

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ - NETWORK MANAGEMENT

Τεχνικές & Αλγόριθμοι Δρομολόγησης IP - IP Routing Algorithms

Interior Gateway Protocols (IGP), Border Gateway Protocol (BGP)

Άμεση Δρομολόγηση (Host Routing Tables)

Έμμεση Δρομολόγηση, Address Resolution Protocol (ARP)

Αλγόριθμοι Δρομολόγησης: Bellman - Ford (Distance Vector) & Dijkstra (Link State)

B. Μάγκλαρης

maglaris@netmode.ntua.gr

www.netmode.ntua.gr

Νέα Κτίρια ΣΗΜΜΥ - Αίθουσα 013

6/11/2023

50 ΧΡΟΝΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ ΤΟΥ TCP/IP

Πριν 50 χρόνια (5 Νοεμβρίου 1973) οι **Vinton (Vint) Cerf** (τότε στο **Stanford University**) και **Robert (Bob) Kahn** (τότε στην **ARPA** του **US DoD**) κατέθεσαν στο *IEEE Transactions on Communications* την ιστορική δημοσίευση του TCP/IP:

<https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos561/papers/cerf74.pdf>

A Protocol for Packet Network Intercommunication

VINTON G. CERF AND ROBERT E. KAHN,
MEMBER, IEEE

Abstract — A protocol that supports the sharing of resources that exist in different packet switching networks is presented. The protocol provides for variation in individual network packet sizes, transmission failures, sequencing, flow control, end-to-end error checking, and the creation and destruction of logical process-to-process connections. Some implementation issues are considered, and problems such as internetwork routing, accounting, and timeouts are exposed.

INTRODUCTION

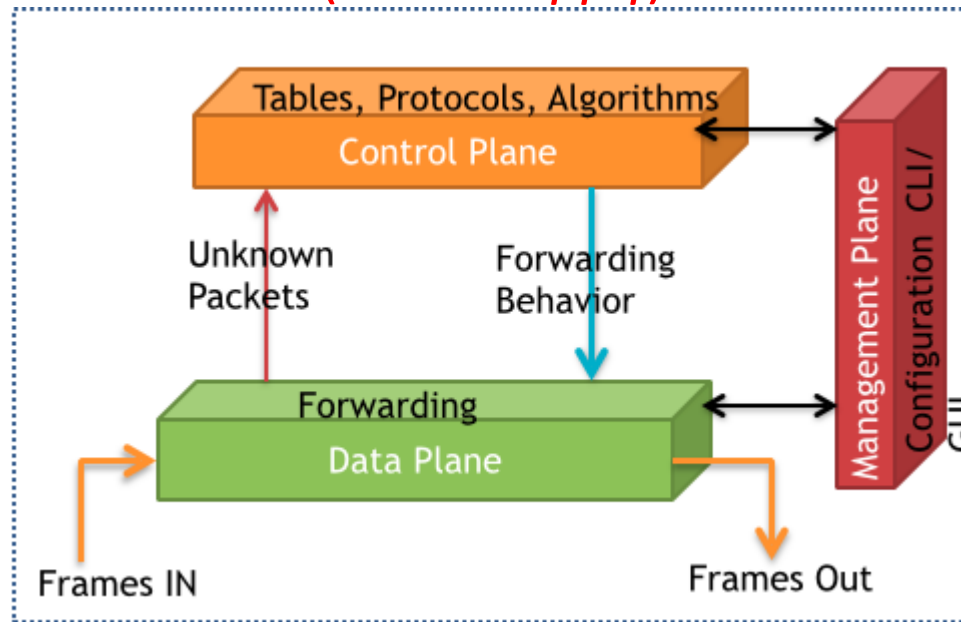
IN THE LAST few years considerable effort has been expended on the design and implementation of packet switching networks [1]-[7],[14],[17]. A principle reason for developing such networks has been to facilitate the sharing of computer resources. A packet communication network includes a transportation mechanism for delivering data between computers or between computers and terminals. To make the data meaningful, computer and terminals share a common protocol (i.e., a set of agreed upon conventions). Several protocols have already been developed for this purpose [8]-[12],[16]. However, these protocols have addressed only the problem of communication on the same network. In this paper we present a protocol design and philosophy that supports the sharing of resources that exist in different packet switching networks.

After a brief introduction to internetwork

of one or more *packet switches*, and a collection of communication media that interconnect the packet switches. Within each *HOST*, we assume that there exist *processes* which must communicate with processes in their own or other *HOSTS*. Any current definition of a process will be adequate for our purposes [13]. These processes are generally the ultimate source and destination of data in the network. Typically, within an individual network, there exists a protocol for communication between any source and destination process. Only the source and destination processes require knowledge of this convention for communication to take place. Processes in two distinct networks would ordinarily use different protocols for this purpose. The ensemble of packet switches and communication media is called the *packet switching subnet*. Fig. 1 illustrates these ideas.

In a typical packet switching subnet, data of a fixed maximum size are accepted from a source *HOST*, together with a formatted destination address which is used to route the data in a store and forward fashion. The transmit time for this data is usually dependent upon internal network parameters such as communication media data rates, buffering

ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ (επανάληψη)



<https://thenewstack.io/defining-software-defined-networking-part-1/>

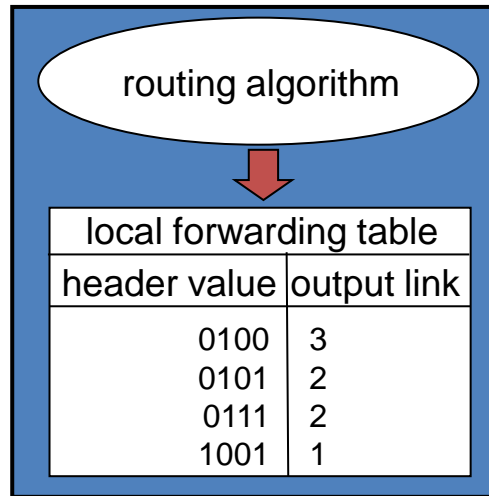
Data Plane: Μετάδοση - Προώθηση Δεδομένων σε Πλαίσια/Frames ή Πακέτα
Control Plane: Έλεγχος - Σηματοδότηση Ροής Πακέτων Δεδομένων
Management Plane: Διαχειριστικές Λειτουργίες Δικτύου

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟ INTERNET (επανάληψη)

- **Προώθηση (forwarding):** Μετακίνηση πακέτων από την είσοδο δρομολογητή σε κατάλληλη έξοδο (*λειτουργία data plane*)
- **Δρομολόγηση (routing):** καθορισμός διαδρομής πακέτων από πηγή προς προορισμό, *routing algorithms* (*λειτουργία control plane*)

