
Κινητά και Ασύρματα Δίκτυα



Κινητά Κατά Περίπτωση Δίκτυα

Ευάγγελος Παπαπέτρου

Δομή Παρουσίασης

- Εισαγωγή
 - ❑ Βασικά στοιχεία MANET, ζητήματα-προκλήσεις, μοντελοποίηση
- Δρομολόγηση σε MANET
 - ❑ Το πρόβλημα της δρομολόγησης
 - δρομολόγηση συντομότερης διαδρομής, distance vector, link state
 - ❑ προκλήσεις, trade-offs
 - ❑ κατηγορίες πρωτοκόλλων: proactive, on-demand, hybrid
- Πρωτόκολλα
 - ❑ DSDV, DSR, AODV

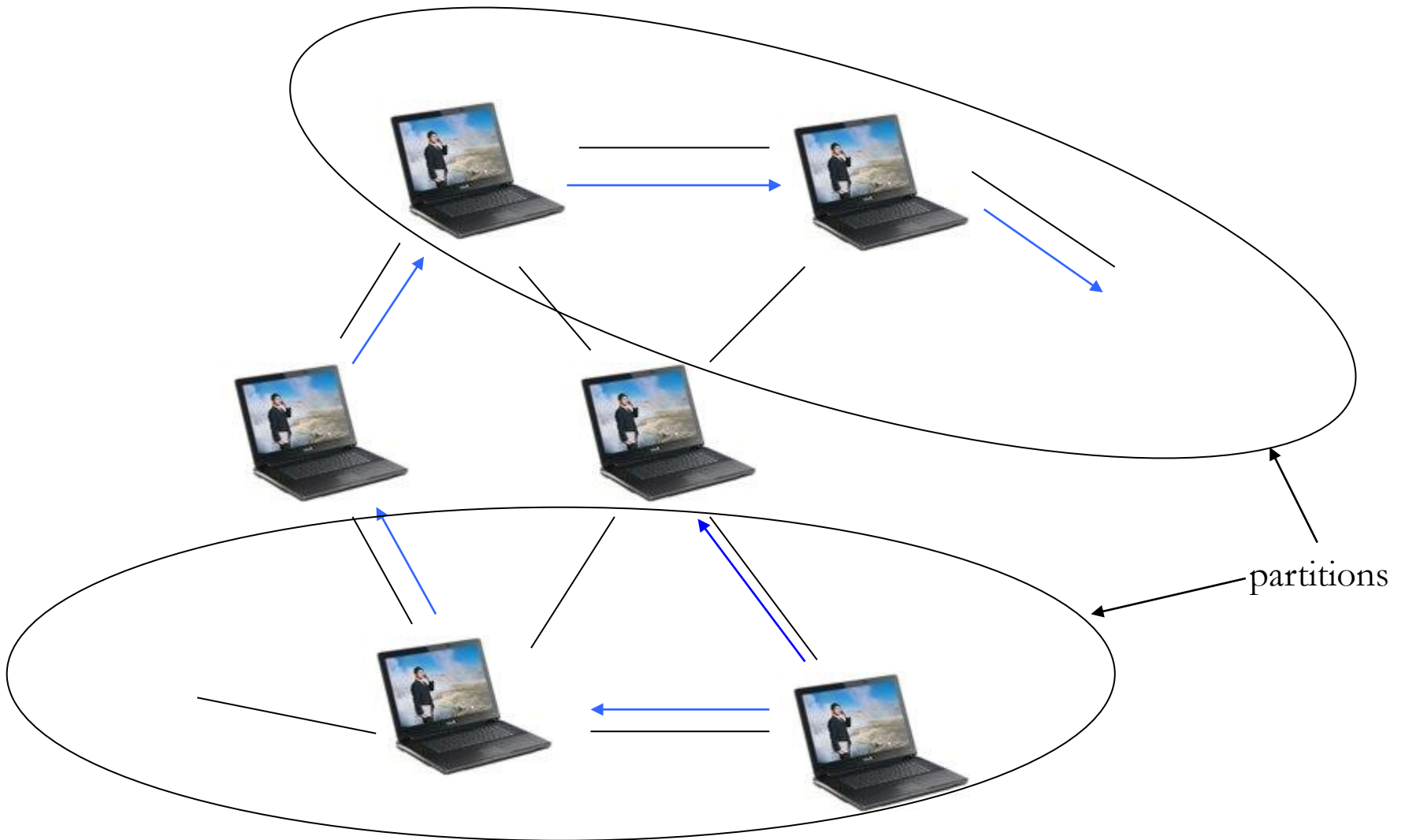
MANETs – Βασικά στοιχεία (1)

- Τα MANET αποτελούν επέκταση των WLANs
 - ❑ μπορεί να υπάρξει **επικοινωνία πολλών αλμάτων (multihop communication)**
 - αύξηση της εμβέλειας και του μεγέθους του δικτύου
 - μεγαλύτερη κινητικότητα των κόμβων
- Περισσότερες εφαρμογές
 - ❑ έκτακτη / περιστασιακή δικτύωση → ad hoc
 - ❑ απαραίτητη σημαντική κινητικότητα → mobile
 - ❑ παραδ.: δικτύωση σωμάτων ασφαλείας (law enforcement), σωστικών ομάδων (disaster relief), κλπ

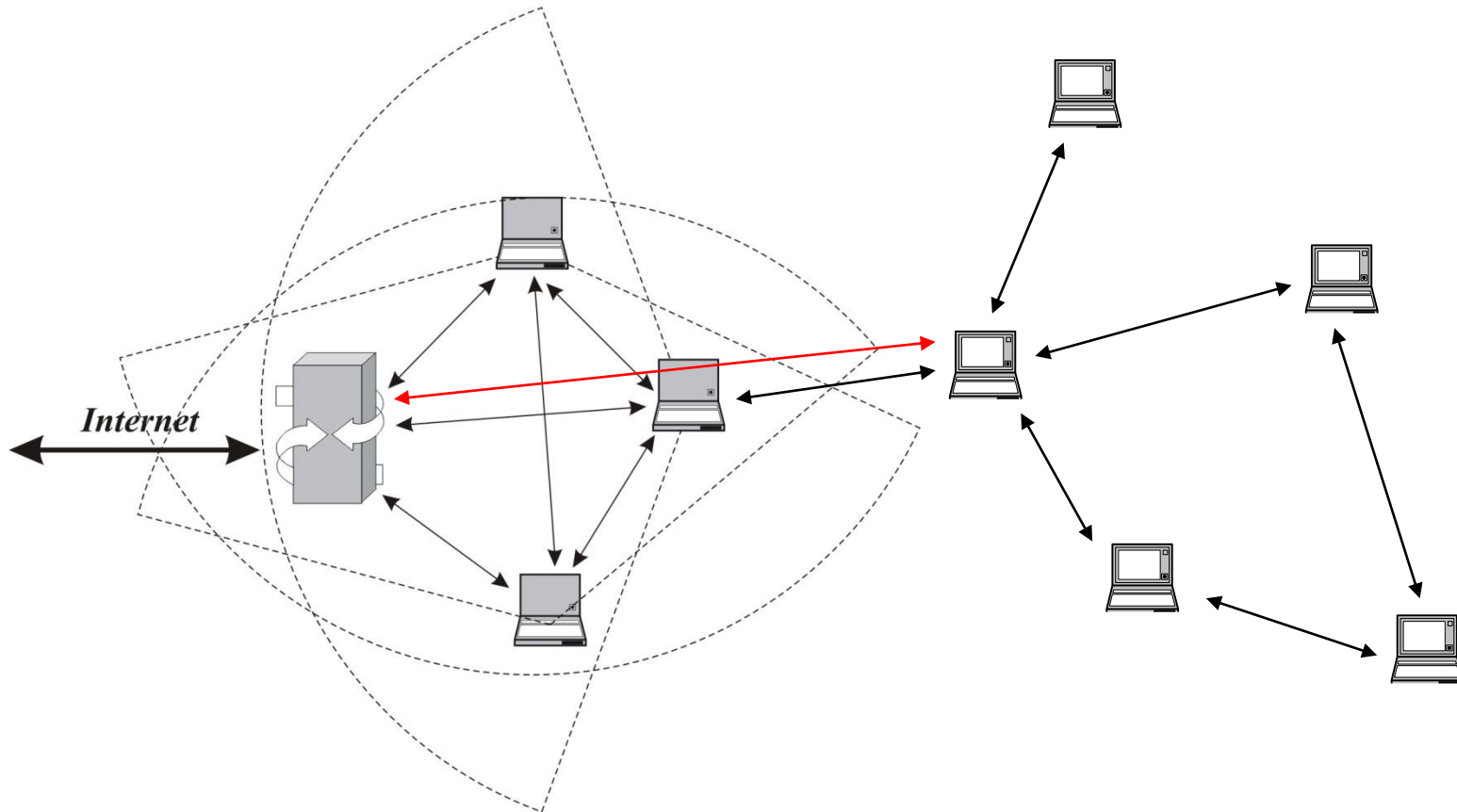
MANETs – Βασικά στοιχεία (2)

- Λειτουργία πλήρως **κατανεμημένη**
- Ένα κόμβος για να μετέχει σε ένα MANET πρέπει:
 - ❑ να αποδεχθεί ότι μπορεί να λειτουργήσει για να εξυπηρετήσει κάποιον άλλο κόμβο
 - ❑ να λειτουργεί ως δρομολογητής
 - ❑ να βρίσκεται στην εμβέλεια τουλάχιστον ενός κόμβου του MANET
 - ωστόσο μπορεί να δημιουργηθούν partitions

MANET – Τοπολογία (1)

