



## Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων (M132)

### Δίκτυα Πρόσβασης Ενσύρματα και Οπτικά Παθητικά Δίκτυα

Διδάσκων:

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

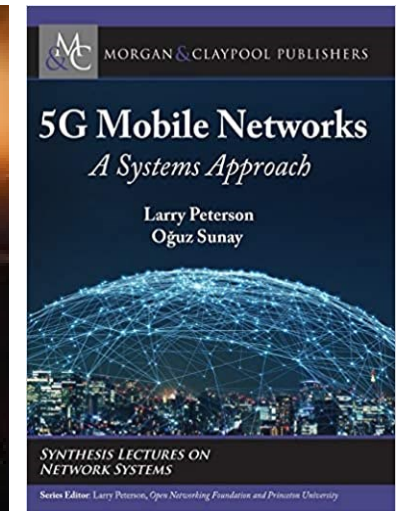
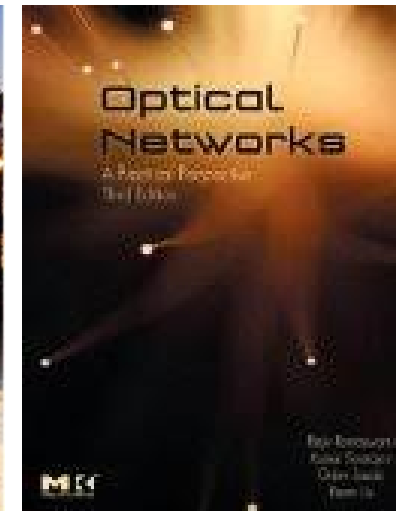
kchristodou@di.uoa.gr

<https://eclass.uoa.gr/courses/DI469/>

# Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων

## Θεματικές Ενότητες (ΘΕ) μαθήματος

- Εισαγωγή
- Δίκτυα Κορμού και Μητροπολιτικά Δίκτυα  
(Οπτικά Δίκτυα Μεταγωγής Μήκους Κύματος)
- **Δίκτυα πρόσβασης – Ενσύρματα**  
(Δίκτυα καλωδίου, DSL, παθητικά οπτικά δίκτυα)
- Δίκτυα πρόσβασης – Ασύρματα/Κινητά Δίκτυα  
(4G και 5G)
- Δίκτυα κέντρων δεδομένων  
(Datacenter networks)



### Σχετικά βιβλία:

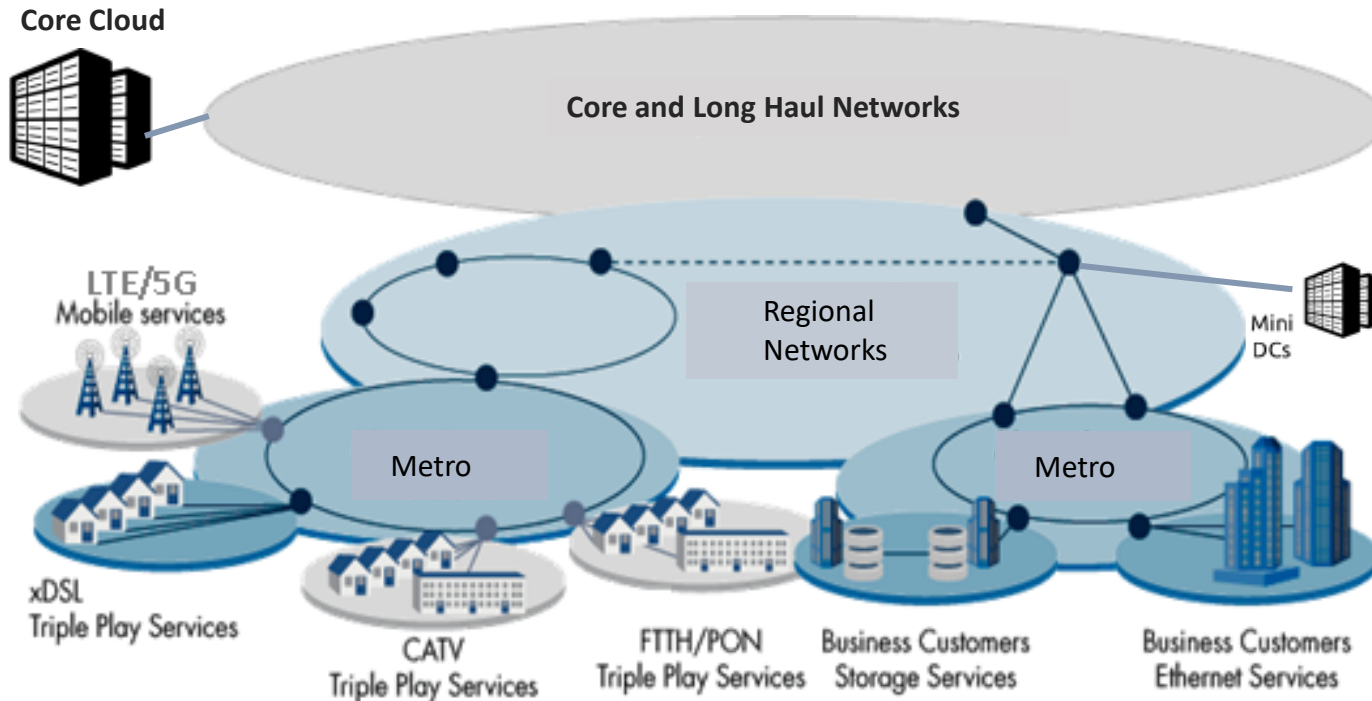
- 1) Computer Networking: A Top-Down Approach, by Kurose & Ross, Addison-Wesley, 8<sup>η</sup> Έκδοση, Ελληνική Μετάφραση: Εκδόσεις : Μ. Γκιούρδας
- 2) Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition, by R. Ramaswami, K. Sivarajan, G. Sasaki, The Morgan Kaufmann Series
- 3) 5G Mobile Networks: A Systems Approach, Larry Peterson, Oguz Sunay, and Bruce Davie, MC publishers

# Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- Γενικά χαρακτηριστικά δικτύων πρόσβασης
- Cable Access
- Digital Subscriber Line (DSL)
- Passive Optical Networks
  - Λειτουργία TDM - PON



# Δομή του διαδικτύου – Τμήματα



- Το Διαδίκτυο στην πράξη υλοποιείται σε τμήματα που χρησιμοποιούν **διαφορετικές τεχνολογίες**
- **Δίκτυα κορμού** (core and long haul)
- **Περιφερειακά** (regional)
- **Μητροπολιτικά** (metro)
- **Δίκτυα πρόσβασης** (από χρήστη ως τον πρώτο δρομολογητή)

- Το δίκτυο πρόσβασης είναι το τελευταίο ή το πρώτο “σκέλος” του δικτύου, από τον κόμβο (κεντρικό γραφείο - central office CO) του παρόχου δικτυακών υπηρεσιών (ISP) προς το σπίτι ή την επιχείρηση
- Στη βιβλιογραφία αναφέρεται: “last-mile”, “first-mile”, “last-leg”
- Διάφορες τεχνολογίες: xDSL, Cable, PON (FTTH), Wireless (WiMax, 3G, 4G, 5G)

# Δίκτυα Πρόσβασης – Μέσο μετάδοσης

Διαφορετικά μέσα μετάδοσης / διαφορετικές αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες

## 1. Twisted pair (copper)

- Digital Subscriber Line or Loop (DSL)

## 2. Coaxial and Hybrid fiber coaxial (HFC) / Cable network

- Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS)

## 3. Fiber to the x (FTTx) x=Home or Building

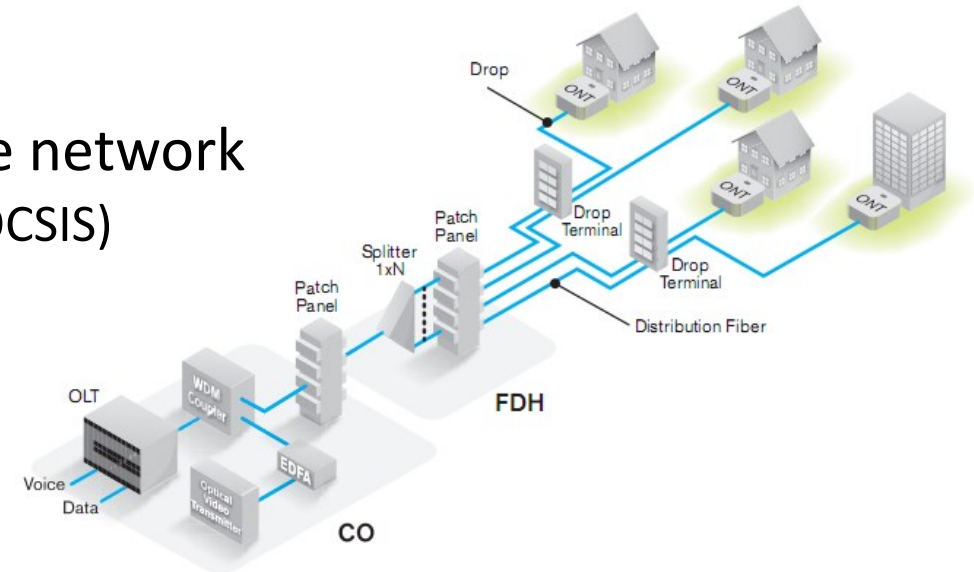
- Passive Optical Networks (PON)