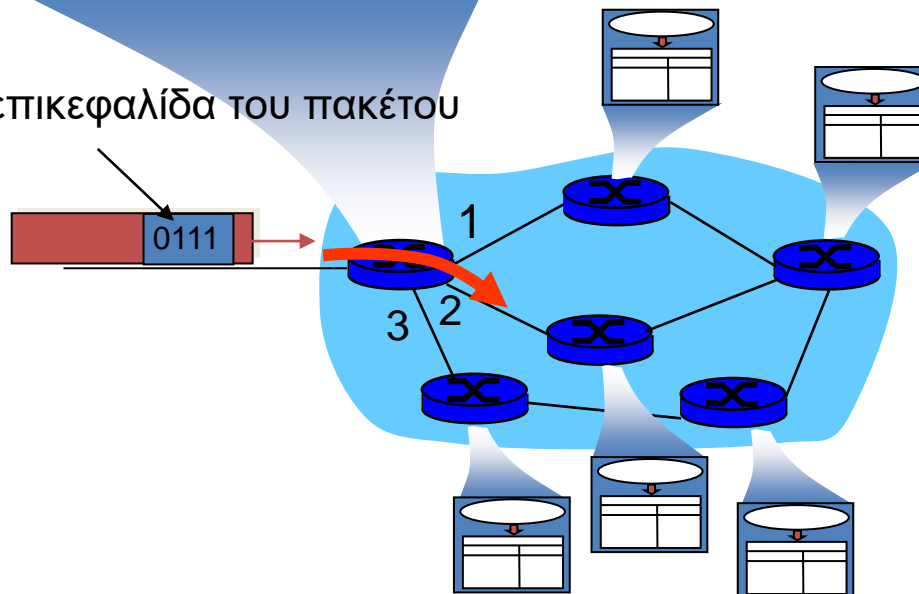
Σημείωση: Στις επόμενες διαφάνειες χρησιμοποιήθηκε υλικό υποστήριξης του βιβλίου των Kurose & Ross “**Computer Networking: A Top-Down Approach,**” Pearson Publisher, 6th Edition.

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟ INTERNET (επανάληψη)



Συσχέτιση Δρομολόγησης – Προώθησης

Τιμή στην επικεφαλίδα του πακέτου



ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (επανάληψη)

Layer 3 Intra-AS Routing

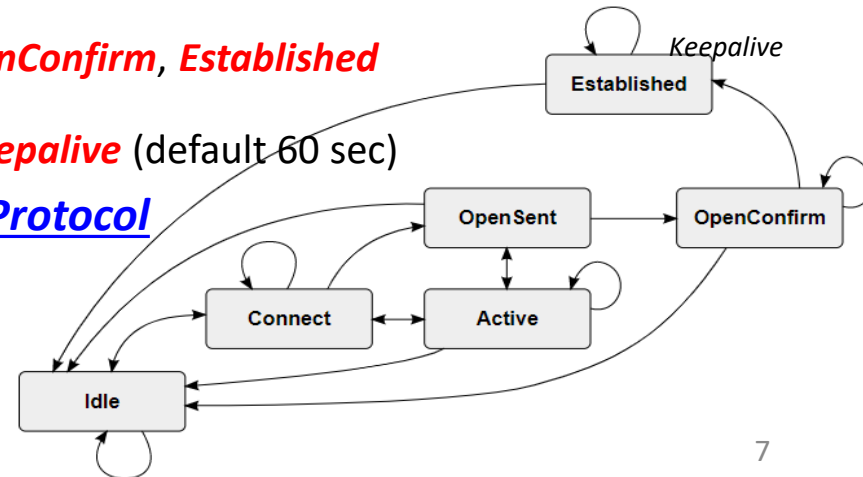
- **Intra-AS Routing, Interior Gateway Protocols (IGP):** Μια έξοδος προς επόμενο Interface για κάθε υποδίκτυο (subnet) τελικό προορισμό εντός ενός AS
 - RIP (Routing Internet Protocol): Πρωτόκολλο παλαιάς γενιάς, βασισμένο σε αλγόριθμους **distance vector (Bellman Ford)**
 - OSPF (Open Shortest Path First): Το πιο διαδομένο σήμερα, βασισμένο σε αλγόριθμους **link state (Dijkstra)**. Για λόγους κλιμάκωσης, μπορεί να υλοποιηθεί ιεραρχικά γύρω από την περιοχή κορμού (**backbone area 0** ή 0.0.0.0) και με συνδεδεμένες περιφερειακές περιοχές (**stub areas**). Για δρομολόγηση πακέτων IPv4, ισχύει η OSPF Version 2: RFC 2328, 1998
 - IS-IS
 - Δυνατότητα πολλαπλών εναλλακτικών δρόμων ίσου κόστους (ECMP): Direct routing μεταξύ γειτονικών δρομολογητών με παράλληλες συνδέσεις και επιλογή εξόδου με proprietary αλγορίθμους (π.χ. Per-Packet Round-Robin, Per-Flow Load Balancing, Per Source -Destination Traffic Engineering...) Για αυτοματισμό του OSPF απαιτείται τροποποίηση του αλγορίθμου **Dijkstra για k-Shortest paths**

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (επανάληψη)