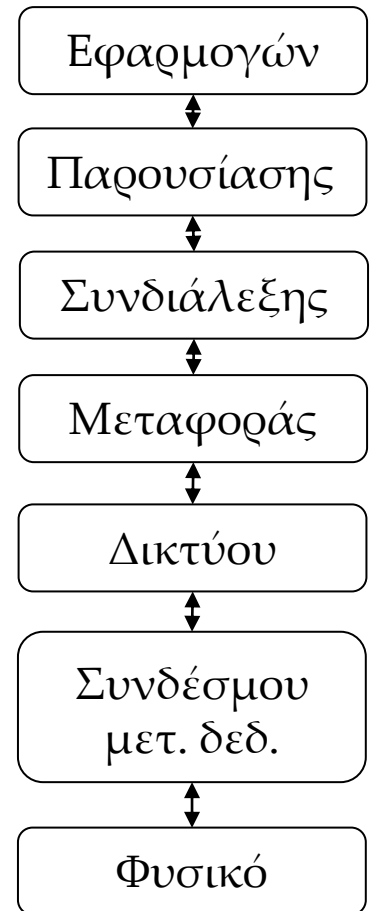
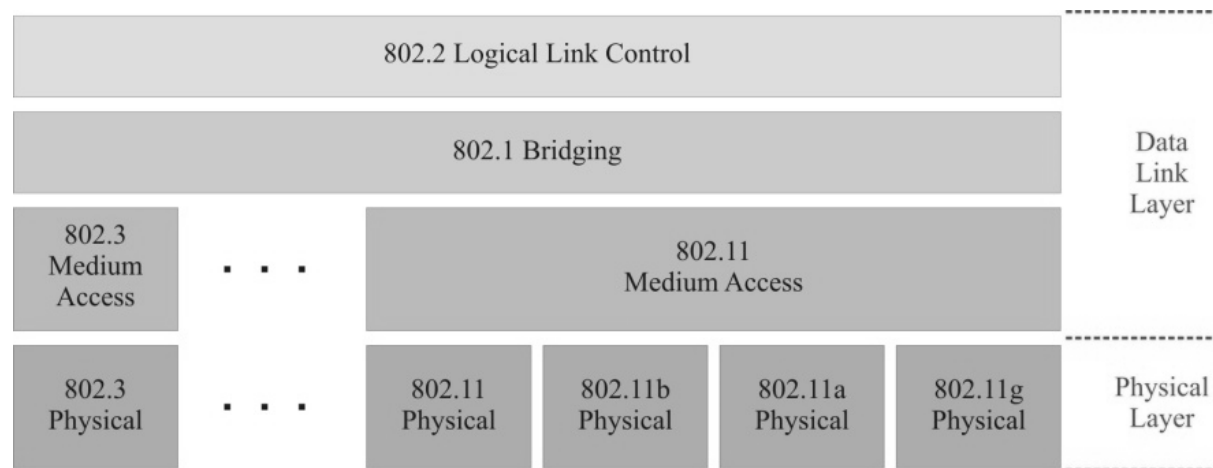


MANET – Τοπολογία (2)



Ζητήματα στα MANETs (1/4)

- MANET = WLAN + επίπεδο δικτύου +
.....
- Τα MANETs δεν έχουν προτυποποιηθεί!



Ζητήματα στα MANETs (2/4)

- Θέματα μοντελοποίησης δικτύου
 - ❑ κινητικότητα κόμβων (mobility models)
 - σε συνάρτηση με νέα σενάρια χρήσης, π.χ. social networking
 - ❑ μοντέλα επικοινωνίας κόμβων
 - σε συνάρτηση με νέες εφαρμογές και σενάρια χρήσης, π.χ. p2p εφαρμογές, social networking, κλπ
- Θέματα μετάδοσης / κοινού μέσου
 - ❑ Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πρότυπα

Ζητήματα στα MANETs (3/4)

- Θέματα επιπέδου δικτύου
 - ❑ δρομολόγηση (routing)
 - ❑ πολυδιανομή (multicasting)
 - ❑ ευρεία ειπομπή (network-layer broadcasting)
 - ❑ content-based networking – crosslayer approaches
 - ❑ opportunistic networking
 - ❑ social networking
- Θέματα ποιότητας υπηρεσιών
 - ❑ αφορούν κυρίως τα επίπεδα μεταφοράς, δικτύου και το υποεπίπεδο MAC
 - ❑ π.χ. μετάδοση video, audio

Ζητήματα στα MANETs (4/4)

- Θέματα επιπέδου μεταφοράς (TCP)
 - ❑ προσαρμογή στις συνθήκες του ασύρματου καναλιού
- Cross-layer σχεδίαση
 - ❑ σχεδίαση πρωτοκόλλων με αλληλεπίδραση λειτουργιών διαφορετικών επιπέδων
 - ❑ αφορά όλα τα πρωτόκολλα και όλα τα επίπεδα

Σχεδιαστικές Προκλήσεις (1/2)

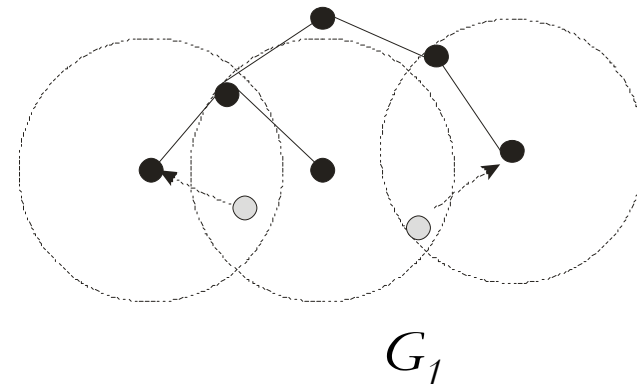
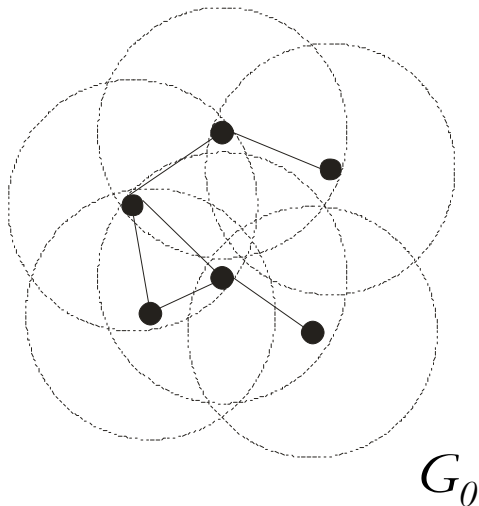
- Συχνές και **στοχαστικές** μεταβολές του δικτύου
 - ❑ κινητικότητα κόμβων
 - ❑ είσοδος / αποχώρηση κόμβων από το δίκτυο
 - ❑ μικρή και στοχαστικά μεταβαλλόμενη ακτίνα επικοινωνίας ενός κόμβου
 - φαινόμενα διαλείψεων, προσωρινές απώλειες δεδομένων, κα
- Περιορισμένοι πόροι στα τερματικά
 - ❑ υπολογιστική ισχύς
 - ❑ ενέργεια
 - ❑ αποθηκευτικός χώρος (buffers)

Σχεδιαστικές Προκλήσεις (2/2)

- Περιορισμένοι πόροι του κοινού μέσου
 - ❑ εύρος ζώνης καναλιού
- Μειωμένη απόδοση (καθυστερήση ή και απώλειες) του μηχανισμού πρόσβασης
 - ❑ υψηλός φόρτος δικτύου (μετάδοση πολλών πακέτων)
 - ❑ πυκνό δίκτυο (πολλοί γειτονικοί κόμβοι)
- Κλιμάκωση σε μεγάλα δίκτυα (Scaling)

Μοντελοποίηση MANETs (1/2)

- Ένα δίκτυο MANET μοντελοποιείται ως ένας γράφος $G_t(V_t, E_t)$
 - V_t , οι κόμβοι του δικτύου
 - E_t , οι φυσικές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων
 - σύνολο από γράφους που ο καθένας αναφέρεται σε ένα χρονικό διάστημα μεταξύ δύο μεταβολών



Μοντελοποίηση MANETs (2/2)

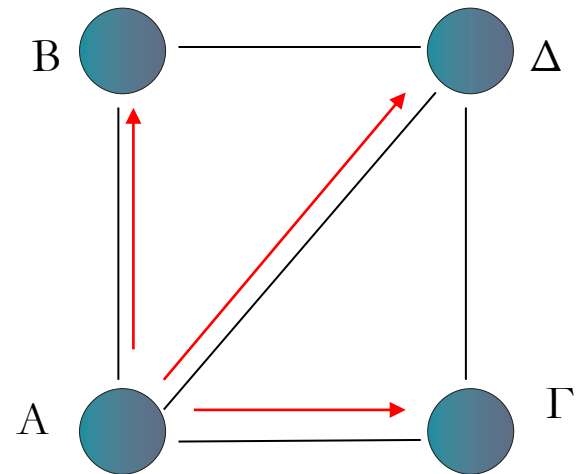
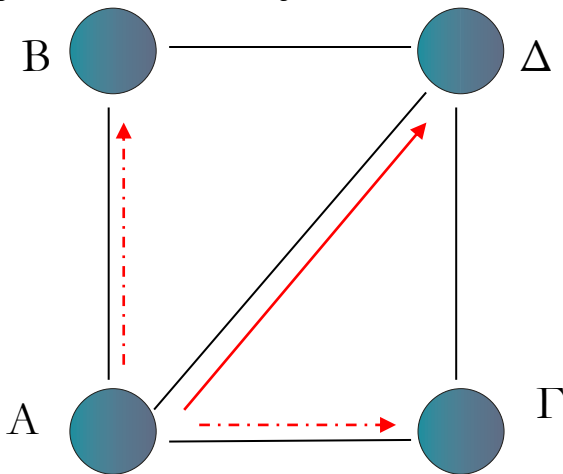
- Μια ακμή υπάρχει όταν ένας κόμβος βρίσκεται στην εμβέλεια (ακτίνα επικοινωνίας R) του άλλου
 - ❑ συνήθως όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια ακτίνα – αμφίδρομες συνδέσεις (bidirectional)
- Αν οι συνδέσεις δεν είναι αμφίδρομες (unidirectional), τότε ο γράφος είναι κατευθυνόμενος
 - ❑ διαφορετική ακτίνα επικοινωνίας κάθε κόμβου
 - ❑ διαφορετικές συνθήκες μετάδοσης σε κάθε κατεύθυνση

Μοντελοποίηση - Ορισμοί

- **Γειτονιά ενός κόμβου v , $N(v)$:** το σύνολο των κόμβων που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του
- Οι κόμβοι του συνόλου $N(v)$ βρίσκονται σε απόσταση **ενός άλματος (1-hop)** από τον v
- **Γειτονιά δύο αλμάτων, $N(N(v))$:** το σύνολο των κόμβων που ανήκουν στο σύνολο $N(v)$ είτε βρίσκονται στη γειτονιά κάποιου κόμβου που ανήκει στο $N(v)$
- **k -οστή γειτονιά του v :** οι κόμβοι που βρίσκονται το πολύ k άλματα από τον v

