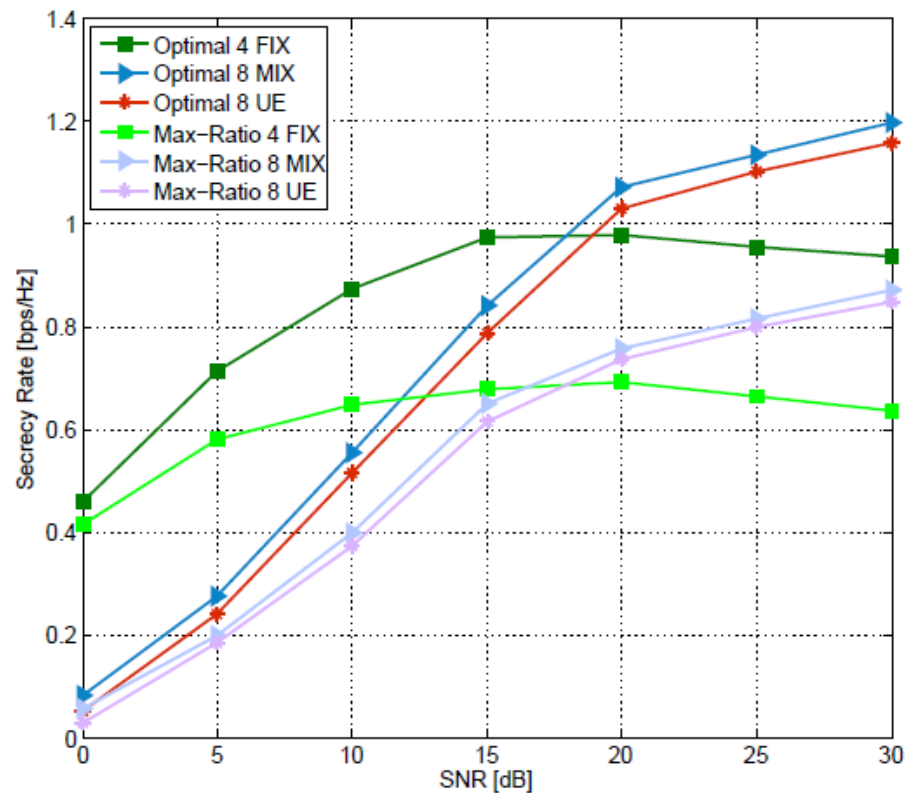
- Χρησιμοποιώντας:

$$r_{SE}^{\dagger} = \log_2 \left( 1 + \frac{\sigma_{SE}^2 P_{SR_i}}{n_E} \right), r_{R_jE}^{\dagger} = \log_2 \left( 1 + \frac{\sigma_{R_jE}^2 P_{R_jD}}{n_D} \right)$$