Layer 3 Inter-AS Routing

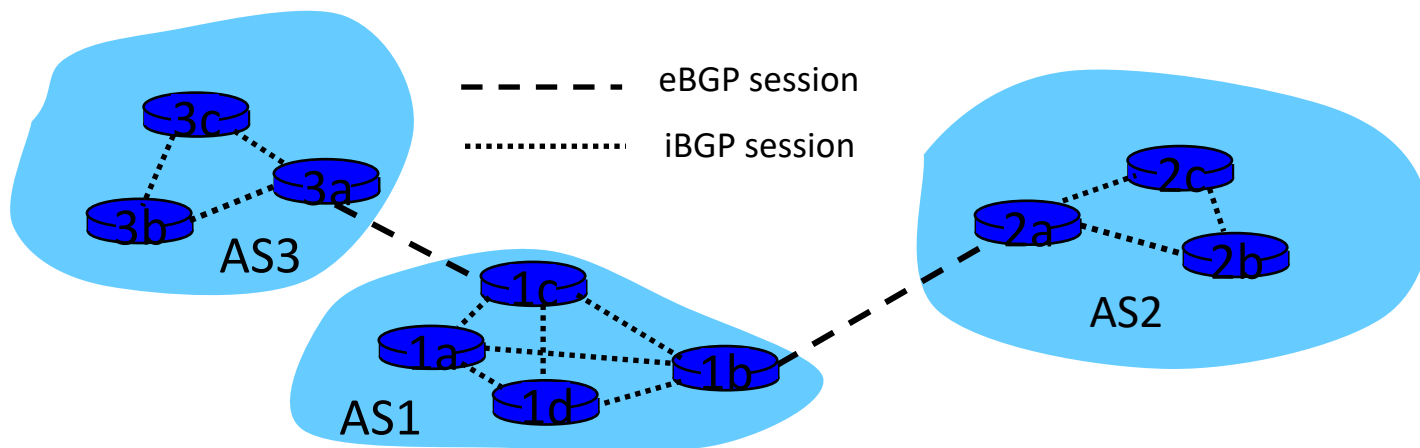
- **Inter-AS Routing, Exterior (Border) Gateway Protocols (EGP/BGP)**: Πολλές εναλλακτικές διαδρομές με βάρη προς όλα τα γνωστά δίκτυα (περίπου **1.200.000** σήμερα) μεταξύ ακραίων δρομολογητών (**border gateways**) αυτονόμων συστημάτων (Autonomous Systems – **AS's**, περίπου **112.3084** σήμερα - **73.806** ανακοινώσιμα)
 - Η διαδρομή καταγράφεται στον **BGP Table** των ακραίων δρομολογητών (border gateways) ενός **AS** ανά prefix (υποδίκτυο προορισμού) και την σειρά των **AS's** της προτεινόμενης διαδρομής (μαζί με το βάρος της)
 - Οι πίνακες **BGP** φυλάσσονται στην ηλεκτρονική μνήμη των border gateways και ανανεώνονται δυναμικά όποτε υπάρχουν αλλαγές στο Internet με ευθύνη των γειτονικών δρομολογητών (**border gateways**) που ανακοινώνουν τα δίκτυα των αυτονόμων κοινοτήτων (**AS's**) που γνωρίζουν (**advertising**)
 - Ο υπολογισμός των «βέλτιστων» **Inter-AS** δρόμων γίνεται κατανεμημένα, βασισμένος σε αλγόριθμους **distance vector (Bellman Ford)** με κόστη τα βάρη των συνδέσεων μεταξύ **border gateways**. Οι δρόμοι **Inter-AS** μπορεί να αλλάξουν στη πορεία ενός πακέτου προς τον τελικό του προορισμό
 - BGP (RFC 4271): **Control plane packets (signals)** μεταξύ **BGP peers** σε **TCP port 149**
 - Finite State Machine:
States: Idle, Connect, Active, OpenSent, OpenConfirm, Established
 - BGP packet types:
Open, Update, Notification (error signal), **Keepalive** (default 60 sec)

https://en.wikipedia.org/wiki/Border_Gateway_Protocol



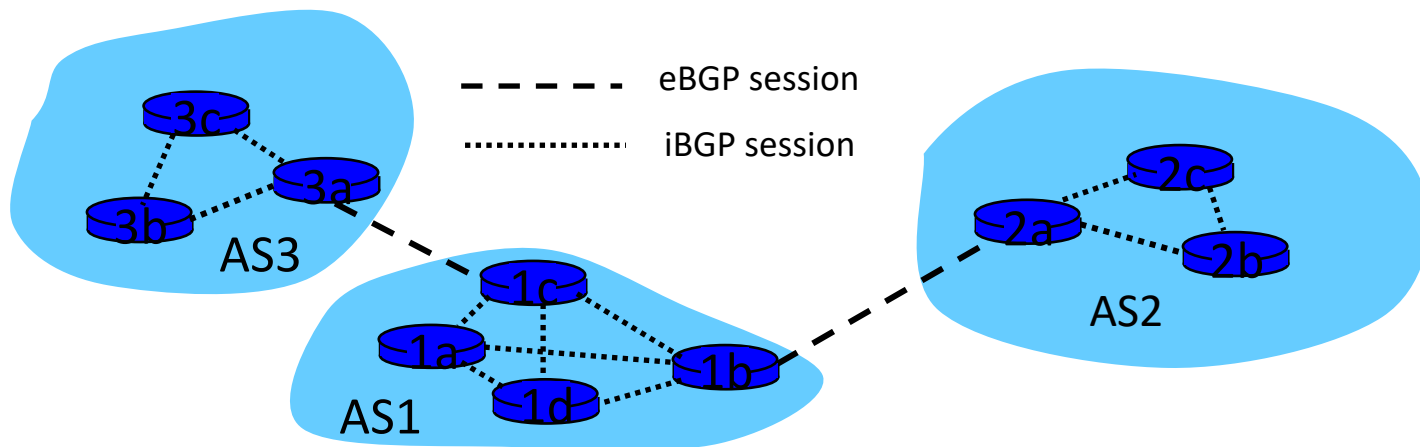
ΒΑΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ BGP (επανάληψη)

- Τα ζεύγη από συνοριακούς δρομολογητές (BGP peers) ανταλλάσσουν πληροφορίες δρομολόγησης (routing info) πάνω από ημι-σταθερές συνδέσεις TCP: **BGP sessions**
 - Οι BGP sessions δεν χρειάζεται να αντιστοιχίζονται σε φυσικές συνδέσεις links
- Όταν το AS2 ανακοινώνει ένα πρόθεμα (prefix υποδικτύου προορισμού) προς AS1:
 - Το AS2 **υπόσχεται** ότι θα προωθεί πακέτα με διεύθυνση προορισμού που να ανήκει στο δεδομένο prefix
 - Το AS2 μπορεί να συναθροίσει (aggregate) prefixes υποδικτύων στις ανακοινώσεις του



ΔΙΑΝΟΜΗ BGP REACHABILITY INFO (επανάληψη)