Μετάδοση δεδομένων - Ορισμοί

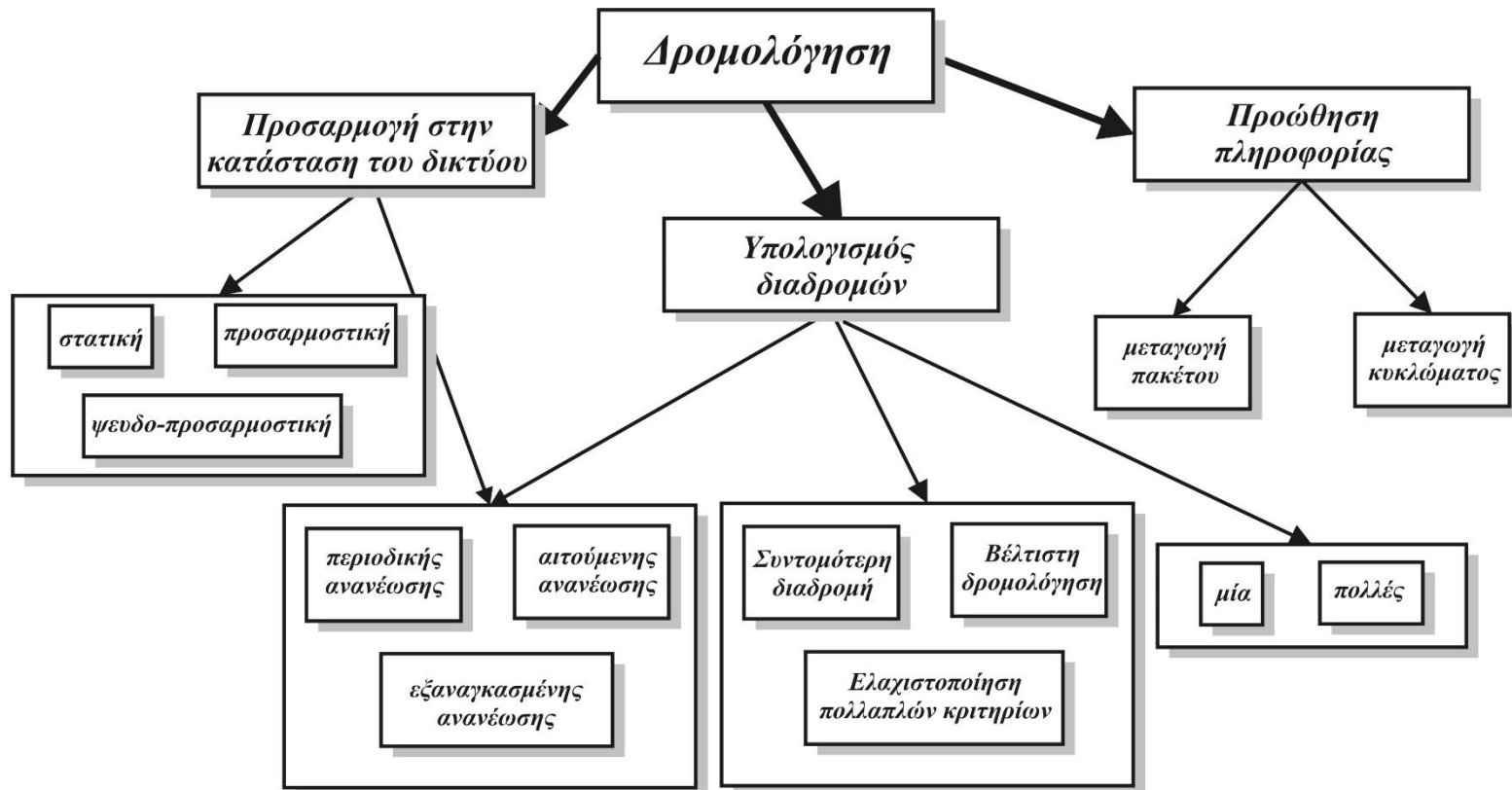
- **Unicast μετάδοση:** η μετάδοση από έναν κόμβο ενός μηνύματος που έχει έναν παραλήπτη
- **(Layer-2) Broadcast μετάδοση:** η μετάδοση από έναν κόμβο ενός πακέτου που απευθύνεται σε όλους τους πιθανούς αποδέκτες



Το πρόβλημα της δρομολόγησης (1/3)

- Στόχος της δρομολόγησης: εύρεση της *καλύτερης διαδρομής* για ένα ζεύγος πηγής-προορισμού
- Περιλαμβάνει:
 - ❑ α) αλγοριθμική επίλυση στο γράφο που μοντελοποιεί το δίκτυο
 - ❑ β) τη διαδικασία κτήσης πληροφοριών σχετικά με το δίκτυο
 - ❑ οι δύο διαδικασίες συχνά *δεν είναι ανεξάρτητες*
- Ο όρος *καλύτερη διαδρομή*
 - ❑ σχετίζεται με το κριτήριο απόδοσης του αλγόριθμου – το κόστος μιας διαδρομής
 - ❑ το κόστος μιας διαδρομής *εξαρτάται* από το κόστος των συνδέσεων που την αποτελούν

Το πρόβλημα της δρομολόγησης (2/3)



Το πρόβλημα της δρομολόγησης (3/3)

- Στα ενσύρματα δίκτυα παραδοσιακά έχουν επικρατήσει:
 - ❑ αλγόριθμοι συντομότερης διαδρομής
 - ❑ περιοδική ή εξαναγκασμένη ανανέωση
 - ❑ δύο κατηγορίες αλγόριθμων:
 - distance vector (διανυσμάτων απόστασης)
 - link state (καταστάσεων συνδέσμων)

Δρομολόγηση συντομότερης διαδρομής

- Δεδομένα:
 - ❑ κατευθυνόμενος γράφος $G(V,E)$
 - ❑ κόμβος έναρξης S , κόμβος προορισμού D
 - ❑ και το κόστος των ακμών $w:E \rightarrow \mathbb{R}$
- Κόστος διαδρομής
 - ❑ *άθροισμα* του κόστους κάθε ακμής που αποτελούν τη διαδρομή
 - ❑ το κόστος της ακμής ονομάζεται *προσθετικό κόστος* (*additive cost*)
- Ζητούμενο:
 - ❑ διαδρομή με μικρότερο κόστος
- Αν το κόστος των ακμών δεν είναι προσθετικό τότε η δρομολόγηση *δεν είναι* συντομότερης διαδρομής

Distance Vector Routing (1/2)

- Κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης (RT) με εγγραφές που περιέχουν:
 - ❑ κόμβος προορισμό, επόμενο άλμα, κόστος διαδρομής
- Κάθε κόμβος:
 - ❑ αποστέλλει τον RT *περιοδικά* μόνο στους γείτονές του
 - οι ενημερώσεις των γειτόνων μπορεί να είναι ασύγχρονες
 - ❑ ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης ανάλογα με τα μηνύματα που λαμβάνει από τους γείτονες

Distance Vector Routing (2/2)

- Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν δεν υπάρχουν αλλαγές στο πίνακα RT
 - ❑ σύγκλιση αλγόριθμου
- Προβλήματα:
 - ❑ αργή σύγκλιση ανάλογα με τις συνθήκες στο δίκτυο
 - προβληματικός σε γρήγορα μεταβαλλόμενο δίκτυο
 - ❑ count-to-infinity problem

Link State Routing (1/2)

- Οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα που περιγράφουν συνδέσεις (links) του δικτύου
 - ❑ τα πακέτα ονομάζονται Link state packets (LSP)
 - ❑ η ανταλλαγή γίνεται περιοδικά
- Κάθε LSP περιέχει
 - ❑ διεύθυνση του κόμβου που το δημιούργησε
 - ❑ κόστος όλων των συνδέσεων του κόμβου που το δημιούργησε
 - ❑ έναν ακολουθιακό αριθμό (αυξάνεται σε κάθε ενημέρωση)
- Τα LSPs διαδίδονται προς όλους τους κόμβους του δικτύου
 - ❑ με πλημμύρα

Link State Routing (2/2)

➤ Κάθε κόμβος:

- ❑ αποθηκεύει το τελευταίο LSP από κάθε άλλο κόμβο του δικτύου
- ❑ χρησιμοποιεί έναν κεντρικοποιημένο αλγόριθμο για να εξάγει τις συντομότερες διαδρομές

➤ Προβλήματα:

- ❑ σημαντικό φορτίο δρομολόγησης

Δρομολόγηση σε MANET (1/3)

➤ Προκλήσεις

- ❑ προσαρμογή στις συχνές και στοχαστικές μεταβολές της τοπολογίας του δικτύου
 - κινητικότητα κόμβων, σχετικά μικρή ακτίνα επικοινωνίας, διακοπτόμενη λειτουργία των κόμβων, ατέλειες του καναλιού
- ❑ εξοικονόμηση περιορισμένων πόρων του συστήματος
 - σχετικά μικρό εύρος ζώνης καναλιού (bandwidth)
 - ❑ κόστος μετάδοσης (ανταγωνισμός)
 - περιορισμένοι πόροι σε κάθε τερματικό
 - ❑ π.χ., ενέργεια, υπολογιστική ισχύς

Δρομολόγηση σε MANET (2/3)

➤ Προκλήσεις

❑ κατανεμημένη λειτουργία

- σύγκλιση αλγόριθμου, συγχρονισμός κόμβων, κλπ

❑ bidirectional-unidirectional links

❑ ατέλειες μετάδοσης

- μηνύματα μπορεί να χαθούν παρά το γεγονός ότι μια σύνδεση υπάρχει

Δρομολόγηση σε MANET (3/3)

➤ Trade off: *κόστος vs ακρίβεια* αλγόριθμου

❑ κόστος αλγόριθμου

- συνδέεται με τη συλλογή δεδομένων για την κατάσταση του δικτύου
- μετριέται σε: αριθμό μηνυμάτων δρομολόγησης, ισχύ που καταναλώνει ένας κόμβος, κλπ