## 4. Wireless

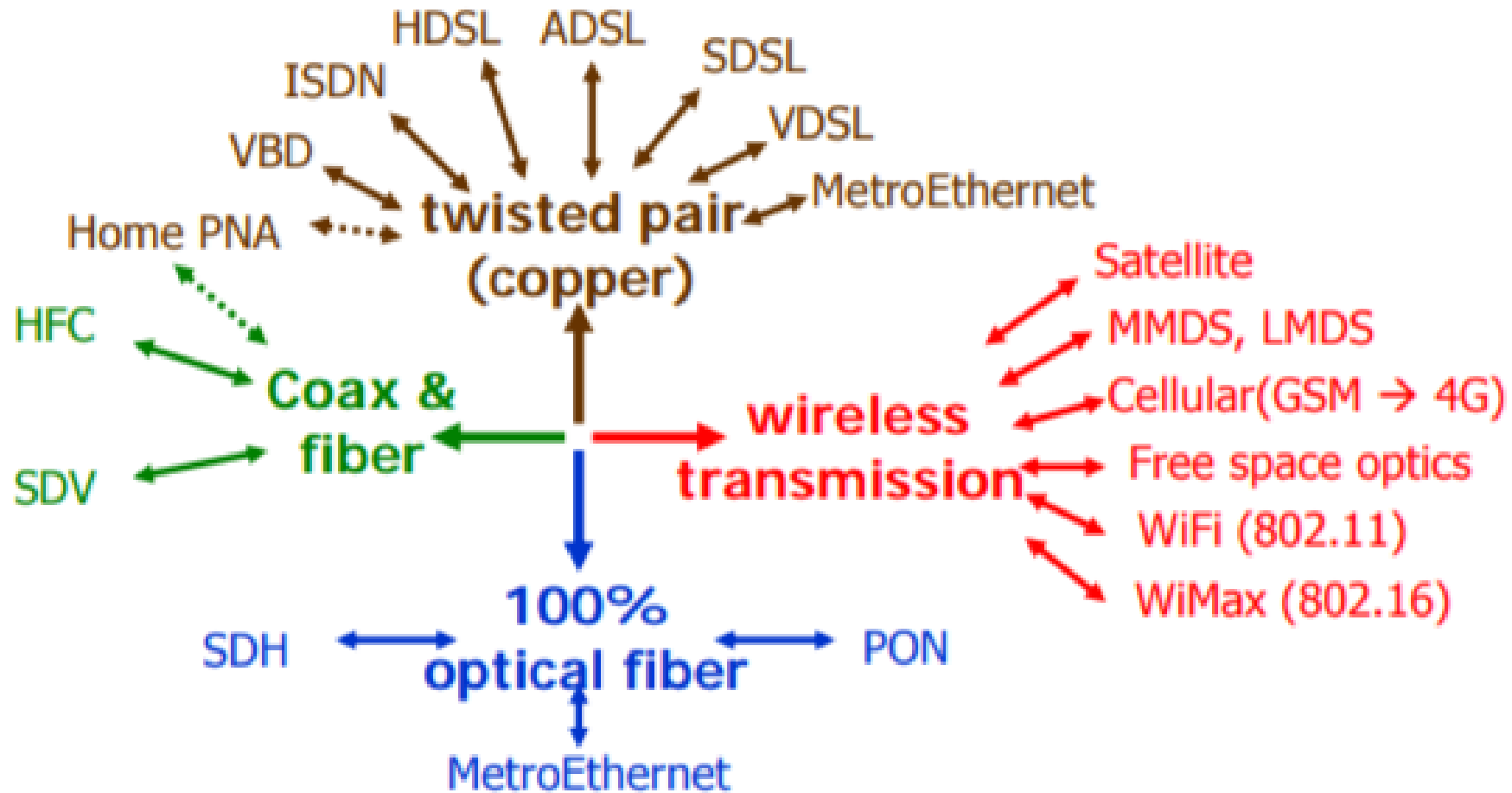
- WiMax, 3G, 4G, 5G

- Οι 1-3 είναι για «οικιακή» ευρυζωνική πρόσβαση, η 4 κυρίως για μεμονωμένες κινητές συσκευές αλλά χρησιμοποιείται και για «οικιακή» ευρυζωνική πρόσβαση (wireless broadband access – WBA)

- Οι 1 και 2 χρησιμοποιούν προϋπάρχουσες υποδομές (π.χ. η 2 στις ΗΠΑ που υπήρχαν ομοαξονικά καλώδια - CableTV)
- Τα τελευταία χρόνια γίνονται μεγάλες επενδύσεις παγκοσμίως στην 3



# Τεχνολογίες δικτύων πρόσβασης



# Τεχνολογίες δικτύων πρόσβασης

## Δυνατότητες/Περιορισμοί



DEPLOYMENT TECHNOLOGY	MAX SPEED DOWNSTREAM	MAX SPEED UPSTREAM	EFFICIENCY RANGE	EVOLUTION OF THE TECHNOLOGY
ADSL, ADSL2, ADSL2+	24 Mbps	3Mbps	5 Km	VDSL
VDSL, VDSL2, Vectoring, 35b Supervectoring	250 Mbps	40 Mbps	1 Km	G.mgfast (XG-fast/NG-fast) or Terabit DSL (TDSL)
G.Fast	1 Gbps	1,4 Gbps	100 m	G.mgfast (XG-fast/NG-fast) or Terabit DSL (TDSL)
HFC DOCSIS 3.1 *	10 Gbps *	1 Gbps *	2 - 100 Km	DOCSIS 4.0
HFC DOCSIS 4.0 *	10 Gbps *	6 Gbps *	2 - 100 Km	Future technology improvements and evolutions
FTTH GPON *	2.5 Gbps *	1.25 Gbps *	20 km	XGS-PON or NG-PON2
XGS-PON *	10 Gbps *	10 Gbps *	40 km	25/50GPON or 100GPON
NG-PON2 *	40 Gbps *	10-40 Gbps *	40 km	25/50GPON or 100GPON
FTTH Point-to-Point (PtP)	10 Gbps	10 Gbps	20 km	Future technology improvements and evolutions

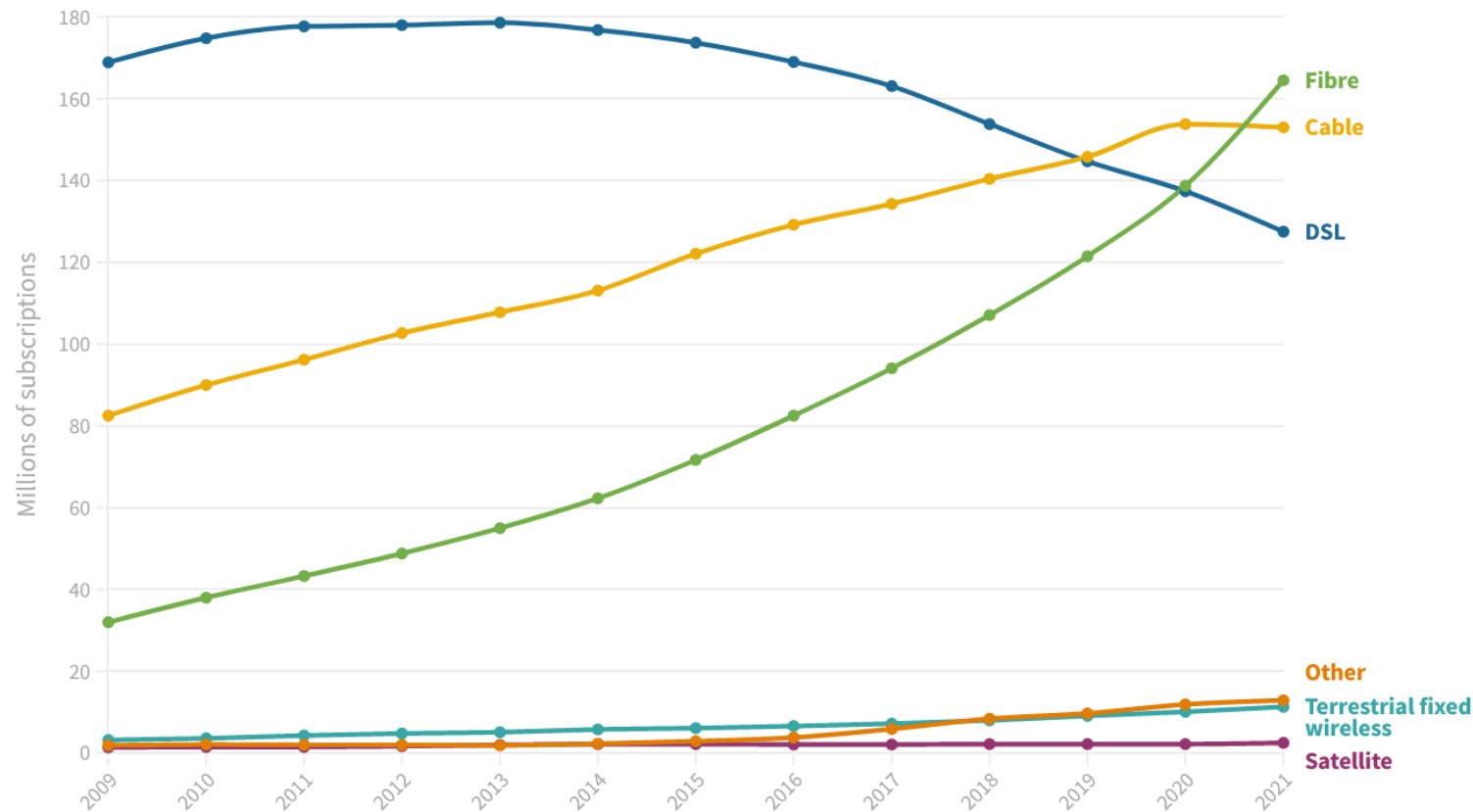
\* Shared BW



# Διάδοση τεχνολογιών πρόσβασης

## Progression in fixed broadband subscriptions by technology

OECD countries, 2009-2021



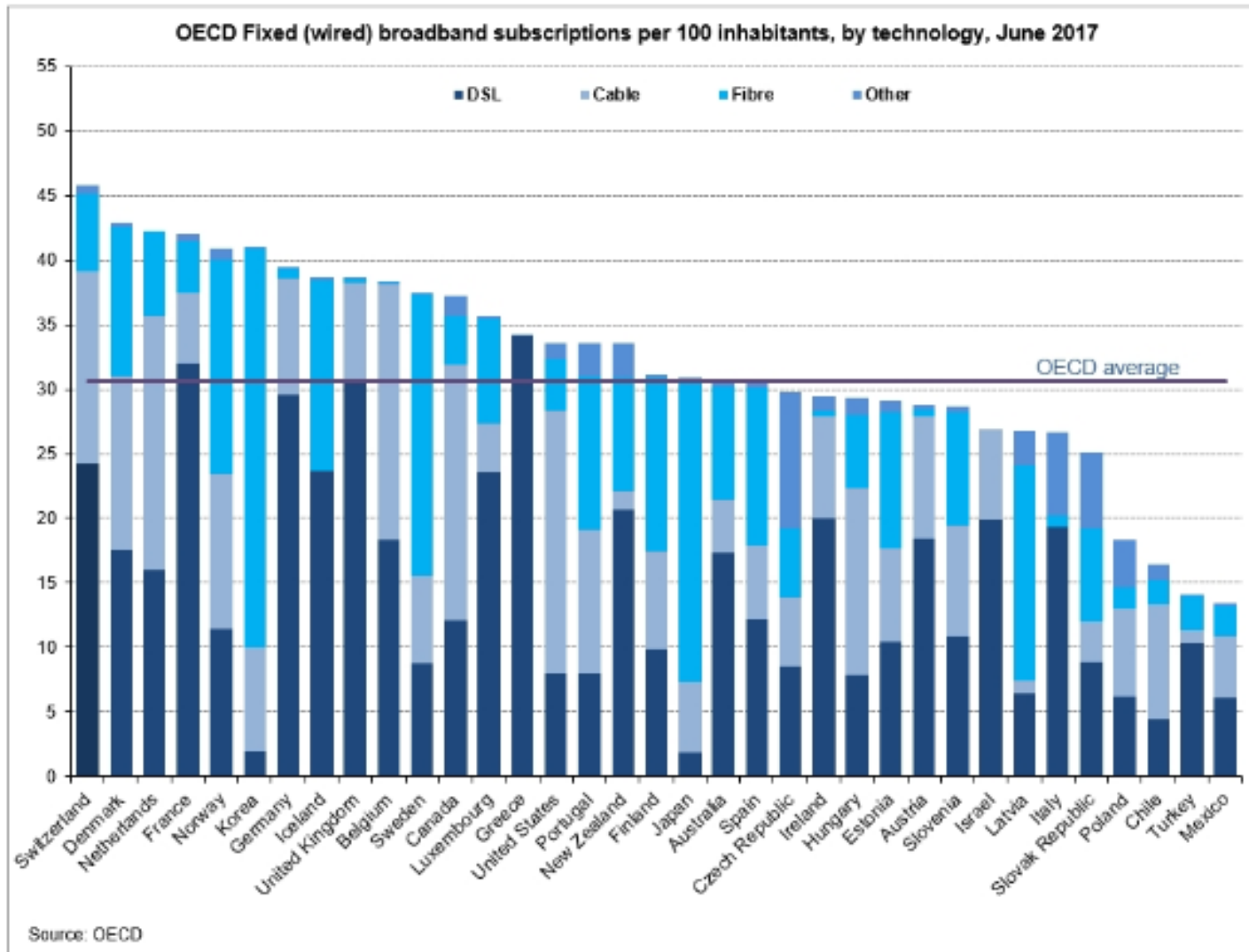
Source: <http://oe.cd/broadband> • July 2022



- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)
- Statistics reflect (fixed broadband) home users
  - Not all countries included (e.g. China is not an OECD member)
- Fiber (or Fibre) overtook all others in 2021

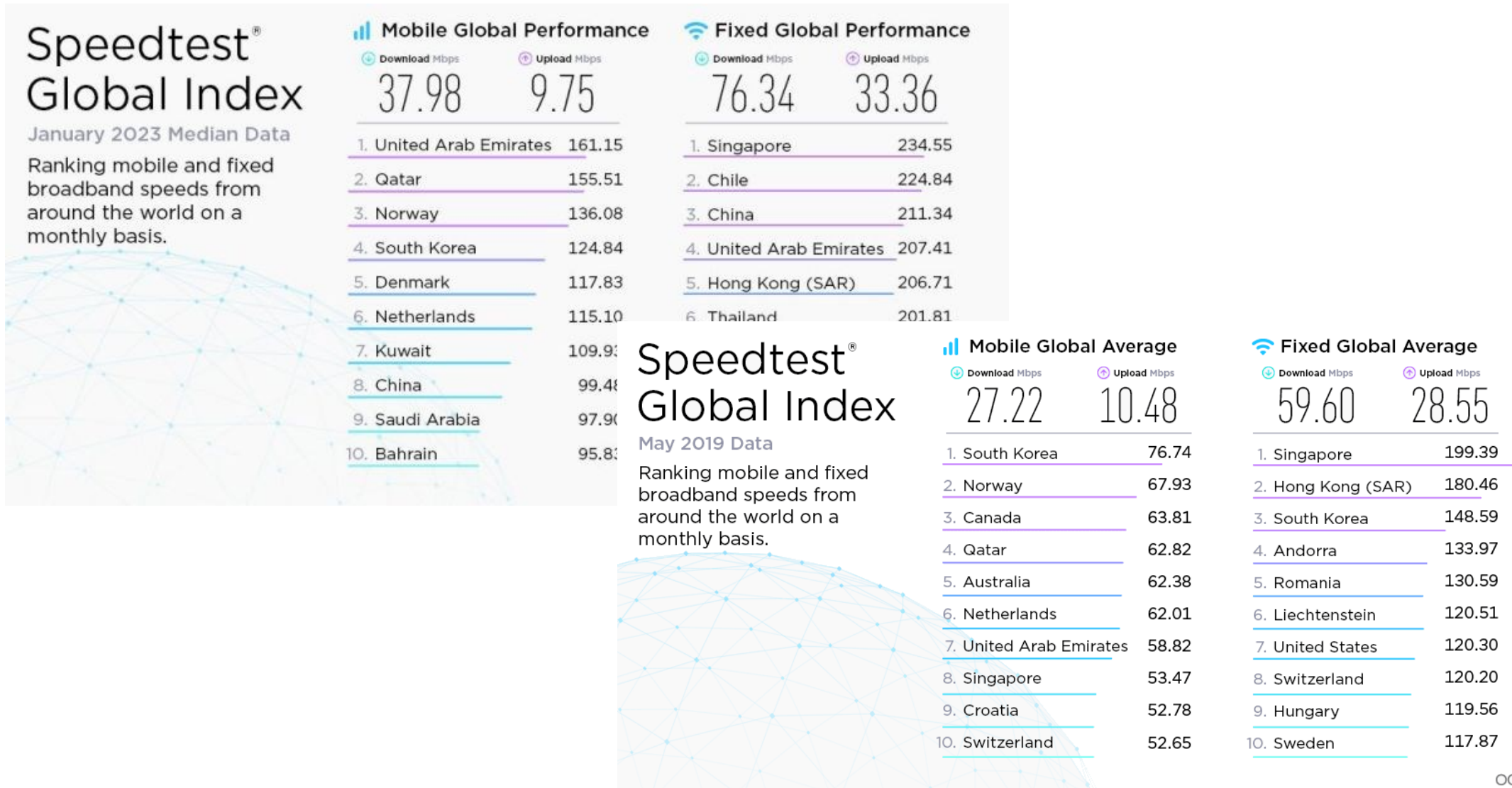


# OECD broadband statistics (2017)



- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)
- Statistics reflect home users
- In Japan, Korea and Sweden Fiber broadband subscriptions are dominant
- In Greece broadband subscriptions are DSL almost 100% (2017)
- Switzerland is at the top of the list, with almost 47% of population having broadband access (2017)
- China (and others) not an OECD member and therefore not included
- "Other" technology are mostly fixed wireless access (FWA)

# Ταχύτητες πρόσβασης στο internet



# Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- Γενικά χαρακτηριστικά δικτύων πρόσβασης
- Cable Access
- Digital Subscriber Line (DSL)
- Passive Optical Networks
  - Λειτουργία TDM – PON
  - Framing
  - QoS and DBA



# Δίκτυο πρόσβασης – απαιτήσεις χρηστών

- Οικιακοί χρήστες: πρόσβαση στο Διαδίκτυο, υπηρεσίες παροχής περιεχομένου όπως βίντεο κατά παραγγελία (video on demand), τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας
- Εταιρικοί χρήστες: πρόσβαση στο Διαδίκτυο και σύνδεση του τοπικού τους δικτύου με τα γραφεία της εταιρίας σε όλο τον κόσμο (VPN)
- Οι ανάγκες τηλεσυνεργασίας και τηλεεκπαίδευσης έχουν αυξηθεί
- Νέες εφαρμογές απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση (gaming, VR, AR)
- Απαιτήσεις για δίκτυο πρόσβασης που
  - Να έχει μεγάλο εύρος ζώνης (βασικός παράγοντας)
  - Να υποστηρίζει πολλές υπηρεσίες (διαφοροποίηση υπηρεσιών)