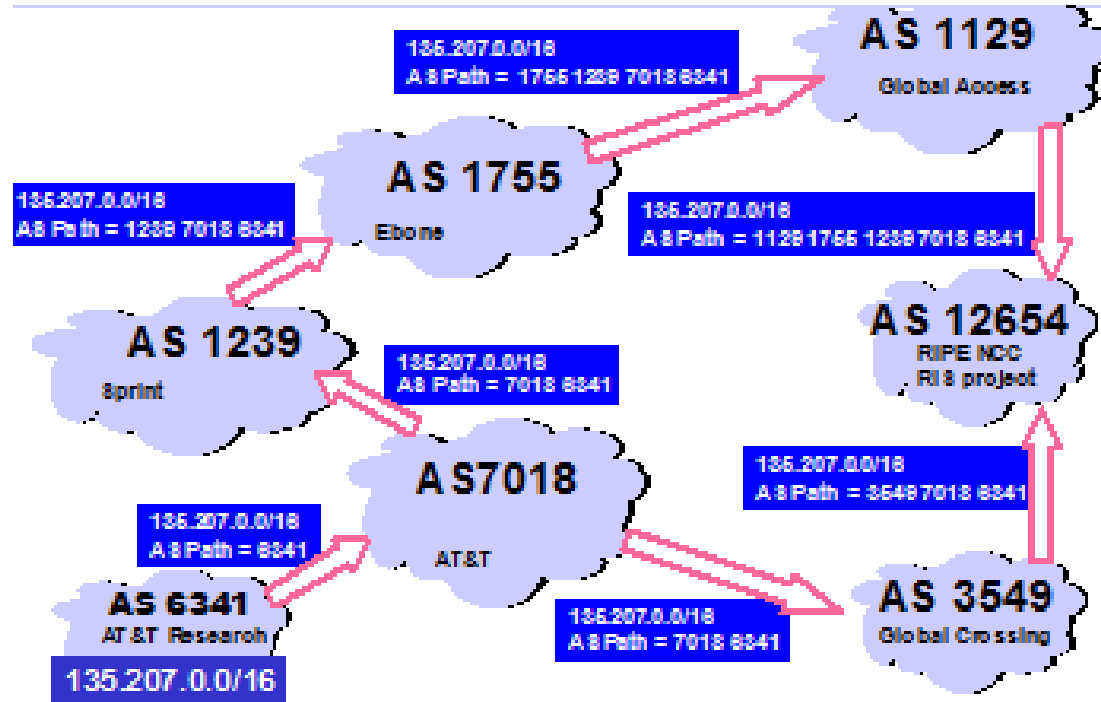
- Με χρήση σύνδεσης TCP, το πρωτόκολλο **eBGP (external BGP)** μεταξύ των border gateways 3a και 1c στέλνει **prefix reachability info** της AS3 στην AS1
 - 1c μπορεί να χρησιμοποιήσει **iBGP (internal BGP)** για διανομή νέων **prefix reachability info** σε όλους τους δρομολογητές κορμού της AS1
 - 1b μπορεί να ξανα-ανακοινώσει νέο **prefix reachability info** στο AS2 πάνω από σύνδεση eBGP μεταξύ 1b-to-2a
- Ένας δρομολογητής όταν μαθαίνει νέο **network prefix**, δημιουργεί routing entry στο πίνακα προώθησης (**forwarding table**)
- Οι δρομολογητές που μετέχουν στο iBGP μέσα σε μια AS πρέπει να είναι απ' ευθείας διασυνδεδεμένοι (**fully connected iBGP routers**)



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗΣ

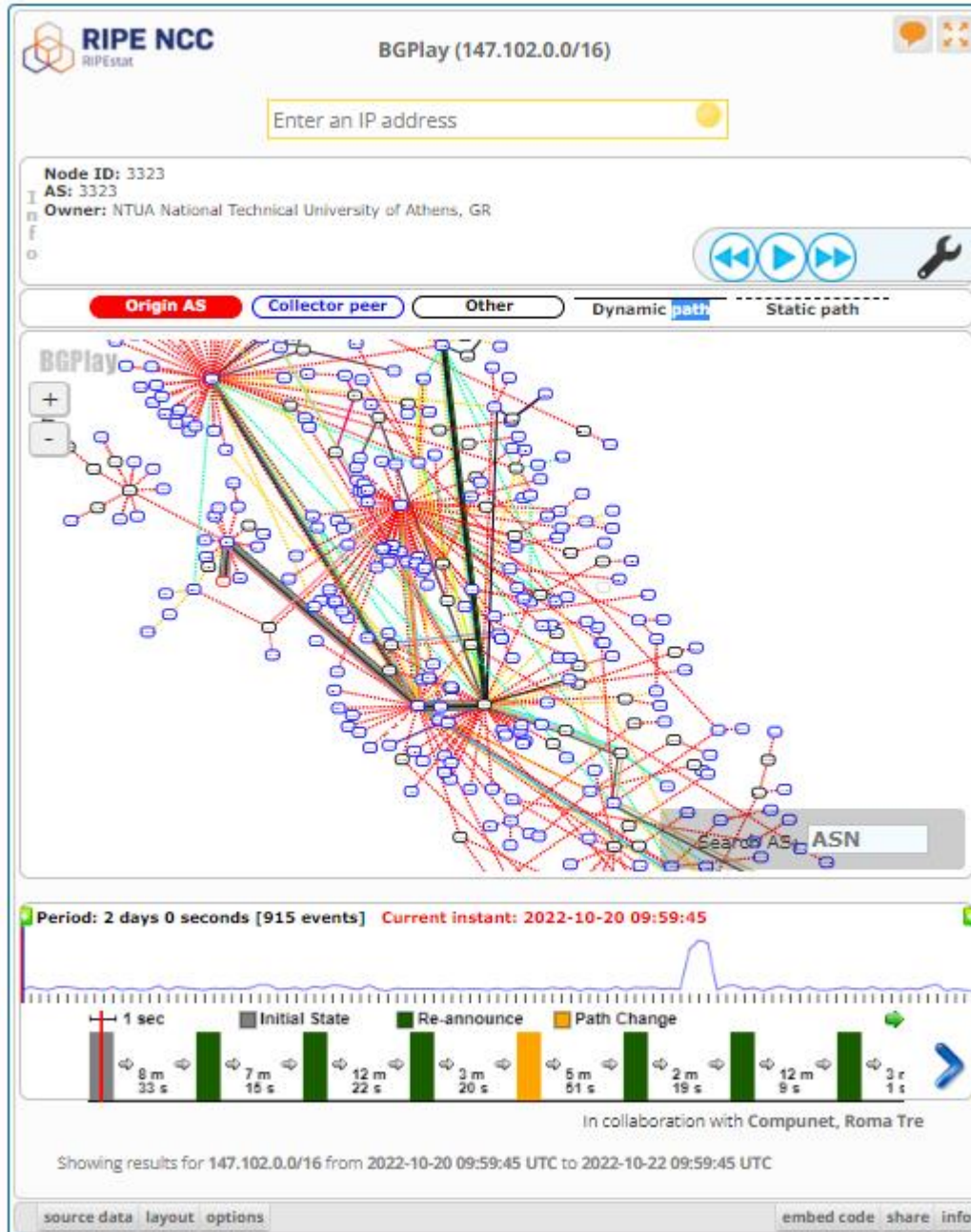
ΔΙΚΤΥΟΥ 135.207.0.0/16 ΜΕΣΩ BGP (επανάληψη)