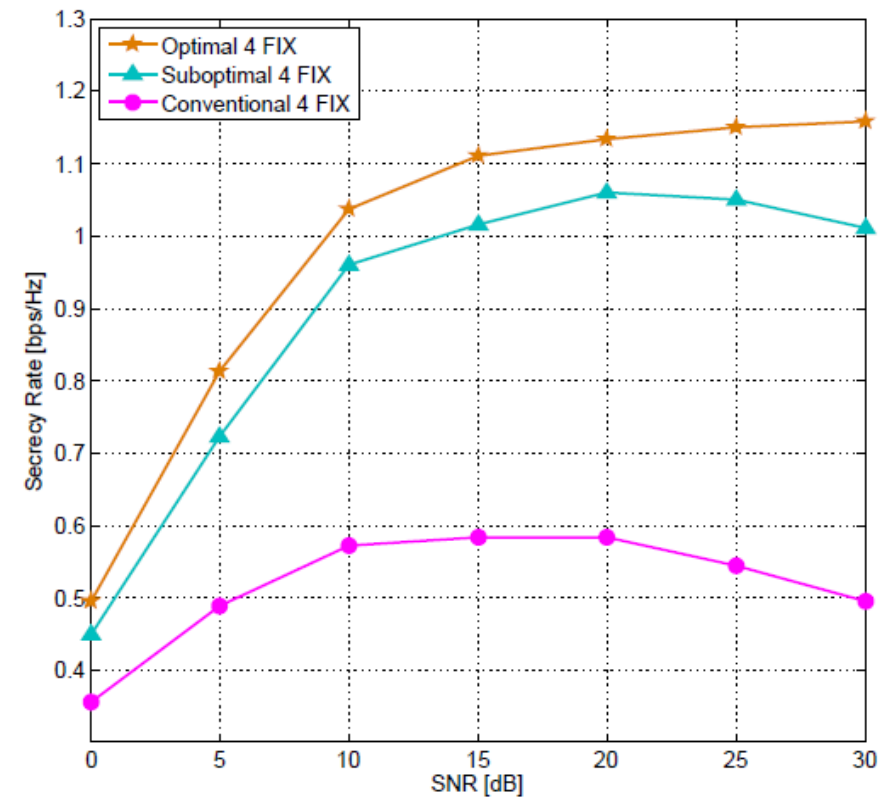


# Αξιολόγηση επίδοσης

Μέσος ρυθμός μετάδοσης με εμπιστευτικότητα  
(Διαφορετικοί τύποι αναμεταδοτών)



Μέσος ρυθμός μετάδοσης με εμπιστευτικότητα  
(Διαφορετικοί αλγόριθμοι επιλογής)



# Βιβλιογραφία

- Διεθνή περιοδικά:
  - *J. Huang, A. Mukherjee, A. Swindlehurst, “Secure communication via an untrusted nonregenerative relay in fading channels,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 61, no. 10, pp.2536-2550, May, 2013*
  - *H. Khodakarami and F. Lahouti, “Link adaptation with untrusted relay assignment: Design and performance analysis,” IEEE Trans. on Commun., vol. 61, no. 12, pp.4874-4883, Dec. 2013*
  - *N. Nomikos, A. Nieto, P. Makris, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, P. Rizomiliotis, J. Lopez and C. Skianis, “Relay selection for secure 5G green communications ,” Springer Telecommunication Systems, 2014*



# Συμπεράσματα

- Παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι αναμετάδοσης οι οποίοι:
  - Συνδυάζουν διάφορες τεχνικές αναμετάδοσης:
    - *Ευκαιριακή*
    - *Διαδοχική*
    - *Πλήρους διπλεξίας*
  - Αντιμετωπίζουν διάφορα είδη παρεμβολών:
    - *Μεταξύ αναμεταδοτών*
    - *Μεταξύ κεραιών αναμεταδότη*
  - Εξετάζονται για διάφορα κριτήρια
    - *Πιθανότητα διακοπής*
    - *Μέσος ρυθμός μετάδοσης*
    - *Μείωση της ισχύος*
    - *Μέση καθυστέρηση*
    - *Μέσος ρυθμός μετάβασης*
    - *Μέσος ρυθμός μετάδοσης εμπιστευτικότητας*



# Συμπεράσματα

- Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι είναι εφαρμόσιμοι σε διάφορους τύπους ασύρματων δικτύων:
  - WSNs
  - D2D
  - M2M
  - Smart Energy Grid
  - Cellular Networks
- Ο στόχος της αύξησης της φασματικής αποδοτικότητας είναι εφικτός εφόσον:
  - Υιοθετηθούν καινοτόμες τεχνικές συνεργατικής αναμετάδοσης
  - Πραγματοποιηθεί αποτελεσματική εξομάλυνση των παρεμβολών
  - Εκμεταλλευθεί η ετερογένεια των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων





# Μελλοντικές Κατευθύνσεις

- Προβλέπονται τα παρακάτω πεδία έρευνας:
  - Μελέτη τοπολογιών με:
    - *Ασύμμετρα χαρακτηριστικά ζεύξεων*
    - *Διάφορες περιπτώσεις γνώσης CSI*
  - Συνέργεια με τεχνικές δικτυακής κωδικοποίησης – Network Coding
  - Εφαρμογές D2D
  - Επέκταση με στοιχεία ενεργειακής συγκομιδής – Energy Harvesting
  - Εξέταση του ρόλου των αναμεταδοτών στις νέες περιοχές συχνοτήτων:
    - *Χιλιοστομετρικά μήκη κύματος – millimeter Waveband*
    - *Οπτική διάδοση ελεύθερου πεδίο – Free-Space Optical*



Ευχαριστώ!