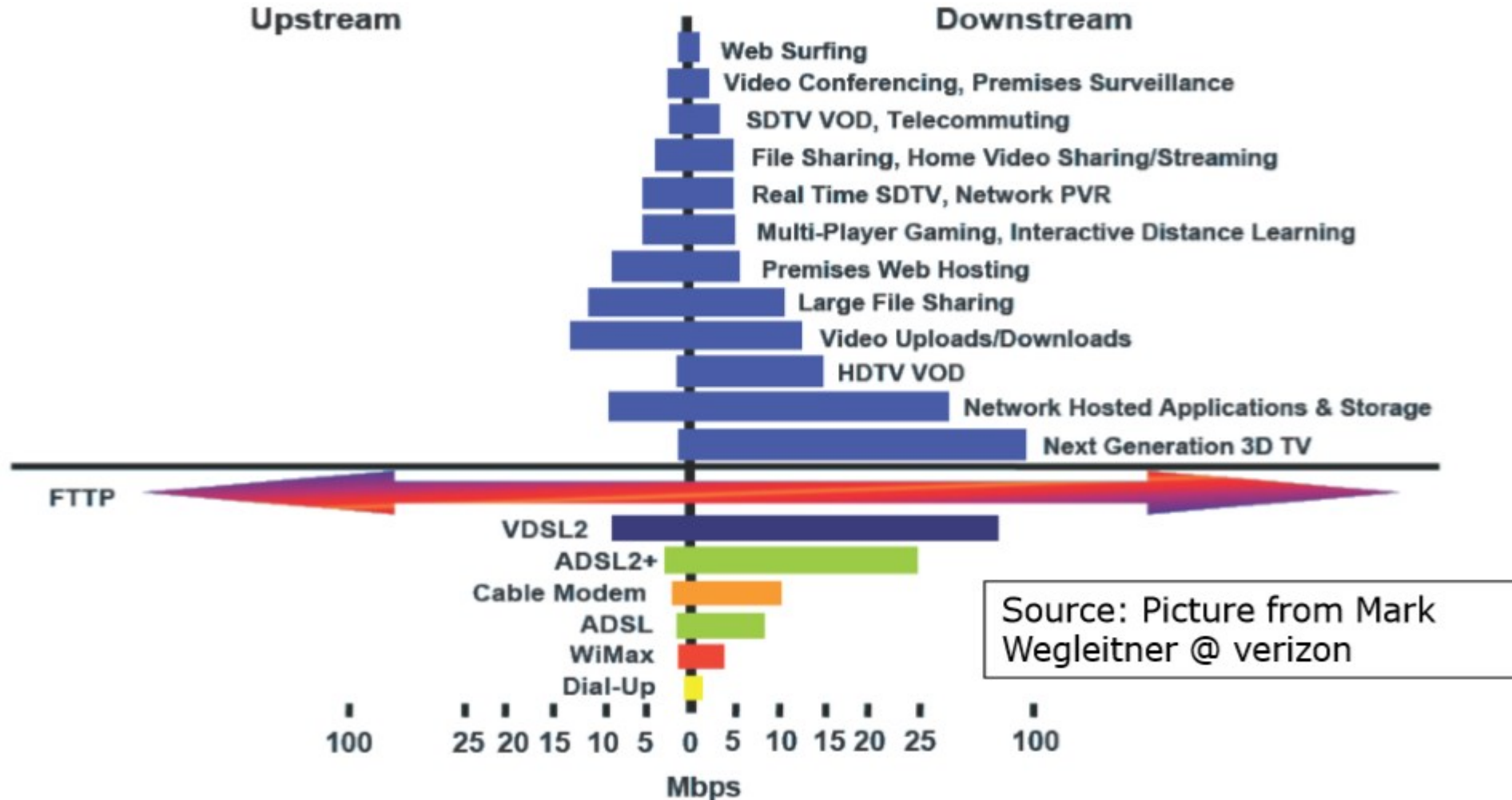


# Εφαρμογές και υπηρεσίες – μια ταξινόμηση

Οι υπηρεσίες μπορούν να ταξινομηθούν βάσει 3 βασικών κριτηρίων

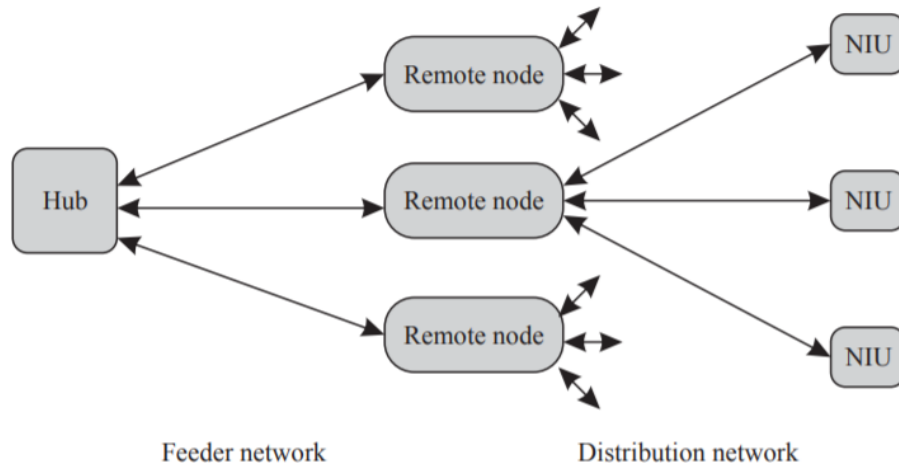
1. Απαίτηση εύρους ζώνης/ρυθμού επικοινωνίας, αλλά και καθυστέρησης
  2. Συμμετρική επικοινωνία , π.χ. τηλεδιάσκεψη, ή ασύμμετρη, π.χ. βίντεο
    - Συνήθως στις ασύμμετρες υπηρεσίες περισσότερο εύρος ζώνης απαιτείται από τον πάροχο υπηρεσιών προς τον χρήστη (downstream)
  3. broadcast ή switched υπηρεσία
    - Broadcast υπηρεσία: κάθε χρήστης λαμβάνει τις ίδια δεδομένα, π.χ., τηλεόραση
    - Switched υπηρεσία: διαφορετικοί χρήστες λαμβάνουν διαφορετικά δεδομένα, π.χ., πρόσβαση στο Διαδίκτυο
- Αντίστοιχη ταξινόμηση στα δίκτυα - θα τα συζητήσουμε από την πλευρά του δικτύου

# Εφαρμογές και υπηρεσίες – ρυθμοί μετάδοσης



Source: Picture from Mark Wegleitner @ verizon

# Δίκτυο πρόσβασης – Γενική αρχιτεκτονική



- Ένα δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από: **hub** και **network interface units (NIUs)**
- Για παράδειγμα στο PON το hub είναι το Central Office (CO) του παρόχου με εξοπλισμό Optical Line Terminal (OLT) και NIUs τα modems / Optical Network Units (ONUs)
- Κάθε hub εξυπηρετεί πολλά σπίτια και επιχειρήσεις / NIUs
- Αντί για απευθείας καλώδια από το hub σε κάθε NIU είναι δυνατόν να υπάρχει ένα ακόμα επίπεδο ιεραρχίας τα **remote nodes (RNs)** μεταξύ του hub και NIUs
  - Κάθε hub μπορεί να συνδέεται με πολλά RNs και κάθε RN με πολλά NIUs
- Το δίκτυο hub-RNs ονομάζεται **feeder**, και το δίκτυο RN-NIUs ονομάζεται **distribution**
- PON: RN = passive optical splitter, Hub = multi-chassis OLT @ CO
- DSL: RN = DSLAM, Hub = switch/router @ CO



# Αποκλειστικό και διαμοιραζόμενη εύρος ζώνης

- Το εύρος ζώνης (χωρητικότητα) που ανατίθεται στα network interface units (NIUs) μπορεί να είναι **αποκλειστικό** (dedicated) ή **διαμοιραζόμενο** (shared)
- Το hub/RN μπορεί να αναθέτει σε κάθε NIU το δικό του αποκλειστικό εύρος ζώνης
  - π.χ. αποκλειστικό μήκος κύματος σε PON ή αποκλειστική χρήση του καλωδίου από το DSLAM στο DSL modem
- Το hub/RN μπορεί να διαμοιράζει το συνολικό εύρος ζώνης (χωρητικότητα) στα NIU
  - Για την upstream μετάδοση (από τα NIU στο hub), χρειάζεται κάποια μορφή ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (**medium access control - MAC**) για τον συντονισμό της πρόσβασης στο κοινόχρηστο εύρος ζώνης από τα NIUs
- Τα δίκτυα HFC/Cable και (TDM)-PON διαμοιράζουν, τα DSL και (WDM)-PON δίνουν αποκλειστική χωρητικότητα

# Αποκλειστικό και διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης

- Εάν η κίνηση από/προς τα NIU είναι **εκρηκτική (bursty)** ο (δυναμικός) **διαμοιρασμός** του εύρους ζώνης είναι πιο αποδοτικός
- Αλλά, με **αποκλειστικό** εύρος ζώνης, κάθε NIU έχει **δεδομένη ποιότητα υπηρεσιών**, κάτι που είναι σχετικά δύσκολο με διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης
- Ένα άλλο μειονέκτημα του **διαμοιραζόμενου** εύρους ζώνης είναι ότι κάθε NIU πρέπει να διαθέτει οπτικά/ηλεκτρονικά που **λειτουργούν στο συνολικό εύρος ζώνης**, σε αντίθεση με κλάσμα του εύρους ζώνης σε αποκλειστικό εύρος ζώνης
- Η **αποδοτικότητα του διαμοιρασμού** του εύρους ζώνης εξαρτάται από το **MAC protocol** που χρησιμοποιείται

# Πρωτόκολλα MAC: ταξινόμηση

Τρεις γενικές κατηγορίες:

- **Στατική κατάτμηση καναλιού (αποκλειστική χωρητικότητα)**
  - διαίρεση του καναλιού σε “κομμάτια” (χρονοθυρίδες, συχνότητα, κώδικες)
  - εκχώρηση κομματιού στατικά σε κόμβο για αποκλειστική χρήση
- **Τυχαία πρόσβαση**
  - το κανάλι δεν διαιρείται, επιτρέπονται συγκρούσεις
  - μηχανισμός “ανάληψης” από συγκρούσεις
- **Εκ περιτροπής λειτουργία**
  - οι κόμβοι μεταδίδουν με τη σειρά, αλλά οι μεταδόσεις των κόμβων που έχουν να στείλουν περισσότερα μπορεί να διαρκέσουν περισσότερο

**Συνδυασμοί των παραπάνω**

# Broadcast και Switched δίκτυα πρόσβασης

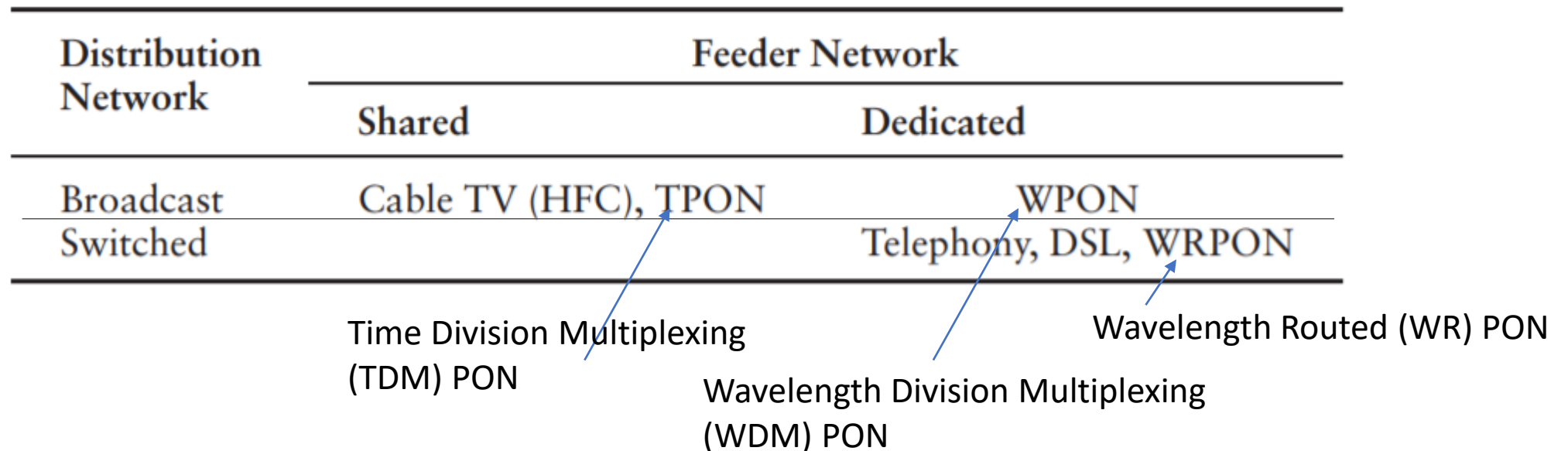
- Οι δικτυακές υπηρεσίες μπορεί να είναι **broadcast** ή **switched**
- Επίσης, το distribution δίκτυο μπορεί να είναι **broadcast** ή **switched**
  - Σε ένα broadcast δίκτυο το **Remote Node (RN)** «εκπέμπει» όλα τα δεδομένα που λαμβάνει από το feeder καλώδιο σε όλα τα Network Interface Units (NIUs)
  - Σε ένα switched δίκτυο το RN επεξεργάζεται τα δεδομένα και **στέλνει ξεχωριστές ροές** σε διαφορετικά NIUs
  - Γενικά τα Broadcast δίκτυα είναι καλά στην παροχή broadcast υπηρεσιών, τα Switched δίκτυα στην παροχή switched υπηρεσιών
  - Το ένα δεν αποκλείει το άλλο (π.χ. σε Broadcast δίκτυο μπορεί το κάθε NIU να επιλέγει τα δεδομένα που απευθύνονται σε αυτό)
- Συνδυασμοί υπηρεσιών και δικτυακών αρχιτεκτονικών είναι δυνατές

# Broadcast και Switched δίκτυα πρόσβασης

- Τα Broadcast δίκτυα είναι (συνήθως) **φθηνότερα** από τα switched δίκτυα
  - Η «εξυπνάδα» των δικτύων αυτών βρίσκεται στα NIUs, αλλά τα NIUs μπορεί να είναι ομοιόμορφα και να παράγονται μαζικά – οπότε να έχουν χαμηλό κόστος
- Τα Switched δίκτυα έχουν
  - **Περισσότερη ασφάλεια**: π.χ. είναι αδύνατο ένας συνδρομητής να i) υποκλέψει τα δεδομένα άλλου, ή ii) να επιφέρει βλάβη σε όλο το δίκτυο
  - **Ευκολότερο εντοπισμό της τοποθεσίας σφάλματος**
  - Πιο **περίπλοκη διαχείριση** των NIU (π.χ., όταν διαφορετικά NIU χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες)
  - **Απλούστερα NIU**, η «εξυπνάδα» βρίσκεται στο δίκτυο
- Τα δίκτυα HFC/Cable και PON είναι broadcast, το DSL είναι switched