(από παρουσίαση του Timothy G. Griffin, AT&T Research, Paris 2002)



ΠΑΡΟΧΗ INTERNET ΣΤΟ Ε.Μ.Π. (NTUA - ASN 3323) (επανάληψη)

<https://stat.ripe.net/special/bgplay> (22/10/2022)



NTUA (3323)
GRNET (5408)
GÉANT (21320)

- GÉANT Internet Feeds**
- **LEVEL3 (3356)**
 - **COGENT 174 (174)**
 - **HURRICANE US (6939)**
 - **NORDUnet (2603)**

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Είδη Intra-AS Routing

- Άμεση δρομολόγηση (**direct routing**)
 - Κάθε κόμβος (host) στέλνει πακέτα IP με τελικό προορισμό το ίδιο υποδίκτυο απευθείας σε **interface εξόδου** του
 - Οι κόμβοι στέλνουν πακέτα με τελικό προορισμό εκτός του δικτύου – υποδικτύου τους σε **default gateway** του υποδικτύου τους (π.χ. hosts υποδικτύου 147.102.13.X προς τη διεύθυνση 147.102.13.200)
- Δρομολόγηση μέσω Ενδιάμεσων Δρομολογητών (**indirect routing**)
 - Κάθε κόμβος (host) στέλνει πακέτα IP σε κόμβο εντός του ιδίου AS όχι απευθείας αλλά χρησιμοποιώντας ενδιάμεσους δρομολογητές (**routers**). Για την προώθηση (**forwarding**) πακέτων σε Επίπεδο 2 (L2, Ethernet) μαθαίνει την αντιστοίχιση του **interface δρομολογητή (gateway) & την διεύθυνση L2 (MAC) μέσω ARP (Address Resolution Protocol)**
 - Ο δρομολογητής πρέπει να γνωρίζει την έξοδο (**interface δρομολογητή**) προς το δίκτυο – υποδίκτυο προορισμού
 - Μεταξύ δρομολογητών κορμού εντός AS υπάρχουν πίνακες δρομολόγησης (**routing tables - Routing Information Base, RIB**) προς όλα τα εσωτερικά υποδίκτυα (και τα άμεσα συνδεόμενα σε γειτονικά AS) που ανανεώνονται με πρωτόκολλα **IGP** (συνήθως **OSPF** με core και stub areas)

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Intra-AS Routing, Host Routing Table

- **Εγγραφές του τύπου (N, G, I, M)**

- N: Δίκτυο τελικού προορισμού, IP - Netmask
- G: Gateway ή Next-Hop, άμεσο επόμενο IP προς προορισμό N
- I: Interface εξόδου προς επόμενο IP (Gateway)
- M: Metric, απόσταση μέχρι τον τελικό προορισμό N (συνήθως ανάλογη με τον αριθμό ενδιάμεσων κόμβων IP)

- **Host routing table σε λειτουργικό Windows από το μηχάνημα με IP 147.102.13.32**

> netstat -nr

```
Routing Table:
Network Destination        Netmask          Gateway          Interface        Metric
0.0.0.0                    0.0.0.0          147.102.13.200   147.102.13.32    20
127.0.0.0                  255.0.0.0        127.0.0.1        127.0.0.1        1
147.102.13.0               255.255.255.0    147.102.13.32    147.102.13.32    20
147.102.13.32             255.255.255.255  127.0.0.1        127.0.0.1        20
147.102.255.255           255.255.255.255  147.102.13.32    147.102.13.32    20
224.0.0.0                  240.0.0.0        147.102.13.32    147.102.13.32    20
```

- Προς το ίδιο τοπικό υποδίκτυο **147.102.13.0/24** σαν gateway ορίζεται κατευθείαν (**direct**) το τοπικό interface **147.102.13.32**
 - Προς destination `dolly.netmode.ntua.gr` (**147.102.13.10**) gateway θα είναι το τοπικό interface **147.102.13.32**
- Προς όλα τα άλλα δίκτυα **0.0.0.0** σαν gateway ορίζεται το **147.102.13.200** (**default gateway: router.netmode.ntua.gr**)
- Προς **local host 127.0.0.0/8** (π.χ. για δοκιμή δικτυακών εφαρμογών τοπικά) ή προς το ίδιο το **147.102.13.32/32** «προωθούνται» στο «interface» **127.0.0.1**
- Προς διεύθυνση broadcast **147.102.255.255/32** σαν gateway ορίζεται κατευθείαν (direct) το τοπικό interface **147.102.13.32** (η διεύθυνση δεν ισχύει στο δίκτυο του ΕΜΠ)
- Προς διευθύνσεις multicast **224.0.0.0/4** σαν gateway ορίζεται κατευθείαν (direct) το τοπικό interface **147.102.13.32**

ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Intra-AS Routing, Links between Routers

- Για ομοιομορφία της δρομολόγησης, κάθε γραμμή ορίζεται (συνήθως) σαν δίκτυο με 4 τουλάχιστον διευθύνσεις (/30)
- Παράδειγμα: Μεταξύ ΕΜΠ **147.102.0.0/16** & Παν. Αθηνών **195.134.64.0/18** ορίζεται το «δίκτυο» **147.102.224.32/30**
 - Υποδίκτυο: **147.102.224.32/30**
 - Άκρο ΕΜΠ: **147.102.224.33/30**
 - Άκρο Παν. Αθηνών: **147.102.224.34/30**
 - Broadcast: **147.102.224.35/30**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ: ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ Ε.Μ.Π.

ntua.gr (147.102.0.0/16, ASN 3323)

ΠΡΟΣΟΧΗ

Οι πίνακες δρομολόγησης στο Internet για λόγους ομοιομορφίας είναι της μορφής:

- **Prefix Δικτύου/Υποδικτύου Τελικού Προορισμού :: Interface Εξόδου προς Επόμενο Κόμβο**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:

Ο δρομολογητής του Ε.Μ.Π. **147.102.224.33** βρίσκει τον δρομολογητή του ΕΚΠΑ **147.102.224.34** σαν μέλος του υποδικτύου:

- **147.102.224.32/30** (παροχή διευθύνσεων από Ε.Μ.Π.)