❑ ακρίβεια αλγόριθμου: ικανότητα να παραδίδει σωστά τα μηνύματα στον προορισμό

- η επιτυχία του αλγόριθμου δρομολόγησης δεν είναι δεδομένη
 - ❑ εξαρτάται από την ικανότητα του αλγόριθμου να προσαρμόζεται στην κατάσταση του δικτύου

❑ καθυστέρηση εύρεσης μιας διαδρομής

Κατηγορίες Πρωτοκόλλων για MANET (1/2)

- Έχει προταθεί πληθώρα πρωτοκόλλων [Abolhasan et al., 2004]
 - ❑ ορισμένα σχεδιάστηκαν ειδικά για MANETs, ενώ άλλα είναι διασκευές γνωστών πρωτοκόλλων
 - ❑ κανένα πρωτόκολλο δεν λειτουργεί καλά για όλες τις πιθανές συνθήκες

Κατηγορίες Πρωτοκόλλων για MANET (2/2)

- Τρεις μεγάλες κατηγορίες
 - ❑ Proactive
 - ❑ On-demand
 - ❑ Hybrid
- Υπάρχουν και άλλες κατηγοριοποιήσεις
 - ❑ π.χ. Location-based protocols, energy-efficient protocols, κλπ

Proactive Protocols

- Εκτελούνται περιοδικά
 - ❑ και ανεξάρτητα από τα διακινούμενα πακέτα
 - ❑ κάθε κόμβος διατηρεί διαδρομές για κάθε άλλο κόμβο του δικτύου
- Ανήκουν σε μια από τις κατηγορίες
 - ❑ Distance Vector, Link State, ή συνδυασμό των δύο
- Χαρακτηριστικά
 - ❑ χαμηλή καθυστέρηση εύρεσης διαδρομής
 - ❑ υψηλό κόστος υλοποίησης
- Σημαντικότεροι αλγόριθμοι
 - ❑ Destination-Sequenced Distance Vector, (DSDV)
 - ❑ Optimized Link State Routing, (OLSR)

On-demand Protocols

- Διαδρομές ανακαλύπτονται και διατηρούνται μόνο όταν χρειάζονται
- Χαρακτηριστικά
 - ❑ σχετικά υψηλή καθυστέρηση ανακάλυψης μιας διαδρομής
 - ❑ σχετικά χαμηλό κόστος υλοποίησης
 - εξαρτάται από το ποσό διακινούμενων δεδομένων
- Σημαντικότερα πρωτόκολλα
 - ❑ Dynamic Source Routing (DSR)
 - ❑ Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV)
 - ❑ Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)

Hybrid Protocols

- Συνδυασμός των δύο προηγούμενων κατηγοριών
- Σημαντικότερα πρωτόκολλα
 - ❑ Zone Routing Protocol (ZRP)
 - ❑ Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) (1/2)

[Perkins and Bhagwat, 1994]

- Κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης με εγγραφές που περιέχουν:
 - ❑ επόμενο άλμα προς τον προορισμό (next hop)
 - ❑ το κόστος της διαδρομής
 - ❑ έναν ακολουθιακό αριθμό που δημιουργείται από τον προορισμό
 - οι ακολουθιακοί αριθμοί χρησιμοποιούνται για να μην σχηματίζονται βρόχοι (loops)
- Κάθε κόμβος *περιοδικά* αποστέλλει τον πίνακα δρομολόγησης σε όλους τους γείτονές του
 - ❑ κάθε κόμβος αυξάνει τον ακολουθιακό του αριθμό και τον ενσωματώνει στο μήνυμα

Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) (2/2)

- Έστω ο κόμβος A λαμβάνει μια ενημέρωση από τον κόμβο B
 - ❑ $S(C, A)$: ακολουθιακός αριθμός του κόμβου C που γνωρίζει ο A
 - ❑ $S(C, B)$: ακολουθιακός αριθμός του κόμβου C που γνωρίζει ο B
- Ο κόμβος A:
 - ❑ αν $S(C, A) > S(C, B)$ ή $(S(C, A) = S(C, B) \ \&\& \ \text{Cost}(C, A) \leq \text{Cost}(C, B))$
 - αγνοεί την ενημέρωση του B
 - ❑ αν $S(C, A) < S(C, B)$ ή $(S(C, A) = S(C, B) \ \&\& \ \text{Cost}(C, A) > \text{Cost}(C, B))$,
 - $NH(C) = B, S(C, A) = S(C, B)$

Dynamic Source Routing (DSR) (1/2)

[Johnson and Maltz, 1996]

- Ανήκει στην κατηγορία των on-demand πρωτοκόλλων
 - ❑ το πρωτόκολλο ενεργοποιείται όταν ένας κόμβος S επιθυμεί να στείλει δεδομένα σε έναν κόμβο D και μια έγκυρη διαδρομή δεν είναι γνωστή
 - ❑ βασική ιδέα: δυναμική ανακάλυψη διαδρομής
- Κάθε κόμβος διατηρεί μια λανθάνουσα μνήμη (*route cache*)
 - ❑ στην μνήμη αποθηκεύονται ολόκληρες διαδρομές που ο κόμβος ανακαλύπτει

Dynamic Source Routing (DSR) (2/2)

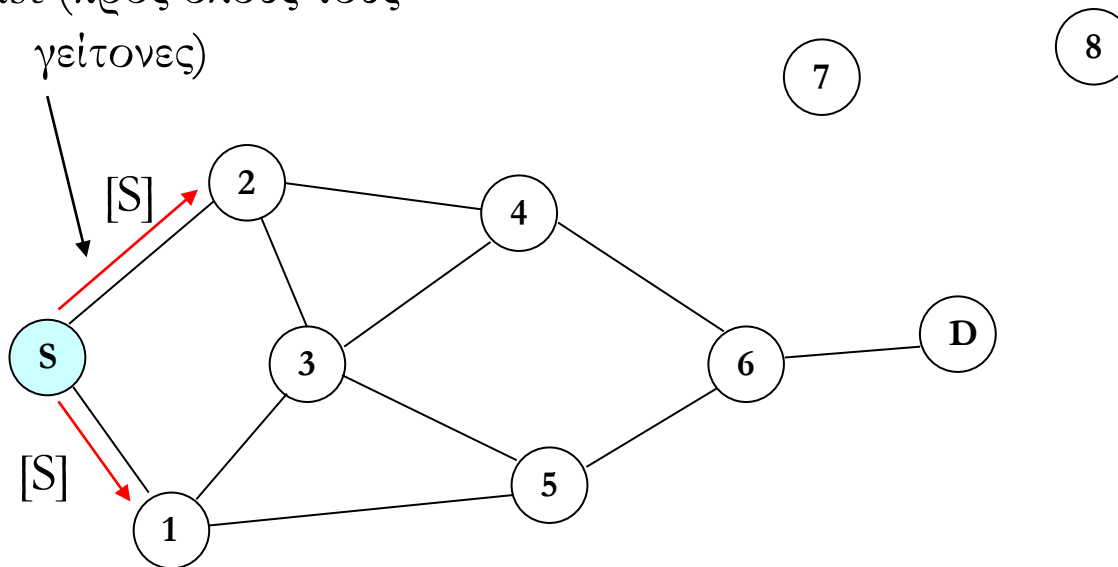
- Βασικοί μηχανισμοί:
 - ❑ αναζήτηση του κόμβου D στο δίκτυο (route request)
 - ❑ απάντηση από τον κόμβο D (route reply)
 - ❑ αποθήκευση της πληροφορίας που συγκεντρώθηκε σχετικά με τη διαδρομή S-D
 - ❑ διαχείριση-διατήρηση των αποθηκευμένων διαδρομών (route maintenance)

DSR – Route Request (1 / 4)

- Διαδικασία αναζήτησης διαδρομής (*route request*)
 - ❑ ο κόμβος S διαδίδει με πλημμύρα (*floods*) ένα μήνυμα *route request* (RREQ)
 - πλημμύρα: μόνος ασφαλής τρόπος ώστε να λάβουν το μήνυμα όλοι (?) οι κόμβοι
 - RREQ: περιέχει έναν μοναδικό αριθμό ακολουθίας (*sequence number*)
 - ❑ κάθε ενδιαμέσος κόμβος προωθεί το μήνυμα RREQ
 - κάθε κόμβος μπορεί να λάβει πολλά αντίτυπα του μηνύματος RREQ
 - προωθεί μόνο το πρώτο αντίτυπο του μηνύματος που λαμβάνει (γιατί?)
 - ❑ κάθε ενδιαμέσος κόμβος αποθηκεύει τη διεύθυνσή του στο πακέτο RREQ

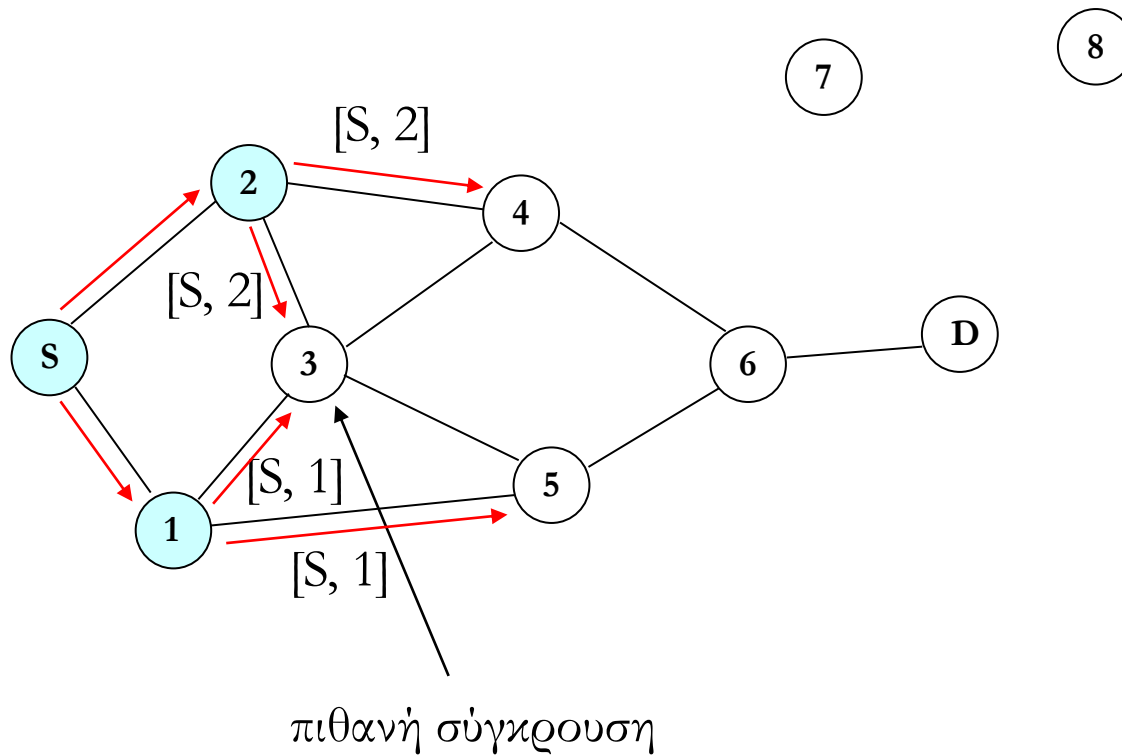
DSR – Route Request (2/4)