# Κατηγοριοποίηση δικτύων πρόσβασης

- broadcast ή switched
- Αποκλειστικό ή διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης



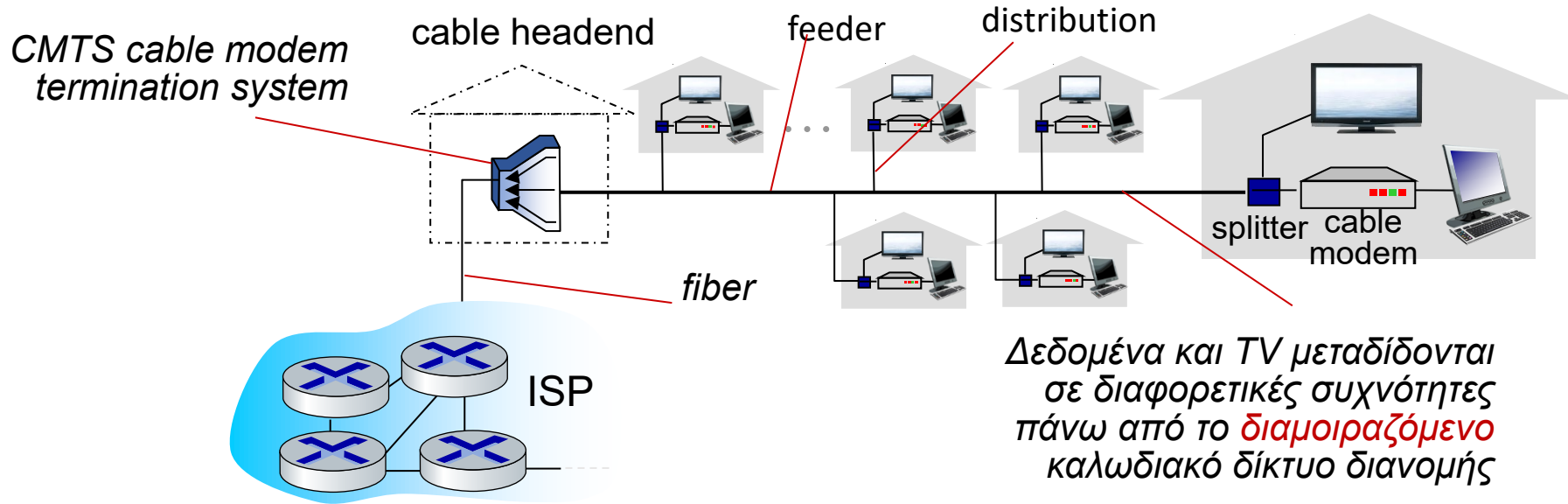
# Περιεχόμενα

- Εισαγωγή
- Γενικά χαρακτηριστικά δικτύων πρόσβασης
- Cable Access
- Digital Subscriber Line (DSL)
- Passive Optical Networks
  - Λειτουργία TDM – PON
  - Framing
  - QoS and DBA





# Δίκτυο πρόσβασης καλωδίου (Cable access network)



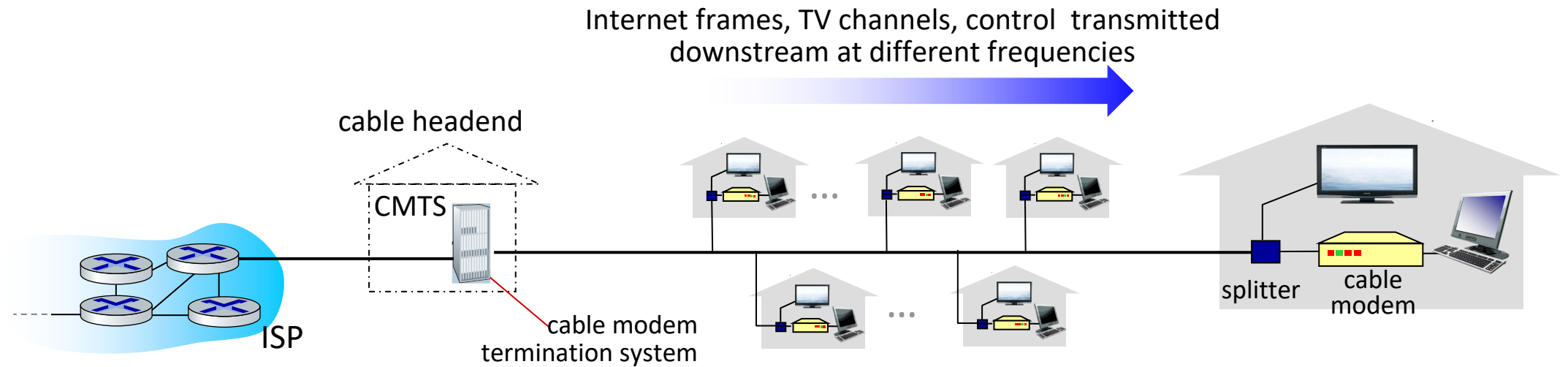
- HFC: hybrid fiber coax (υβριδικό δίκτυο ίνας και ομοαξονικού καλωδίου) ή Cable access
- HFC: Συνδέει τα σπίτια με το δρομολογητή του ISP
  - Τα σπίτια **διαμοιράζονται το δίκτυο πρόσβασης (ομοαξονικό καλώδιο)** μέχρι το CMTS
  - Cable / coax πρωτόκολλο: Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS)  
DOCSIS 1 (1997): 40 Mbps downstream, 10 Mbps upstream  
DOCSIS 4 (2017): 10 Gbps downstream, 6 Gbps upstream

# Δίκτυο πρόσβασης καλωδίου

- Το Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS) είναι διεθνές τηλεπικοινωνιακό πρότυπο που ορίζει τη μεταφορά δεδομένων υψηλού ρυθμού σε ένα υπάρχον σύστημα καλωδιακής τηλεόρασης (CATV)
- Χρησιμοποιείται από παρόχους καλωδιακής τηλεόρασης για παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσω της υπάρχουσας υποδομής – του **υβριδικού δικτύου ίνας και ομοαξονικού** καλωδίου (HFC)
- Το DOCSIS περιλαμβάνει δύο κύρια στοιχεία: i) cable modem στον πελάτη και ii) σύστημα τερματισμού καλωδιακού μόντεμ (cable modem termination system CMTS) στο headend (π.χ. Central Office or curb)
- Το CMTS έχει θύρες τερματισμού ενός ή συνήθως περισσότερων ομοαξονικών καλωδίων προς τους χρήστες και θύρες για επικοινωνία με τους δρομολογητές του ISP

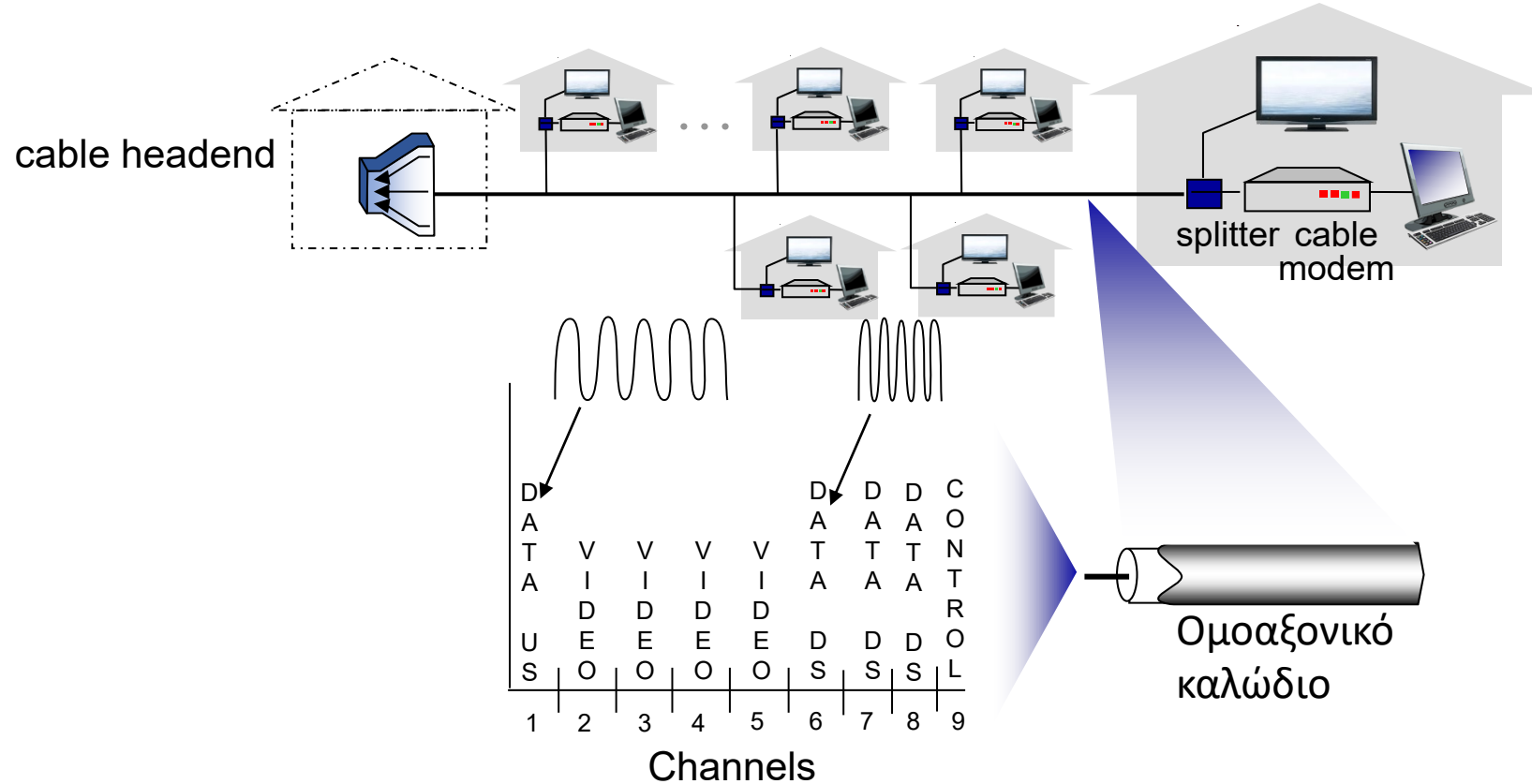


# Δίκτυο πρόσβασης καλωδίου - MAC



- **Πολλαπλά** κανάλια στην κατερχόμενη ζεύξη (downstream)
  - ένα μόνο CMTS εκπέμπει στο ομοαξονικό καλώδιο – δεν υπάρχουν συγκρούσεις (εφαρμόζεται όμως στον CMTS μηχανισμός ελέγχου προώθησης των πακέτων ώστε να γίνει αποδοτική και δίκαιη χρήση της κατερχόμενης χωρητικότητας)
- **Πολλαπλά** κανάλια στην ανερχόμενη ζεύξη (upstream)
  - **πολλαπλή πρόσβαση:** FDM, TDM και random access !