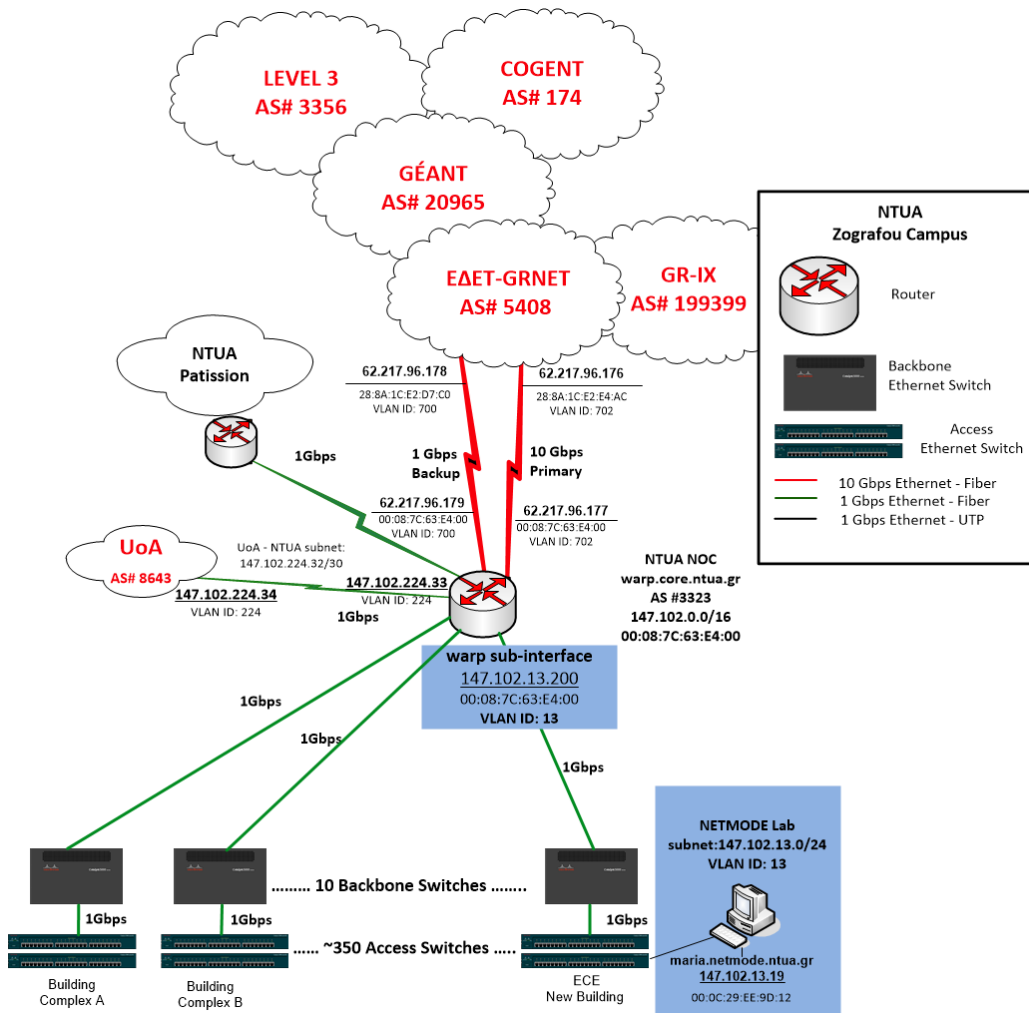
Η γραμμή Ε.Μ.Π. – ΕΚΠΑ (όπως όλες οι γραμμές σε Δίκτυα Internet) ορίζεται σαν υποδίκτυο (prefix) με 4 τουλάχιστον διευθύνσεις IP:

- Υποδίκτυο: **147.102.224.32**
- Άκρο Ε.Μ.Π.: **147.102.224.33**
- Άκρο ΕΚΠΑ: **147.102.224.34**
- Broadcast: **147.102.224.35**

ΑΝΤΙ-ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ:

Ο δρομολογητής του Ε.Μ.Π. **62.217.96.177** βρίσκει τον δρομολογητή του GRNET **62.217.96.176** σαν μέλος του υποδικτύου:

- **62.217.96.176/31** (παροχή διευθύνσεων από GRNET)



ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΥΡΕΣΗΣ ΔΡΟΜΩΝ

- **DV: Distance Vector** (αλγόριθμος **Bellman-Ford**)
 - Interior Gateway Protocol - IGP: **RIP** (Routing Information Protocol) - *δεν εφαρμόζεται πλέον*
 - Exterior Gateway Protocol - EGP: **BGP** (Border Gateway Protocol)
- **LS: Link State** (αλγόριθμος **Dijkstra**)
 - IGP: **OSPF** (Open Shortest Path First): Link State Data Base + αλγόριθμος Dijkstra στον κορμό Αυτόνομου Δικτύου (Core of an Autonomous System - AS)
 - Κόστος γραμμών δικτύου: Ανάλογα με την ταχύτητα ή οριζόμενα από τον Διαχειριστή
 - Ανανέωση κόστους γραμμών μέσω **LSA** (Link State Advertisement) κάθε 30 min (default) ή λόγω μεταβολής κατάστασης. Μετά από 60 min (time out) χωρίς LSA η γραμμή διαγράφεται
 - Σε περιφερειακά υποδίκτυα (stub areas): Default G/W
 - Για δίκτυα εκτός AS: Ανακοινώσεις εντός AS μέσω i-BGP

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ Distance Vector

BGP (Bellman – Ford)

- Κάθε κόμβος υπολογίζει την επόμενη «βέλτιστη» στάση προς όλες τις κατευθύνσεις, σύμφωνα με την εικόνα που έχει τοπικά (**πραγματικά κατανεμημένος αλγόριθμος**)
- Χρειάζεται γνώση του «κόστους» των άμεσων συνδέσεων (interfaces) και το εκτιμώμενο «κόστος» από τους άμεσους γείτονες προς όλους τους προορισμούς (π.χ. όλα τα δίκτυα στο Internet που ανακοινώνουν - **announce** - σε έναν ακραίο δρομολογητή μιας αυτόνομης κοινότητας - AS - οι γειτονικές του αυτόνομες κοινότητες στο πρωτόκολλο **BGP**)
- Βασίζεται στον δυναμικό προγραμματισμό (με πιθανές επεκτάσεις για την ανακάλυψη εναλλακτικών δρόμων στο **BGP**) και λογική Ενισχυτικής Μάθησης (**Reinforcement Learning**) σαν εφαρμογή αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης
- Οι κόμβοι εντοπίζουν τους βέλτιστους δρόμους (shortest paths) προς όλους τους κόμβους εκτελώντας αλγόριθμο βασισμένο στον δυναμικό προγραμματισμό (**Dynamic Programming**) που εισήγαγε ο **Bellman**
- Αρχικά παρουσίασε αστάθειες (π.χ. δρόμους με κύκλους - loops) αλλά σήμερα το πρωτόκολλο **EGP BGP** είναι η καρδιά του Internet
- Το πρωτόκολλο **IGP RIP** έχει αντικατασταθεί από το **OSPF** και το **IS-IS**