μετάδοση broadcast ή layer-2
broadcast (προς όλους τους
γείτονες)

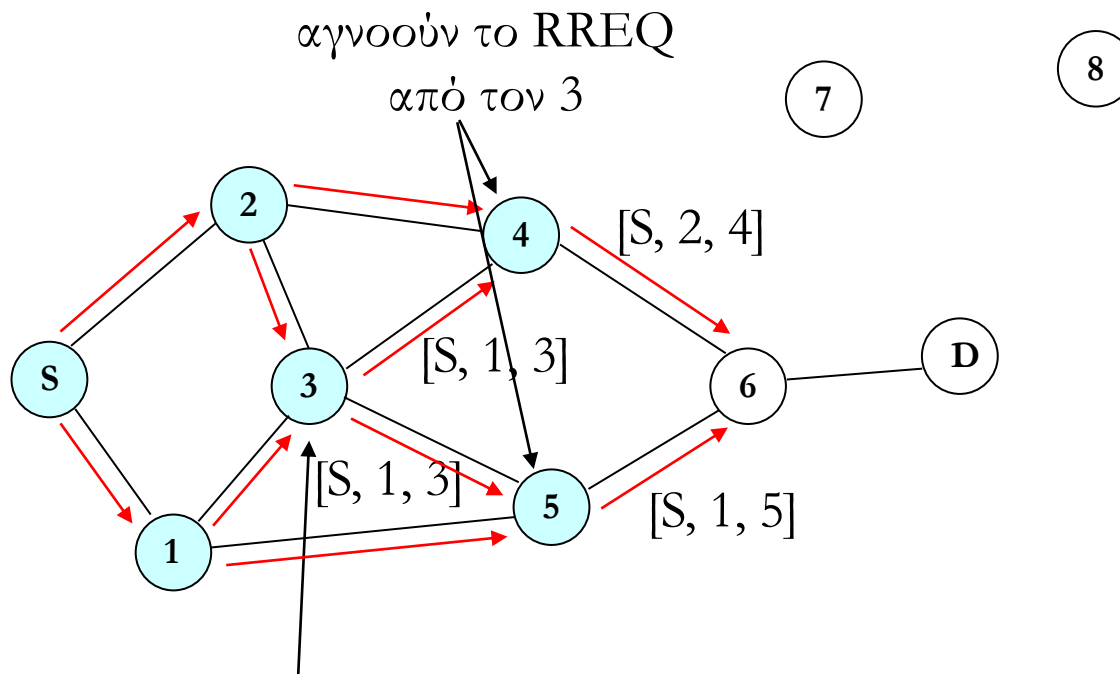


● : κόμβος που έχει λάβει το μήνυμα RREQ

DSR – Route Request (2/4)

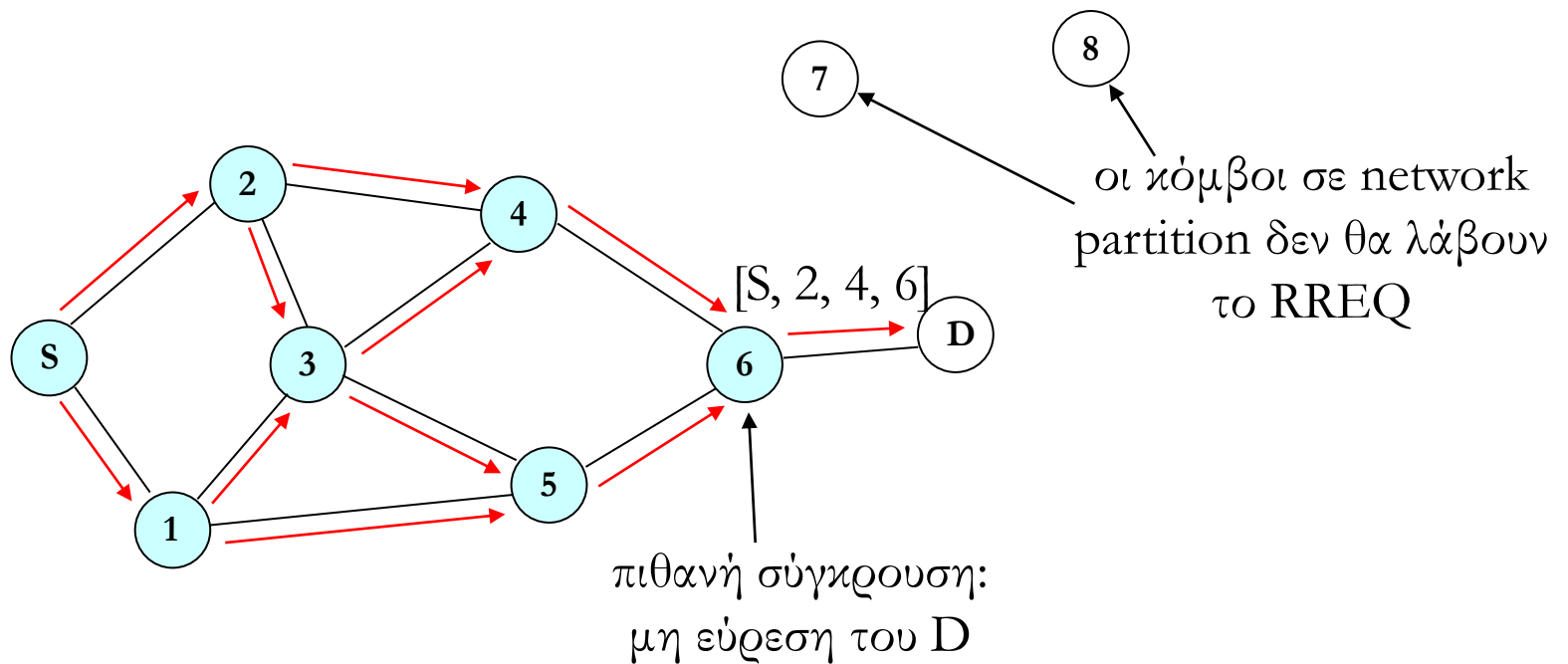


DSR – Route Request (2/4)



Ο κόμβος 3 αναμεταδίδει μόνο το χρονικά πρώτο αντίτυπο του RREQ

DSR – Route Request (2/4)



DSR – Route Request (3/4)

➤ Ζητήματα

- ❑ σημαντικός φόρτος λόγω πλημμύρας
- ❑ το μήνυμα RREQ μπορεί να μην παραδοθεί στον κόμβο D
 - σύγκρουση διπλότυπων μηνυμάτων RREQ
 - ο κόμβος D βρίσκεται σε network partition
- ❑ προώθηση μόνο πρώτου αντιτύπου: *αποφυγή σχηματισμού βρόχων (loop formation)*
 - χρήση αριθμών ακολουθίας (διαχείριση)
 - μόνο δρομολόγηση συντομότερης διαδρομής

DSR – Route Request (4/4)

➤ Λύσεις

❑ φόρτος πλημμύρας

- expanding ring search
 - ❑ τα μηνύματα RREQ αποστέλλονται αρχικά με μικρό TTL
 - ❑ σε περίπτωση αποτυχίας: επανάληψη με μεγαλύτερο TTL
- δυνατότητα απάντησης από ενδιάμεσους κόμβους
- efficient flooding (???)

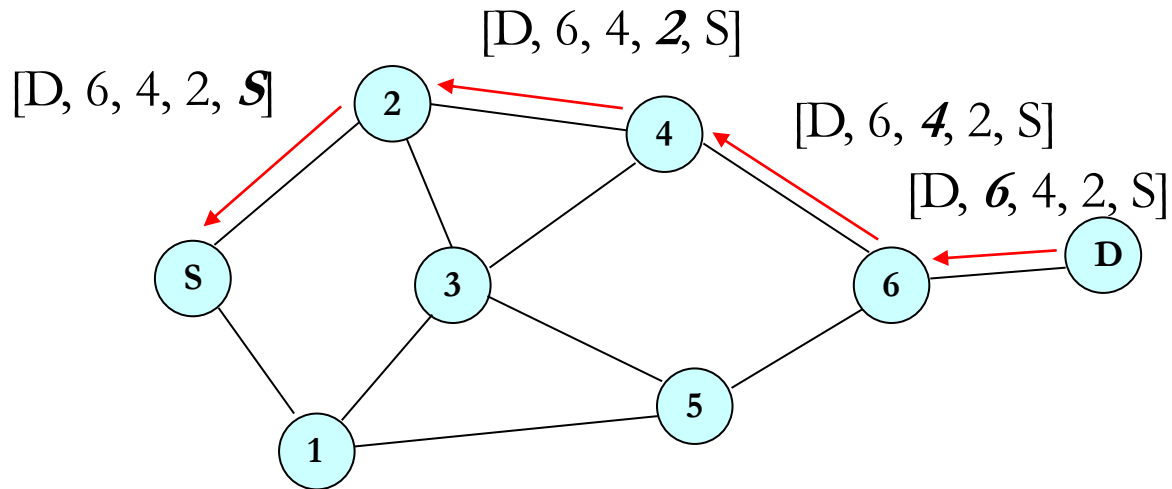
❑ αποτυχία εύρεσης κόμβου

- επανάληψη μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (timeout)
- χρονική καθυστέρηση προωθήσεων μηνυμάτων RREQ