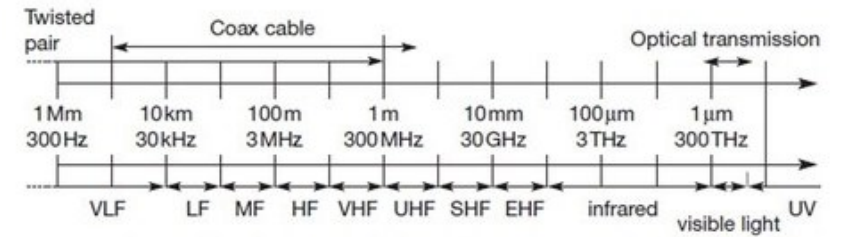
# Δίκτυο πρόσβασης καλωδίου - MAC



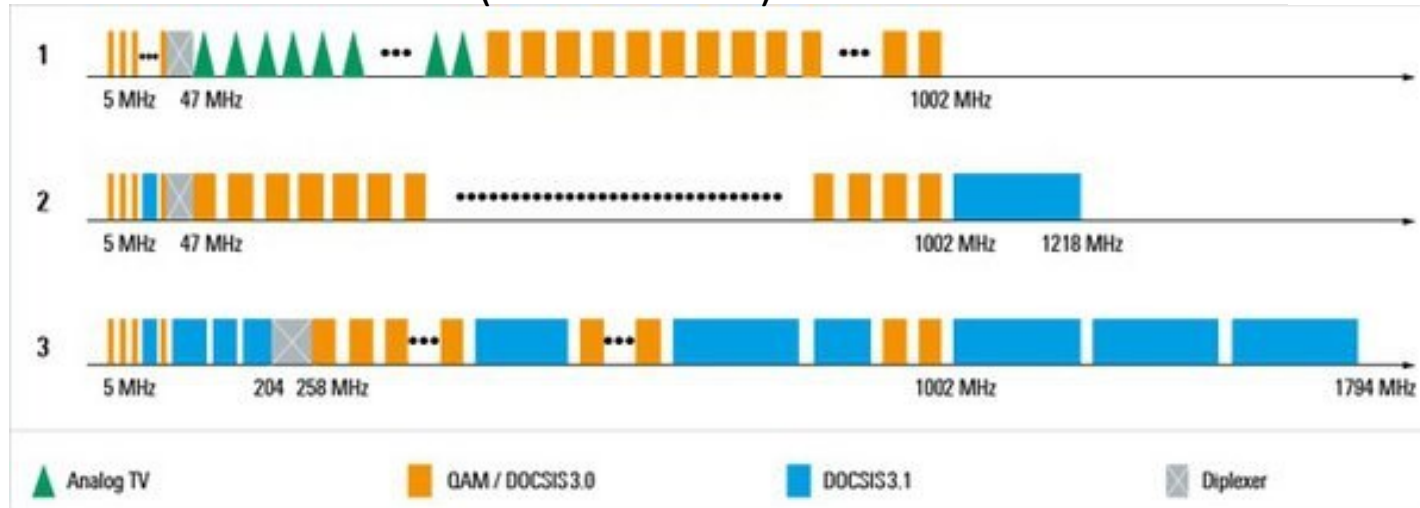
**Frequency Division Multiplexing (FDM):** διαφορετικά κανάλια μεταδίδονται σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, διαχωρισμός βίντεο από δεδομένα

**Frequency Division Duplex:** low frequencies for upstream, higher freq. (& wider) for downstream  
Επιπλέον μηχανισμός για επίλυση συγκρούσεων στις συχνότητες των δεδομένων

# DOCSIS physical layer



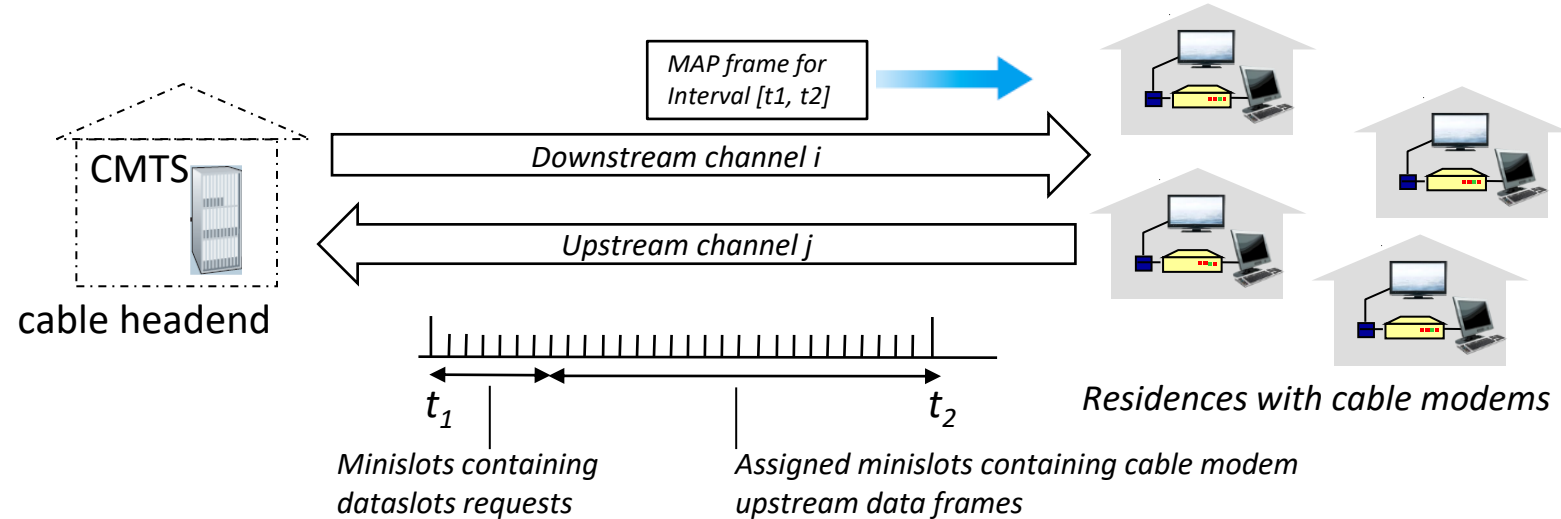
DOCSIS 3.1 (October 2013)



	Downstream	Downstream	Upstream	Upstream
Version	DOCSIS 3.0	DOCSIS 3.1	DOCSIS 3.0	DOCSIS 3.1
Channel bandwidth	6 MHz or 8 MHz	24 MHz to 192 MHz	0.2 MHz to 6.4 MHz	6.4 MHz to 96 MHz
Modulation	single carrier	OFDM	single carrier	OFDM
QAM order	up to 256 QAM	up to 4096 QAM	up to 64 QAM	up to 4096 QAM
Multiple access method			TDMA S-CDMA	TDMA- OFDMA
FEC	Reed Solomon	LDPC/BCH	Reed Solomon	LDPC/BCH

Various improvements (OFDM, higher QAM, FEC) enable DOCSIS 3.1 to achieve transmission rates of up to 10 Gbit/s in the downstream and 1 Gbit/s in the upstream

# Δίκτυο πρόσβασης καλωδίου - MAC

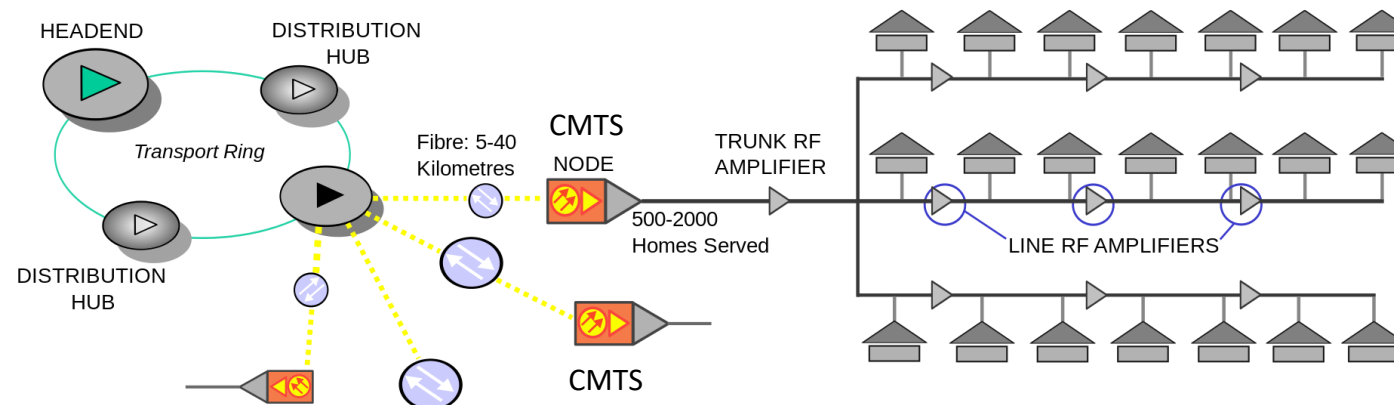


Specific (freq.) data channel in upstream: TDM θυρίδες, ανταγωνισμός για κάποιες, ανάθεση άλλων

- Το upstream πλαίσιο έχει 2 μέρη: i) χρονοθυρίδες αιτήσεων, ii) χρονοθυρίδες δεδομένων
- 1<sup>ο</sup> μέρος upstream πλαισίου: χρονοθυρίδες με αιτήσεις ζήτησης χρονοθυρίδων δεδομένων από τους χρήστες, συγκρούσεις – επίλυση με μηχανισμούς τυχαίας πρόσβασης (exponential backoff)
- Το CMTS ακούει τις (επιτυχημένες) αιτήσεις και αναθέτει χρονοθυρίδες
- Στο downstream πλαίσιο υπάρχει πεδίο MAP που το ακούνε/διαβάζουν όλοι: αναθέτει τις χρονοθυρίδες δεδομένων του επόμενου upstream πλαισίου
- 2<sup>ο</sup> μέρος upstream πλαισίου: χρονοθυρίδες δεδομένων που έχουν ανατεθεί στο MAP του προηγούμενου downstream πλαισίου (μετάδοση χωρίς συγκρούσεις)