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ Link State

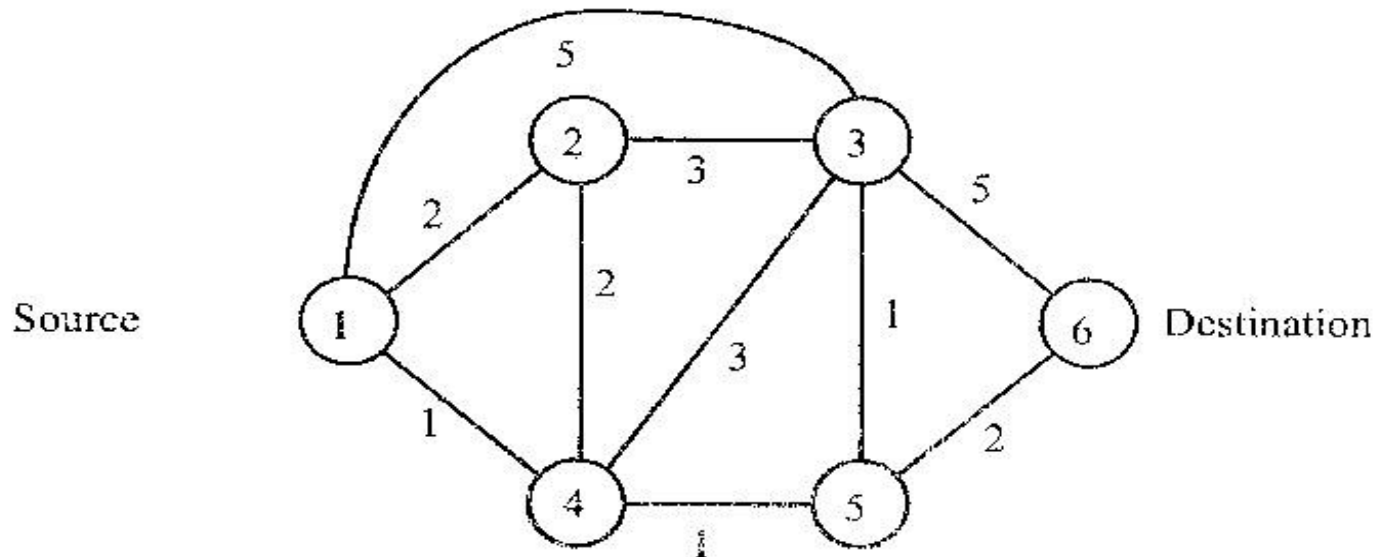
IGP OSPF (Dijkstra)

- Θεωρείται ευσταθής αλγόριθμος, επαρκής για IGP: Μια αυτόνομη κοινότητα ιεραρχείται εσωτερικά σε περιοχές OSPF 0 (μία ή περισσότερες) + περιφερειακές **stub areas** με static routing (*στο δίκτυο του ΕΜΠ, OSPF τρέχουν μόνο 2 δρομολογητές*)
- Κάθε δρομολογητής κορμού έχει πλήρη εικόνα της περιοχής του – τοπολογία, κόστη συνδέσεων
- Όλοι οι δρομολογητές κορμού εκτελούν τον αλγόριθμο Dijkstra για εντοπισμό όλων των δρόμων ελαχίστου κόστους (shortest paths) σε ρόλο κεντρικού συστήματος ελέγχου.
- Πληροφορίες κατάστασης δικτύου (τοπολογία, κόστη) μεταδίδονται με Link State Announcements (LSA) μεταξύ γειτόνων κάθε 1/2 ώρα (default) ή λόγω μεταβολής κατάστασης – θεωρητικά όλοι έχουν την ίδια εικόνα
- **Τα LSA μεταδίδονται σαν αυτόνομα IP datagrams, όχι μέσω πρωτοκόλλων TCP ή UDP**
- Γενίκευση του OSPF με εναλλακτικούς δρόμους για traffic engineering: **ECMP** (Equal-Cost Multi-Path)
- Σε μεγάλα δίκτυα κορμού εφαρμόζεται εναλλακτικά ο Αλγόριθμος **IS-IS** (Intermediate System to Intermediate System)

ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Bellman Ford & Dijkstra

- Δίκτυο (γράφος) αναφοράς
- Τα κόστη των γραμμών αφορούν και στις 2 κατευθύνσεις
- Στα παραδείγματα που ακολουθούν υπολογίζονται δένδρα ελαχίστων δρόμων (*shortest path trees*) από όλους προς την *ρίζα* {6} (*Bellman Ford*) και από την *ρίζα* {1} προς όλους (*Dijkstra*)
- **ΠΡΟΣΟΧΗ:** Η επιλογή του ρόλου της *ρίζας* του δένδρου (πηγή ή προορισμός) έγινε αυθαίρετα. Δεν εξαρτάται από τους αλγόριθμους που ισχύουν κατ' αναλογία για αντίστροφους ρόλους ρίζας



ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ Bellman-Ford

Distance Vector (1/2)

Υπολογισμός Δένδρου Ελάχιστων Δρόμων (Shortest Path Tree)
προς τον Κόμβο {6} από τους Κόμβους {1, 2, 3, 4, 5}

$D_i^{(h)}$: Κόστος από κόμβο (j) προς προορισμό (destination) 6 στο βήμα h

$d_{ij}^{(h)}$: Κόστος (βάρος) γραμμής (i,j) στο βήμα h

$L(j) = D_j^{(h)}$: Εκτίμηση ελάχιστου κόστους (*label*) από τον $\{j\}$ προς τον $\{6\}$ στο βήμα h

$P(j)$: Επόμενος κόμβος από τον $\{j\}$ προς τον $\{6\}$ στο βήμα h

Αρχικά έχουμε: $D_i^{(h)} = 0 \ \forall \ h, D_i^{(0)} = \infty \ \forall \ (D_6^{(0)} = 0, D_j^{(0)} = \infty, j = 1,2,3,4,5)$

Για κάθε διαδοχικό $h \geq 0$: $D_i^{(h+1)} = \min_j [D_j^{(h)} + d_{ij}] \ \forall \ i \neq 1$

Αν: $\forall \ i \neq 1 \ D_i^{(n+1)} = D_i^{(n)}$ για δύο διαδοχικά h τότε σταματάμε τον αλγόριθμο, ή διαφορετικά έπειτα από N επαναλήψεις.