DSR – Route Reply (1 / 3)

- Όταν το πακέτο RREQ φτάσει στον κόμβο D
 - ❑ η διαδρομή S-D υπάρχει καταγεγραμμένη στο πακέτο RREQ
 - η διαδρομή D-S παράγεται από την αναστροφή της S-D (?)
 - ❑ ο κόμβος D εκκινεί τη διαδικασία *route reply*
 - μόνο για το πρώτο αντίτυπο του RREQ που θα λάβει (γιατί?)
- Route Reply
 - ❑ ο κόμβος D δημιουργεί ένα μήνυμα RREP
 - το μήνυμα περιέχει τη διαδρομή D-S
 - ❑ το μήνυμα RREP διαδίδεται προς τα πίσω με βάση τη διαδρομή που περιέχει

DSR – Route Reply (2/3)



DSR – Route Reply (3/3)

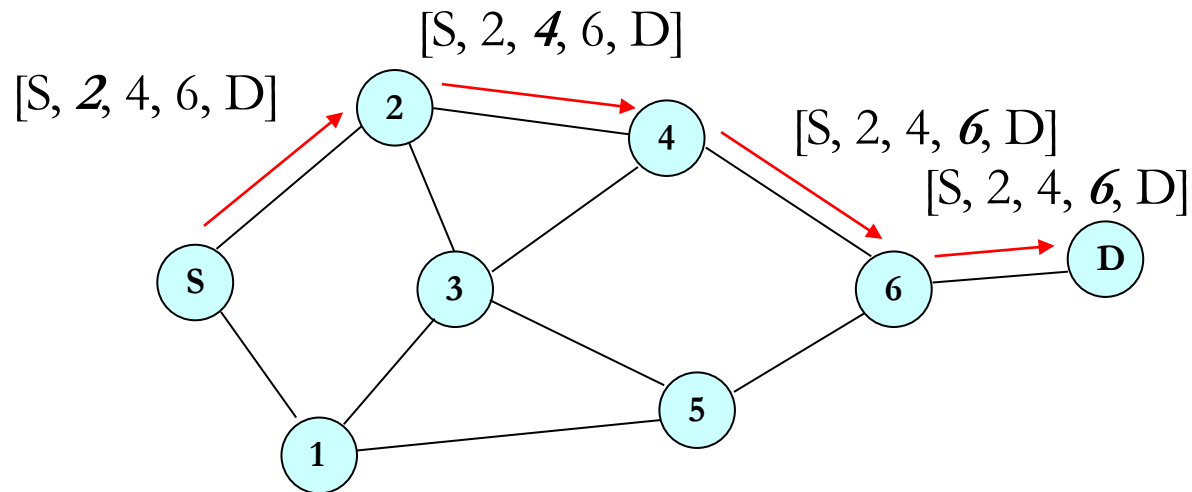
➤ Ζητήματα

- ❑ το πρωτόκολλο DSR λειτουργεί για bidirectional links
 - στην περίπτωση του IEEE 802.11 οι συνδέσεις πρέπει να είναι bidirectional: δυνατή η χρήση ACKs
- ❑ στην περίπτωση που υπάρχουν unidirectional links
 - ο κόμβος D πρέπει να χρησιμοποιήσει μια ήδη γνωστή διαδρομή προς τον S
 - αν δεν υπάρχει, πρέπει να ξεκινήσει μια διαδικασία route request
- ❑ μία απάντηση από τον κόμβο D: μόνο δρομολόγηση συντομότερης διαδρομής (shortest path routing)
 - συντομότερης = με μικρότερη συνολική καθυστέρηση

DSR – Δρομολόγηση δεδομένων (1/3)

- Αποστολή δεδομένων στον D: ο S εισάγει όλη τη διαδρομή στο πακέτο δεδομένων
 - ❑ η τεχνική είναι γνωστή ως **source routing**
 - ❑ το μέγεθος του πακέτου μεγαλώνει με το μέγεθος της διαδρομής
- Οι ενδιάμεσοι κόμβοι χρησιμοποιούν τη διαδρομή για να καθορίσουν το επόμενο άλμα (next hop)

DSR – Δρομολόγηση δεδομένων (2/3)



DSR – Δρομολόγηση δεδομένων (3/3)

➤ Ζητήματα

- ❑ το μέγεθος των πακέτων μεγαλώνει με το μέγεθος της διαδρομής

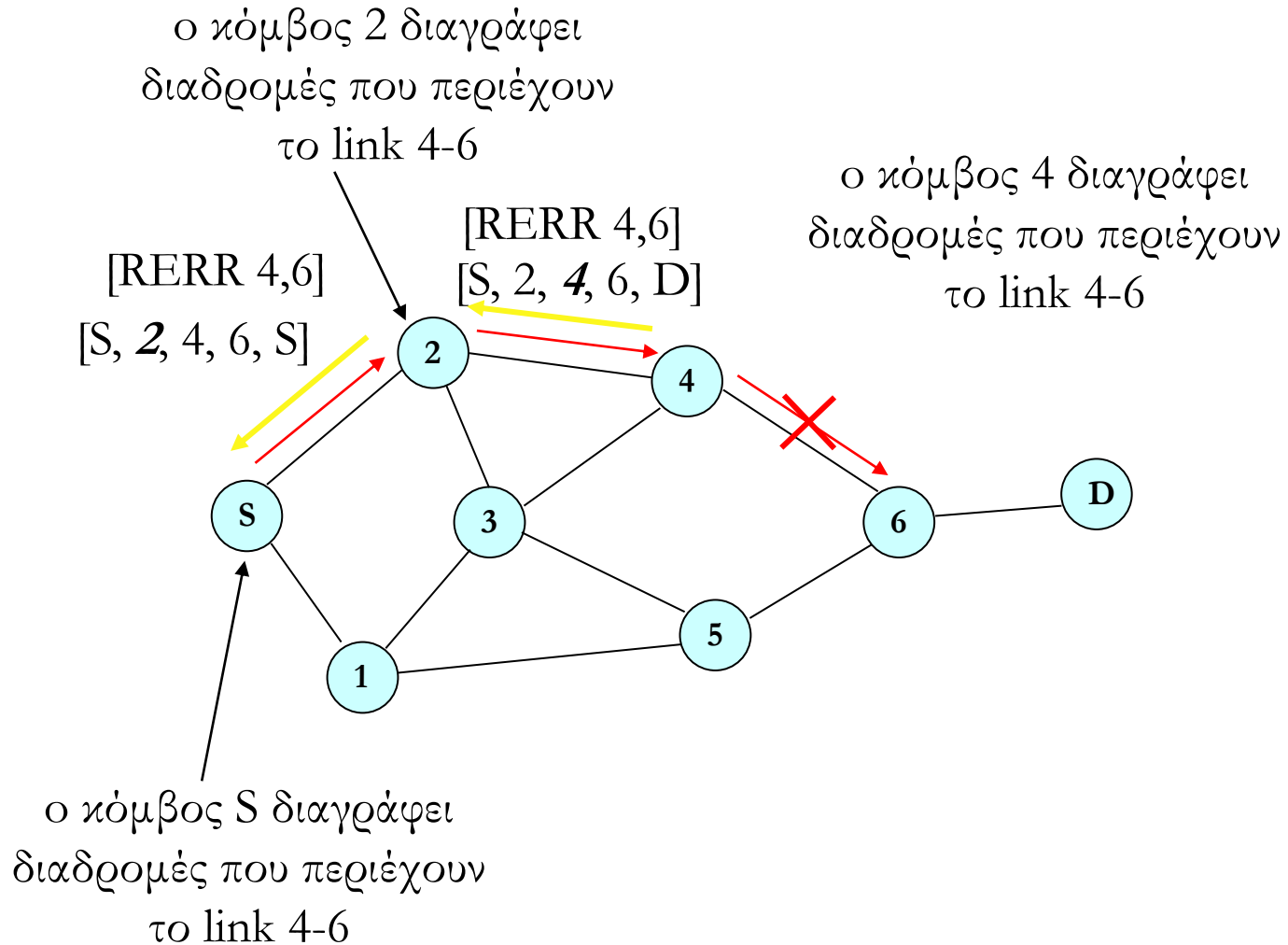
DSR – Αποθήκευση διαδρομών

- Ο κόμβος S αποθηκεύει τη διαδρομή που ανακαλύφθηκε (προς τον κόμβο D , π.χ. $[S,2,4,6,D]$
 - ❑ μπορεί να χρησιμοποιήσει όλες τις διαδρομές για ενδιάμεσους κόμβους, π.χ. $[S,2,4]$
- Οι ενδιάμεσοι κόμβοι αποθηκεύουν:
 - ❑ τη διαδρομή προς τον κόμβο S (κατά τη διάρκεια της διαδικασίας route request), π.χ. ο κόμβος 4 την $[4,2,S]$
 - ❑ τη διαδρομή προς τον κόμβο D (κατά τη διάρκεια της διαδικασίας route reply), π.χ. ο κόμβος 4 την $[4,6,D]$
- Ο κόμβος D αποθηκεύει τη διαδρομή προς τον κόμβο S , π.χ. $[D,6,4,2,S]$
- Ένας κόμβος μπορεί να μάθει διαδρομές και από πακέτα δεδομένων που προωθεί ή ακούει

DSR – Route Maintenance (1/3)

- Η κινητικότητα των κόμβων μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή μιας διαδρομής (καταστροφή link)
- Η διαδρομή πρέπει να διαγραφεί από τις μνήμες που έχει αποθηκευτεί
 - ❑ ο κόμβος που **ανιχνεύει** την καταστροφή αποστέλλει ένα μήνυμα Route Error (περιέχει το link)
 - ❑ όλοι οι κόμβοι που λαμβάνουν το μήνυμα, διαγράφουν διαδρομές με τη συγκεκριμένη σύνδεση

DSR – Route Maintenance (2/3)