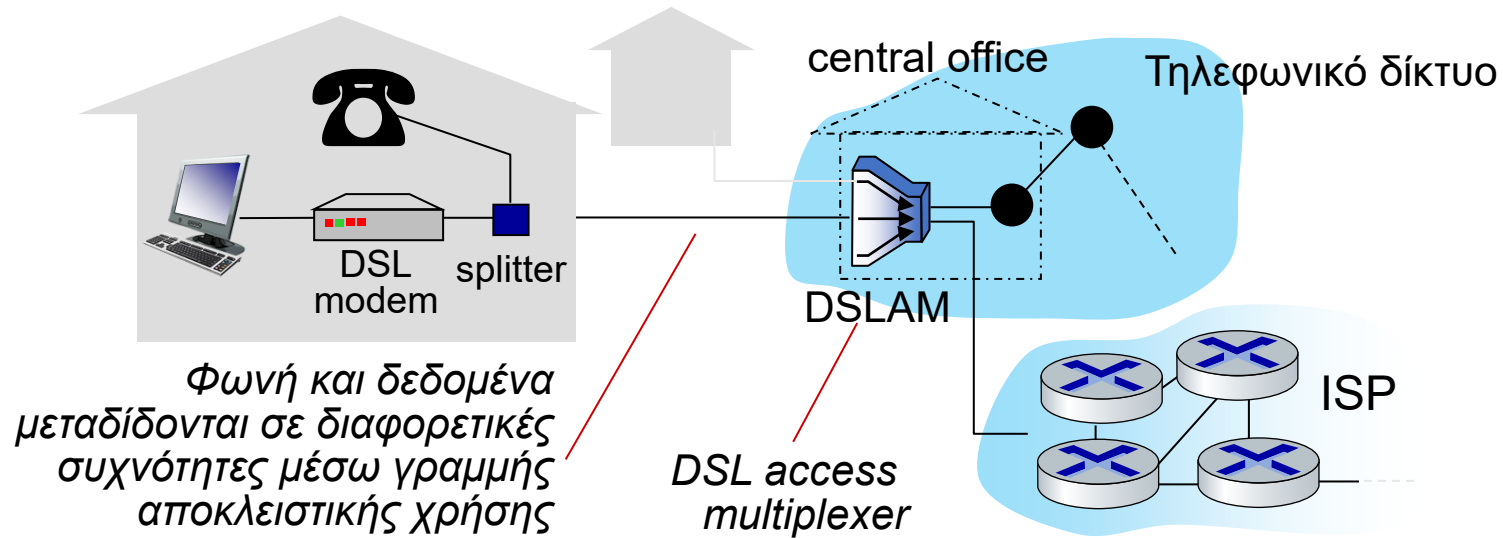
# Δίκτυο πρόσβασης καλωδίου

- Διαμοιραζόμενο δίκτυο
  - coax tree με coax legs, ενισχυτές (RF), διακλαδωτές, network interface units (NIUs)/modems,
  - Διακλαδωτές παίζουν τον ρόλο Remote Nodes (RNs) - broadcast
  - Το cable modem διαχωρίζει το σήμα σε σήμα τηλεόρασης και δεδομένων
- Κάθε coax tree εξυπηρετεί 500-2000 σπίτια, κάθε coax leg εξυπηρετεί 50–500 σπίτια
- Κάποια μειονεκτήματα
  1. το περιορισμένο εύρος ζώνης
  2. η περιορισμένη αξιοπιστία
  3. η απαίτηση για τροφοδοσία των ενισχυτών





# Δίκτυο πρόσβασης Digital Subscriber Line-DSL

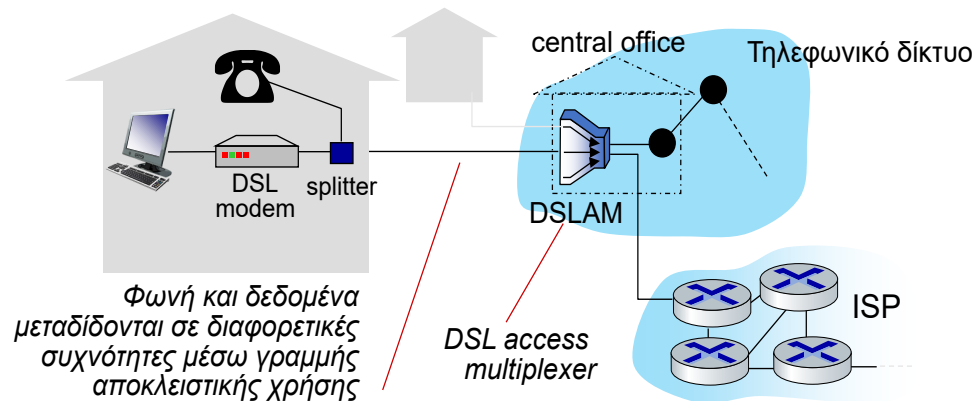


- Χρήση **υπάρχουσας** τηλεφωνικής γραμμής (χαλκός - συνεστραμμένο ζεύγος) από/προς το «κέντρο» του τηλεφωνικού παρόχου
  - τα δεδομένα πάνω από τη γραμμή DSL πάνε στο Διαδίκτυο
  - η φωνή στο τηλεφωνικό δίκτυο, σήμερα: voice-over-IP ο διαχωρισμός σε 2 δίκτυα είναι σπάνιος
- Μη διαμοιραζόμενο δίκτυο, P2P από το modem του χρήστη ως το DSL access multiplexer (DSLAM)
  - **ADSL** — Asymmetric DSL; 1.5 Mbps (5Km) – 8 Mbps (2Km) downstream, 64–640 kbps upstream
  - **VDSL** — Very high speed DSL; up to 52 Mbps downstream, 26 Mbps upstream, 3Km
- Ανάλογα την τεχνολογία DSL και απόσταση, το DSLAM μπορεί να είναι στο ΚΑΦΑΟ ή στα γραφεία (CO)

# Δίκτυο πρόσβασης DSL

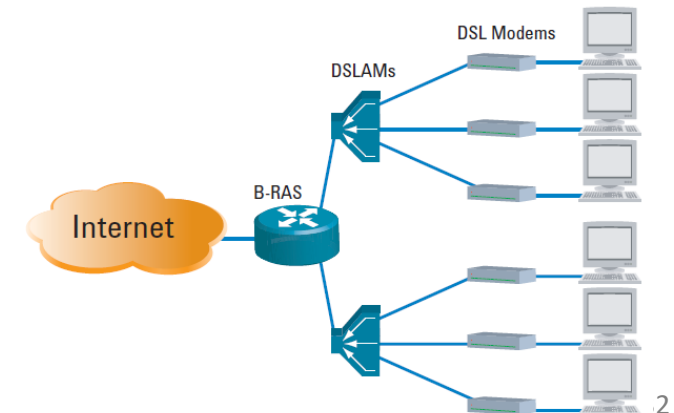
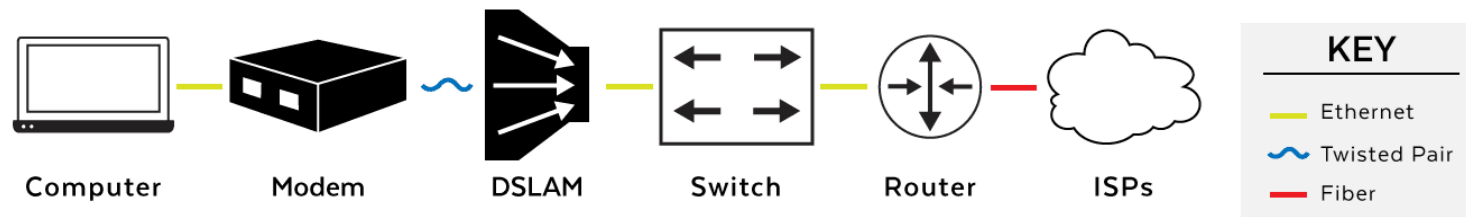
- Τα δεδομένα και η φωνή μεταδίδονται σε διαφορετικές συχνότητες προς/από το DSLAM
  - Χρησιμοποιούνται διαχωριστές ή φίλτρα
    - Παρόμοια λειτουργία, ο διαχωριστής διαιρεί το σήμα σε δύο μέρη, το φίλτρο μπλοκάρει π.χ. το DSL σήμα και επιτρέπει την φωνή να περάσει
  - Σήμερα η σύνδεση του τηλεφώνου γίνεται συνήθως πάνω στον modem, με χρήση VoIP
- Στο DSLAM τερματίζουν/ πολυπλέκονται πολλοί χρήστες (π.χ. 32)

Ο χρήστης έχει αποκλειστικά τη γραμμή modem-DSLAM, μετά κοινή (απλά η συμφόρηση γίνεται στο δεύτερο βήμα) – oversubscription πόσοι πάνω στο DSLAM και πως (με τι ρυθμό) βγαίνουν



# Δίκτυο πρόσβασης DSL

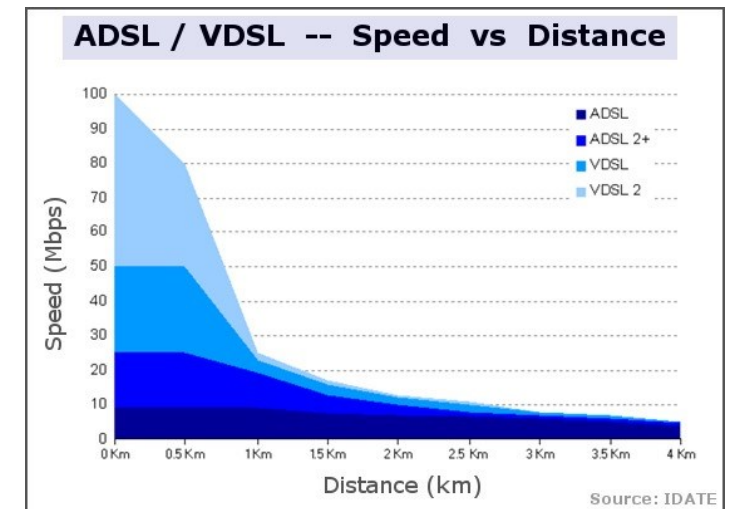
- Το DSLAM βρίσκεται στο κεντρικό γραφείο (central office) ή στο ΚΑΦΑΟ
- Κίνηση από πολλούς χρήστες συναθροίζεται σε ένα DSLAM, πολλαπλά DSLAM συναθροίζονται μέσω L2 switches και μετά μέσω ενός router βγαίνουν στο Διαδίκτυο
- Συνήθως ο πρώτος router ονομάζεται broadband remote access server (BRAS, B-RAS)
  - Ο BRAS μπορεί να υπάρχει και στα cable/HDF και στα PON δίκτυα πρόσβαση
  - Παρέχει λειτουργίες authentication, authorization and accounting
  - Παρέχει L3 συνδεσιμότητα και δρομολογεί την IP κίνηση μέσω του δικτύου του ISP, όντας ο 1<sup>ος</sup> IP κόμβος
    - Από εκεί και κάτω ή επικοινωνία είναι layer 2 (router – DSLAM – χρήση)
  - Επιβάλλει πολιτικές ποιότητας υπηρεσίας (QoS)