Στην χειρότερη περίπτωση ο αλγόριθμος πρέπει να επαναληφθεί $N-1$ φορές για $N-1$ κόμβους και με $N-1$ εναλλακτικές λύσεις. Επομένως, πρόκειται για αλγόριθμο πολυπλοκότητας $O(N^3)$.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ Bellman-Ford

Distance Vector (2/2)

Παράδειγμα: INITIAL LABELS: $L(1)=L(2)=\dots=L(5)=\infty$, $L(6)=0$

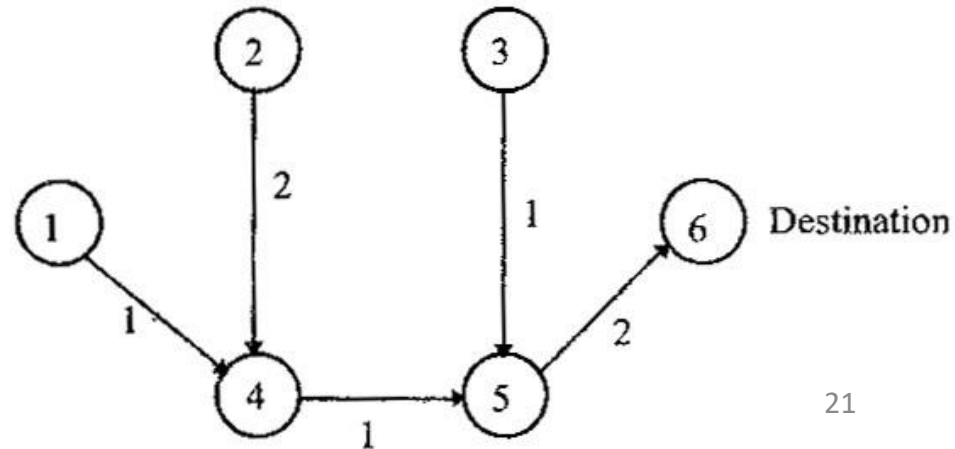
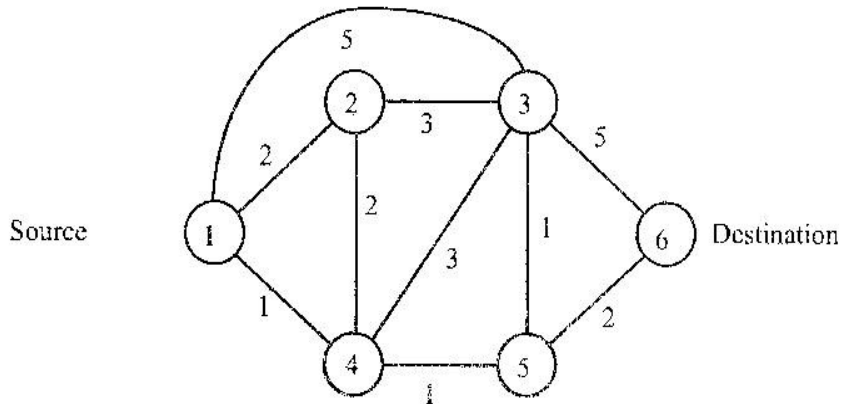
UPDATE ORDER 5,4,3,2,1

Iteration Number	Labels $L(n)$, Current Predecessor Node $P(n)$				
	$L(5), P(5)$	$L(4), P(4)$	$L(3), P(3)$	$L(2), P(2)$	$L(1), P(1)$
1	2 6	3 5	3 5	5 4	4 4
2	2 6	3 5	3 5	5 4	4 4

UPDATE ORDER 1,2,3,4,5

Iteration Number	Labels $L(n)$, Current Predecessor Node $P(n)$				
	$L(1), P(1)$	$L(2), P(2)$	$L(3), P(3)$	$L(4), P(4)$	$L(5), P(5)$
1	∞ -	∞ -	5 6	8 3	2 6
2	9 4	8 3	3 5	3 5	2 6
3	4 4	5 4	3 5	3 5	2 6
4	4 4	5 4	3 5	3 5	2 6

SHORTEST PATH TREE



ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ Dijkstra

Link State (1/2)

Υπολογισμός Δένδρου Ελάχιστων Δρόμων (Shortest Path Tree)

από τον Κόμβο {1} προς τους κόμβους {2, 3, 4, 5, 6}

P : Σύνολο από *permanent labels*

D_j : Κόστος από πηγή (*source*) {1} προς κόμβο { j }

d_{ij} : Κόστος (βάρος) γραμμής (i, j)

$L(j) = D_j^{(h)}$: Εκτίμηση ελάχιστου κόστους (*label*) από τον {1} προς τον { j } στο βήμα h

$P(j)$: Προηγούμενος (*Predecessor*) κόμβος από τον {1} προς τον { j } στο βήμα h

Αρχικά έχουμε: $P = \{1\}$, $D_1 = 0$, $D_j = d_{1j} \forall j \neq 1$

Βήμα 1^ο: Βρες $i \notin P$ τέτοιο ώστε: $D_i = \min_{j \in P} D_j$ και κάνε: $P = P \cup \{i\}$ Εάν το P περιλαμβάνει όλους τους κόμβους τότε ο αλγόριθμος σταματά, αλλιώς:

Βήμα 2^ο: Για όλα $j \notin P$ $D_j = \min[D_p, D_i + d_{ij}]$ και ξανά στο 1^ο Βήμα

Σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος απαιτεί έναν αριθμό πράξεων ανάλογο του N και έχουμε $N-1$ βήματα. Δηλ. είναι αλγόριθμος πολυπλοκότητας $O(N^2)$.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ Dijkstra

Link State (2/2)

INITIAL LABELS: $L(1)=0, L(2)=L(3)=\dots=L(6)=\infty$

Iteration Number	Permanently Labeled Nodes	Labels $L(n)$, Current Predecessor Node $P(n)$				
		$L(2), P(2)$	$L(3), P(3)$	$L(4), P(4)$	$L(5), P(5)$	$L(6), P(6)$
1	1	2 1	5 1	1 1	∞ -	∞ -
2	1,4	2 1	4 4	-	2 4	∞ -
3	1,4,2	-	4 4	-	2 4	∞ -
4	1,4,2,5	-	3 5	-	-	4 5
5	1,4,2,5,3	-	-	-	-	4 5

SHORTEST PATH TREE