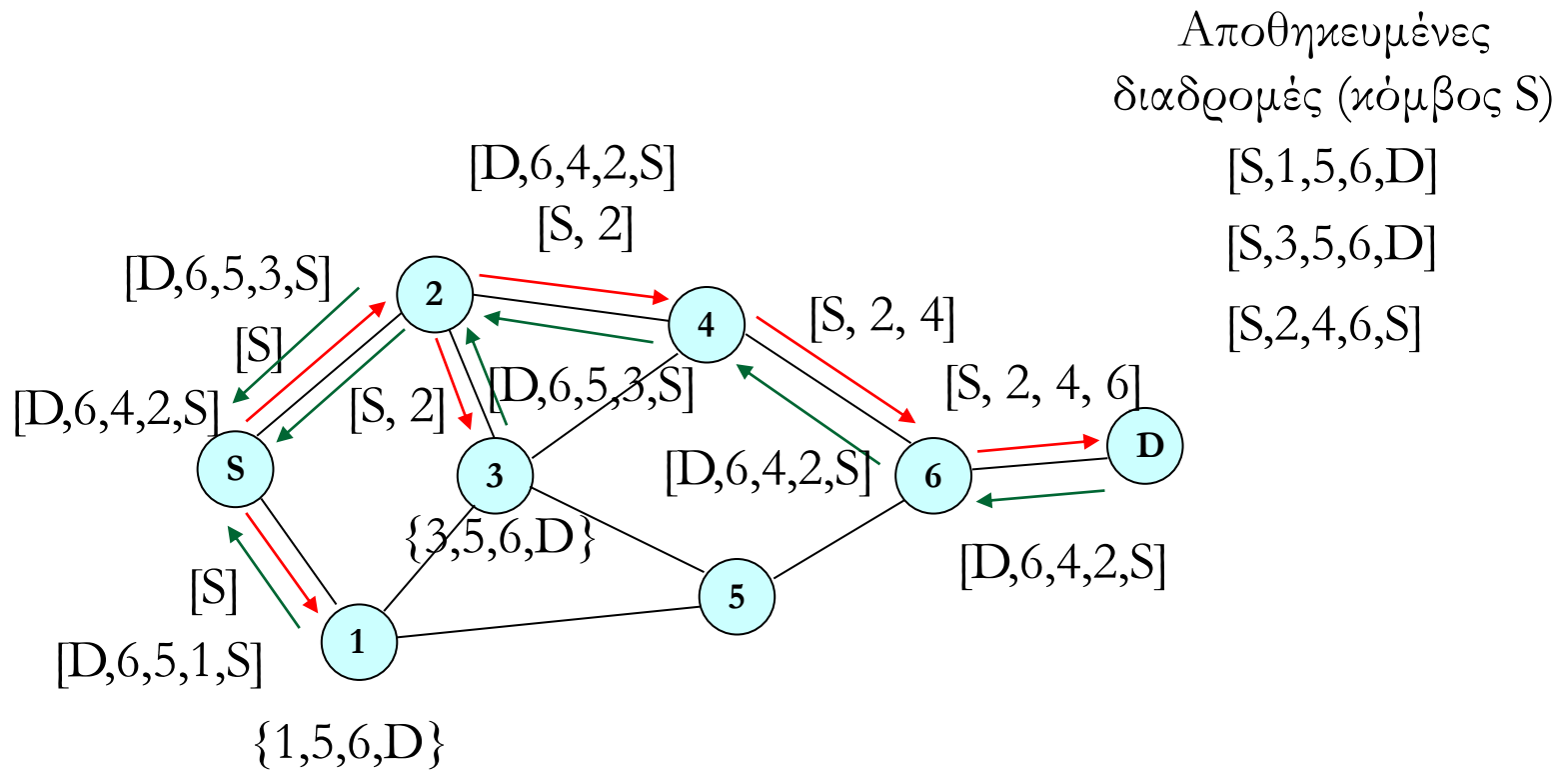
DSR – Route Maintenance (3/3)

- Η διαγραφή των διαδρομών δεν είναι πλήρης (γιατί?)
 - ❑ ύπαρξη άκυρων εγγραφών στην κρυφή μνήμη ενός κόμβου (Stale Routing Information Problem)
 - ❑ Λύσεις:
 - ο κόμβος S αποστέλλει (piggyback) το Route Error στο επόμενο route request
 - μηχανισμοί για απαλοιφή άκυρων εγγραφών
 - ❑ static timeouts
 - ❑ adaptive timeouts based on link stability

DSR – Reply from Cache (1/4)

- Κάθε ενδιαμέσος κόμβος που γνωρίζει μια διαδρομή προς τον D μπορεί να απαντήσει
 - ❑ δημιουργία μηνύματος RREP (περιέχει και την αποθηκευμένη διαδρομή)
 - ❑ η προώθηση του μηνύματος RREQ σταματά

DSR – Reply from Cache (2/4)



{ } : αποθηκευμένη διαδρομή

DSR – Reply from Cache (3/4)

➤ Πλεονεκτήματα

- ❑ μείωση των διπλότυπων μηνυμάτων RREQ (routing overhead)
- ❑ συντομότερος χρόνος ανακάλυψης μιας διαδρομής
- ❑ ανακάλυψη πολλαπλών διαδρομών

➤ Μειονεκτήματα

- ❑ διασπορά μη έγκυρων αποθηκευμένων διαδρομών
- ❑ συμφόρηση λόγω πολλών απαντήσεων από κόμβους που γνωρίζουν μια διαδρομή
 - *route reply storm problem*

DSR – Reply from Cache (4/4)

➤ Λύσεις

- ❑ τυχαία χρονική καθυστέρηση των απαντήσεων
- ❑ κόμβοι που γνωρίζουν μια διαδρομή δεν απαντάνε αν ακούσουν να απαντά κάποιος άλλος κόμβος με μια μικρότερη διαδρομή

DSR – Extensions

➤ Promiscuous operation

- ❑ Οι κόμβοι «ακούν» το φυσικό μέσο για να αντλήσουν πληροφορίες από τα μηνύματα (data ή route messages) που διαδίδονται
- ❑ «ακούν» : καταγράφουν τις μεταδόσεις πακέτων ανεξάρτητα από τον προορισμό τους

➤ Packet Salvaging / Local Route Repair

- ❑ ο κόμβος που ανιχνεύει μια κατεστραμμένη διαδρομή προσπαθεί να «βρει» μια διαδρομή προς τον προορισμό

Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing (AODV)

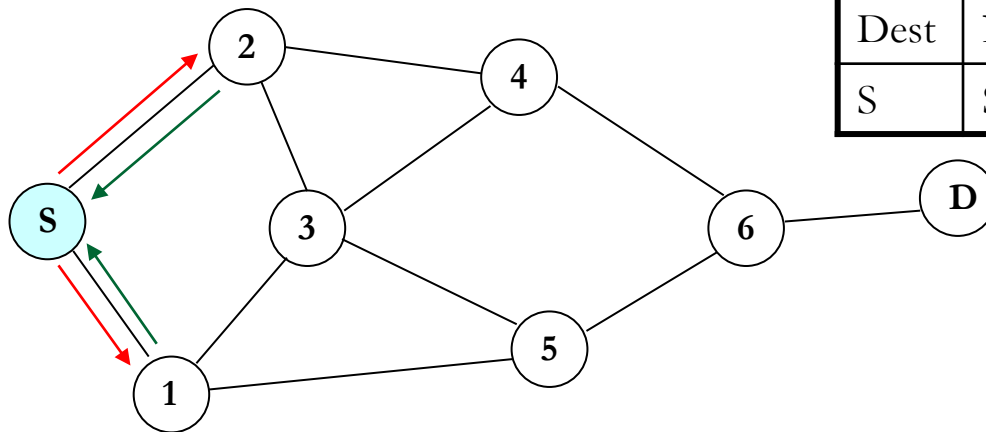
[Perkins and Royer, 2001]

- Ανήκει στην κατηγορία των on-demand πρωτοκόλλων
 - ❑ βασική λειτουργία για ανακάλυψη διαδρομών: ίδια με το DSR
 - ❑ δεν χρησιμοποιεί την τεχνική source routing
 - hop-by-hop δρομολόγηση
 - ❑ οι κόμβοι διατηρούν πίνακες δρομολόγησης και όχι route caches
 - ❑ η χρήση των αριθμών ακολουθίας (sequence numbers) επεκτείνεται
 - χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ηλικία των διαδρομών

AODV – Route Request (1/2)

- Το πακέτο RREQ διαδίδεται όπως και στο DSR
- Όταν ένας κόμβος προωθεί το μήνυμα RREQ
 - δημιουργεί μια διαδρομή (εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης) προς τον κόμβο S (*reverse path*)
 - υποθέτει bidirectional links

AODV – Route Request (2/2)



RT in 1

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	S	1	105

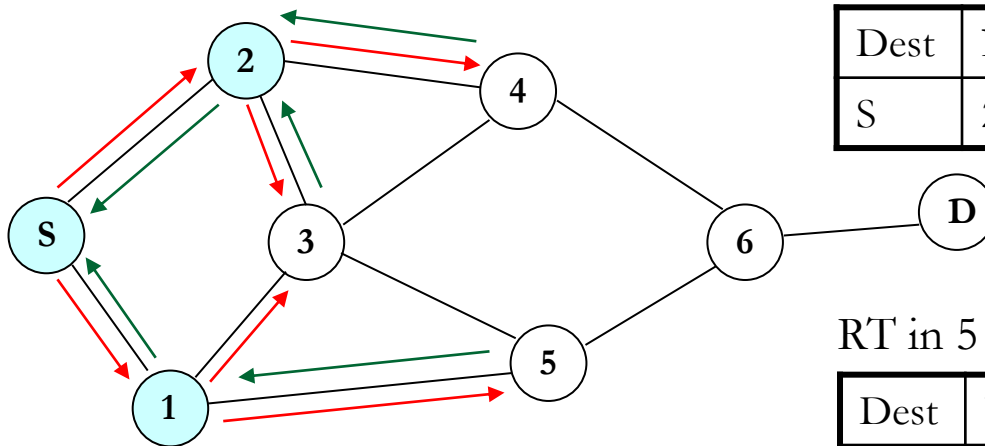
RT in 2

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	S	1	105

● : κόμβος που έχει λάβει το μήνυμα RREQ

→ : link in reverse path

AODV – Route Request (2/2)



RT in 3

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	2	2	105

RT in 4

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	2	2	105

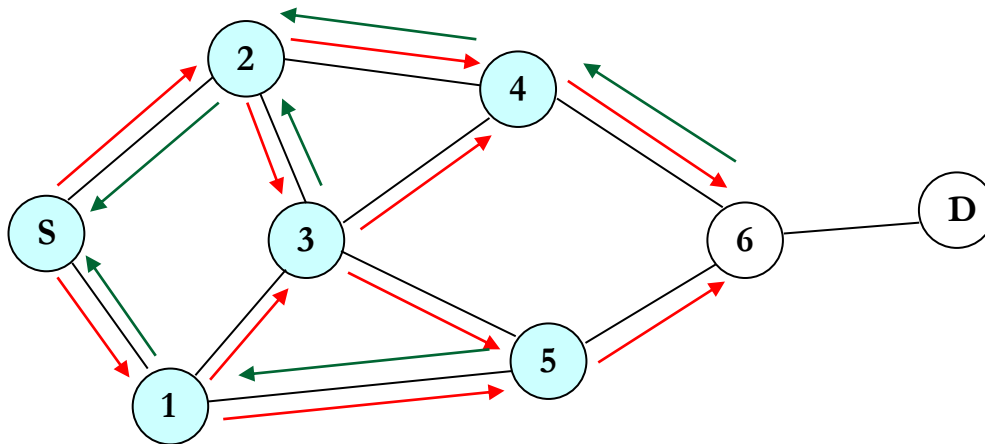
RT in 5

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	1	2	105

AODV – Route Request (2/2)

RT in 6

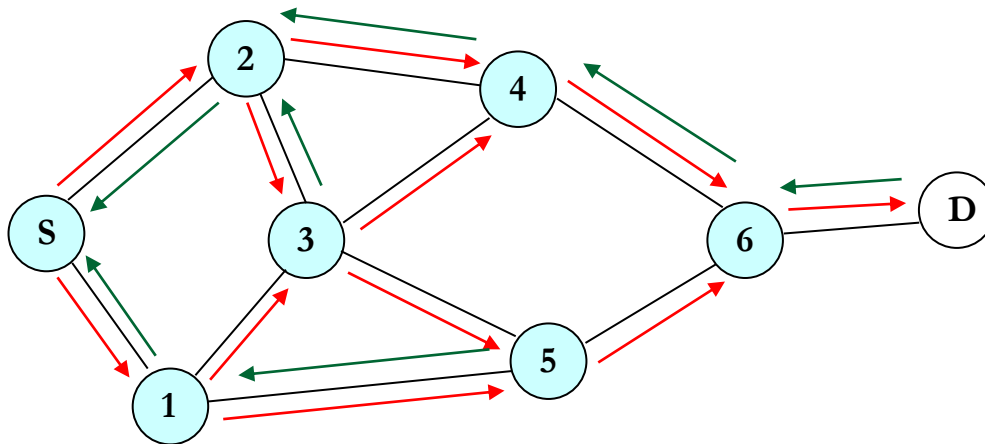
Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	4	3	105



AODV – Route Request (2/2)

RT in D

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	6	4	105



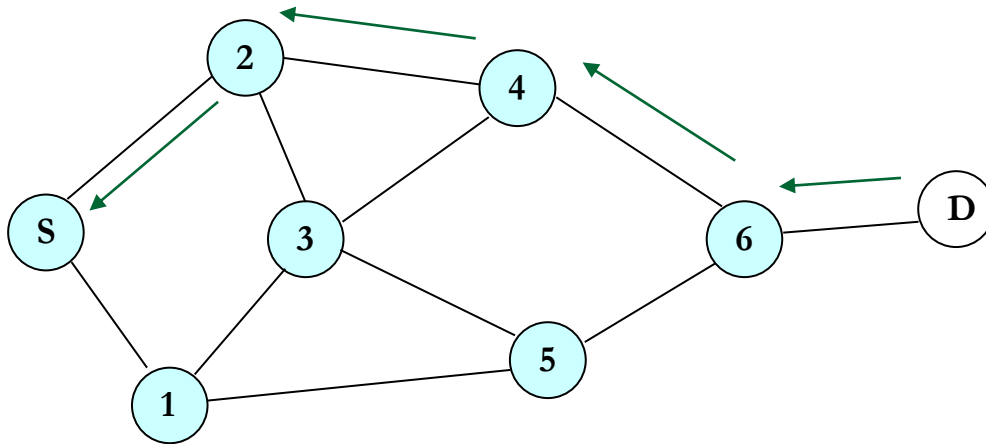
AODV – Route Reply (1/3)

- Με τη λήψη του μηνύματος RREQ ο κόμβος D
 - ❑ απαντά με ένα μήνυμα RREP
 - ❑ το μήνυμα RREP χρησιμοποιεί το reverse path για να φτάσει στον κόμβο S
- Η δημιουργία του μονοπατιού S-D γίνεται με τη διάδοση του μηνύματος RREP (forward path set-up)

AODV – Route Reply (2/3)

RT in D

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
S	6	4	105



RT in S

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
D	2	4	127

RT in 6

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
D	D	1	127
S	4	3	105

RT in 4

Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
D	6	2	127
S	2	2	105

RT in 2

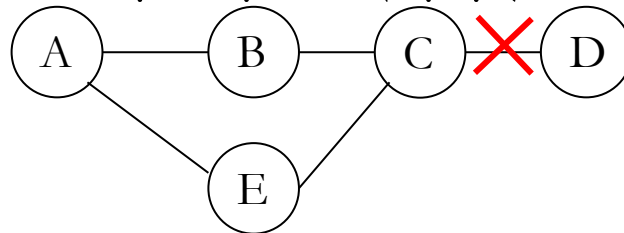
Dest	Next Hop	Cost	Seq. Num
D	4	3	127
S	S	1	105

AODV – Route Reply (3/3)

- Κάποιος ενδιάμεσος κόμβος μπορεί να απαντήσει με ένα μήνυμα RREP
 - ❑ αν γνωρίζει μια πιο πρόσφατη διαδρομή για τον προορισμό
 - ❑ καθορισμός ηλικίας μιας διαδρομής: χρήση sequence number του προορισμού
 - πιο πρόσφατη: μεγαλύτερος αριθμός ακολουθίας
- Πιθανότητα να απαντήσει ένας ενδιάμεσος κόμβος: *μικρότερη απ' ότι στο DSR*

AODV – Αριθμοί ακολουθίας

- Οι αριθμοί ακολουθίας χρησιμοποιούνται για
 - ❑ να αποφευχθεί η χρήση παλαιών / μη έγκυρων διαδρομών
 - ❑ αποφυγή σχηματισμού βρόχων
 - υπόθεση: ο κόμβος A δεν γνωρίζει την καταστροφή του link C-D (το RERR χάθηκε)
 - ο C προσπαθεί να βρει μια διαδρομή προς τον D
 - ο A λαμβάνει ένα RREQ από τη διαδρομή C-E-A
 - ο κόμβος A απαντά με τη διαδρομή (A-B-C-D)



AODV – Δρομολόγηση δεδομένων

- Τα πακέτα δεδομένων δρομολογούνται με βάση τους πίνακες δρομολόγησης που έχουν σχηματιστεί
 - ❑ το πακέτο δεν περιέχει όλη τη διαδρομή

AODV – Διαχείριση διαδρομών (1/3)

- Reverse paths εγγραφές:
 - ❑ διαγράφονται μετά από χρόνο timeout
 - ❑ ο χρόνος timeout πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να επιστρέψει το μήνυμα RREP
- Forward path εγγραφές:
 - ❑ διαγράφονται αν δεν χρησιμοποιηθούν για χρόνο active_route_timeout

AODV – Διαχείριση διαδρομών (2/3)

- Σε περίπτωση σφάλματος σε ένα link X-Y (στη διαδρομή S-D)
 - ❑ ο κόμβος X δημιουργεί ένα μήνυμα RERR
 - ❑ αυξάνει τον αριθμό ακολουθίας (έστω N) που έχει αποθηκευμένο για τον D και τον εισάγει στο RERR
 - ❑ διαδίδει το RERR στους «ενεργούς» γείτονες
- Κάθε ενδιάμεσος κόμβος
 - ❑ διαγράφει την κατάλληλη εγγραφή
 - ❑ διαδίδει το RERR στους «ενεργούς» γείτονές του

AODV – Διαχείριση διαδρομών (3/3)

- Ο κόμβος S
 - ❑ αποστέλλει καινούργιο RREQ με αριθμό ακολουθίας $\geq N$
- «Ενεργός» γείτονας για μια εγγραφή του πίνακα δρομολόγησης
 - ❑ γείτονας που έχει στείλει ένα πακέτο στα προηγούμενα `active_route_timeout` δευτερόλεπτα και το μήνυμα προωθήθηκε χρησιμοποιώντας την εγγραφή

AODV – Ανίχνευση απώλειας σύνδεσης

- Απουσία μηνύματος Hello: απώλεια σύνδεσης με γείτονα
 - οι γείτονες ανταλλάσσουν *περιοδικά* μηνύματα Hello
 - ένα μήνυμα Hello περιέχει τη διεύθυνση του κόμβου
- Αδυναμία λήψης MAC-level acknowledgement

Βιβλιογραφία

- [*Abolhasan et al., 2004*] Mehran Abolhasan, Tadeusz Wysocki and Eryk Dutkiewicz, **A review of routing protocols for mobile ad hoc networks**, *Ad Hoc Networks, Volume 2, Issue 1, January 2004, Pages 1-22*.
- [*Perkins and Bhagwat, 1994*] C. Perkins and P. Bhagwat, **Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers**, In proc. Of ACM SIGCOMM'94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, 1994, pp. 234-244.
- [*Johnson and Maltz, 1996*] D. Johnson and D. Maltz. **Dynamic source routing in ad hoc wireless networks**, in Mobile Computing (ed. T. Imielinski and H. Korth), Kluwer Academic Publishers, 1996, The Netherlands.
- [*Perkins and Royer, 2001*] C. Perkins and E. Royer, **The Ad-hoc On-Demand Distance-Vector Protocol**, in Ad Hoc Networking (ed. C. Perkins), Addison-Wesley, 2001.