# Παραλλαγές DSL

- Οι παραλλαγές DSL (A-, V-DSL) χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες φάσματος και τεχνικές διαμόρφωσης (QAM)
  - Χρήση υψηλότερων συχνοτήτων δίνει πλατύτερο φάσμα και μεγαλύτερες ταχύτητες, αλλά το σήμα έχει μεγαλύτερη εξασθένηση και ευαισθησία στις παρεμβολές (άρα μικρότερη απόσταση μετάδοσης)
- Οι περισσότερες παραλλαγές DSL έχουν ασύμμετρες ταχύτητες upstream και downstream
- Οι πραγματικές ταχύτητες επηρεάζονται από την κατάσταση των καλωδίων, απόσταση και θόρυβο ή παρεμβολές στη γραμμή
- Το VDSL συνήθως τερματίζει στο ΚΑΦΑΟ και υπάρχει ίνα ΚΑΦΑΟ - central office (P2P ή Fiber to the Curb - FTTC)

Type	Description	Data Rate Upstream Data Rate	Max Downstream Data Rate	Max Reach	POTS Support
HDSL	High Bit Rate - DSL	1.54Mbps	1.54Mbps	3650mtrs	No
ADSL	Asymmetric - DSL	800Kbps	8Mbps	5500mtrs	Yes
SDSL	Symmetric - DSL	2.3Mbps	2.3Mbps	6700mtrs	No
VDSL	Very High Bit Rate - DSL	16Mbps	52Mbps	1200mtrs	Yes
VDSL2	Very High Bit Rate - DSL (2nd Generation)	100Mbps	100Mbps	<1500mtrs	Yes



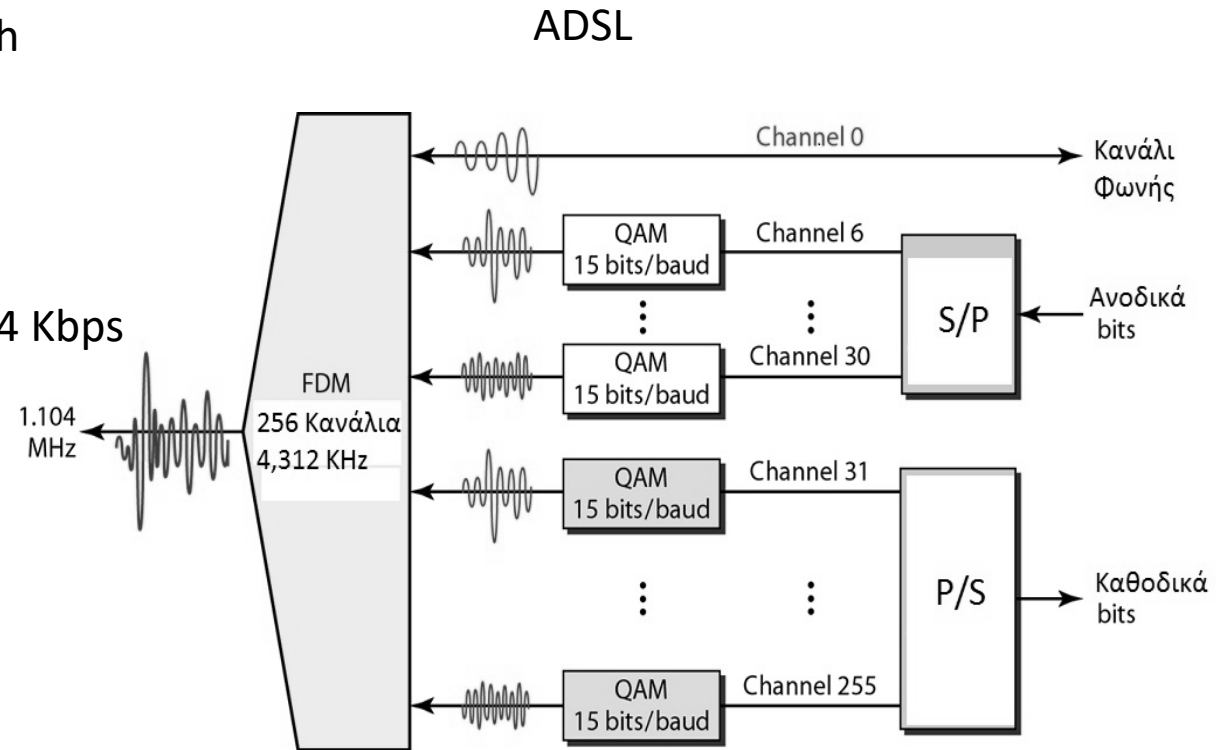
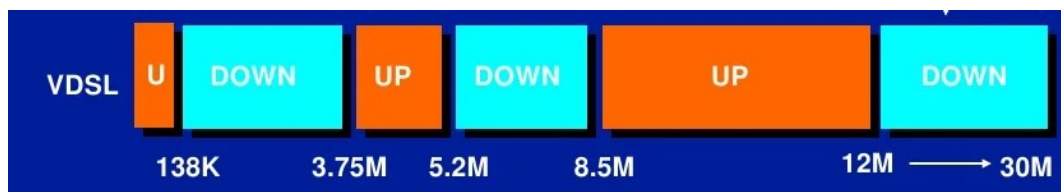
# ADSL physical layer

- 256 channels (υποφέρουσα ή τόνος), 4.3125 KHz each
  - $256 \times 4.3125 \text{ kHz} = 1.104 \text{ MHz}$
- First channel (0-4.3125 KHz) voice
- Uses max  $32K = 2^{15}$  QAM (15 bits/symbol)

Max rate per channel:  $15 \text{ bits/symbol} \cdot 4.3125 \text{ KHz} = 64.4 \text{ Kbps}$

Max data rate =  $N_{\text{channel}} \cdot 64 \text{ Kbps}$

e.g. DS =  $224 \cdot 64 \text{ Kbps} = 14.3 \text{ Mbps}$



VDSL διαφορετικές ζώνες φάσματος και διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης

# Cable (HFC) vs DSL

- Η κύρια διαφορά μεταξύ Cable (HFC) και DSL είναι το μέσο μετάδοσης
- Cable χρησιμοποιεί την υποδομή καλωδιακής τηλεόρασης (ομοαξονικά καλώδια)
  - broadcast (τηλεόραση)
  - χρησιμοποιεί ένα καλώδιο ανά περιοχή, που σημαίνει ότι όσο περισσότεροι το χρησιμοποιούν, τόσο πιο 'αργό' γίνεται
  - Έχει καλή απόδοση σε μεγάλες αποστάσεις (χρήση π.χ. σε αγροτικές περιοχές των ΗΠΑ), καλύτερο καλώδιο, χρήση ενισχυτών
- DSL χρησιμοποιεί την υποδομή τηλεφώνου (συνεστραμμένο ζεύγος)
  - P2P προς κάθε χρήστη (switched)
  - Ανεξάρτητα από το πόσοι χρησιμοποιούν Internet/τηλέφωνο, έχει σταθερή ταχύτητα ως το DSLAM (η συνάθροιση και συμφόρηση γίνεται μετά....)
  - Δεν πληρούν όλοι τις προϋποθέσεις για γρήγορες εκδόσεις (π.χ. VDSL2), επειδή πρέπει να βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το DSLAM

# Next-generation Access Network - FTTx

- Τα δίκτυα πρόσβασης της επόμενης γενιάς θα βασίζονται σε τεχνολογίες οπτικών δικτύων λόγω της αυξημένης εμβέλειας και του εύρους ζώνης τους
- Η οπτική ίνα είναι ικανή να παρέχει ολοκληρωμένες υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο υψηλής ευκρίνειας σε αποστάσεις 20 χιλιομέτρων και άνω στους συνδρομητές
- Ινα:
  - Χαμηλή εξασθένηση → μεγάλες αποστάσεις
  - Υψηλή χωρητικότητα → πολλοί χρήστες
  - Πολύ ακριβή εγκατάσταση (σκάψιμο), μερικές φορές δεν είναι οικονομικά βιώσιμη
    - Άλλες τεχνολογίες πρόσβασης συμπληρώνουν (ειδικά τα ασύρματα)
- Το FTTx παρέχει οπτικές ίνες απευθείας στο σπίτι ή πολύ κοντά στο σπίτι (από όπου μπορούν να αναλάβουν τεχνολογίες όπως το VDSL υψηλών ρυθμών)



# Περιεχόμενα

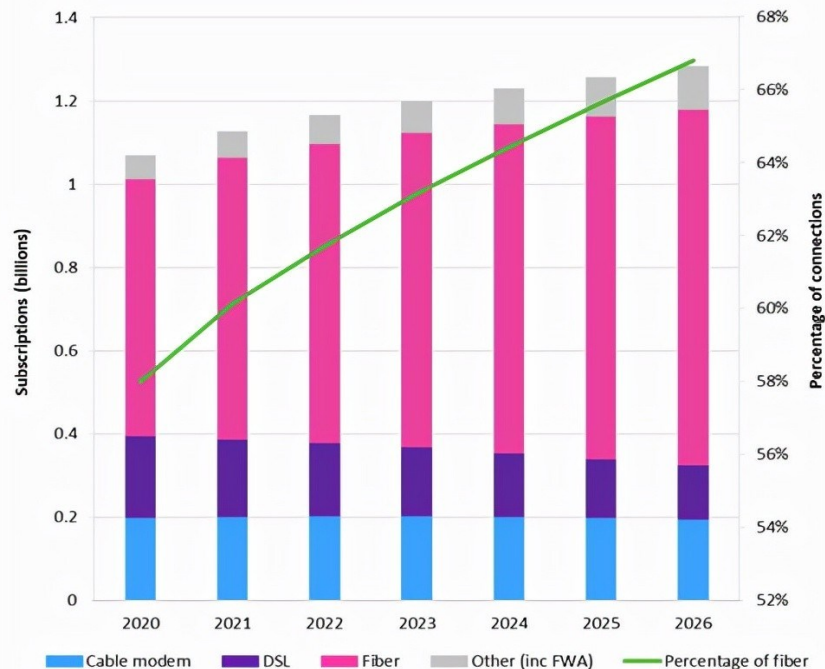
- Εισαγωγή
- Γενικά χαρακτηριστικά δικτύων πρόσβασης
- Cable Access
- Digital Subscriber Line (DSL)
- Passive Optical Networks
  - Λειτουργία TDM – PON
  - Framing
  - QoS and DBA



# Παθητικά Οπτικά Δίκτυα – Passive Optical Networks (PON)

- Πάνω από 700 εκατομμύρια Fiber to the x (FTTx) συνδρομητές παγκοσμίως (2022)
- ετήσια ζήτηση: 7.2 εκ. θύρες OLT και 140 εκ. ONU

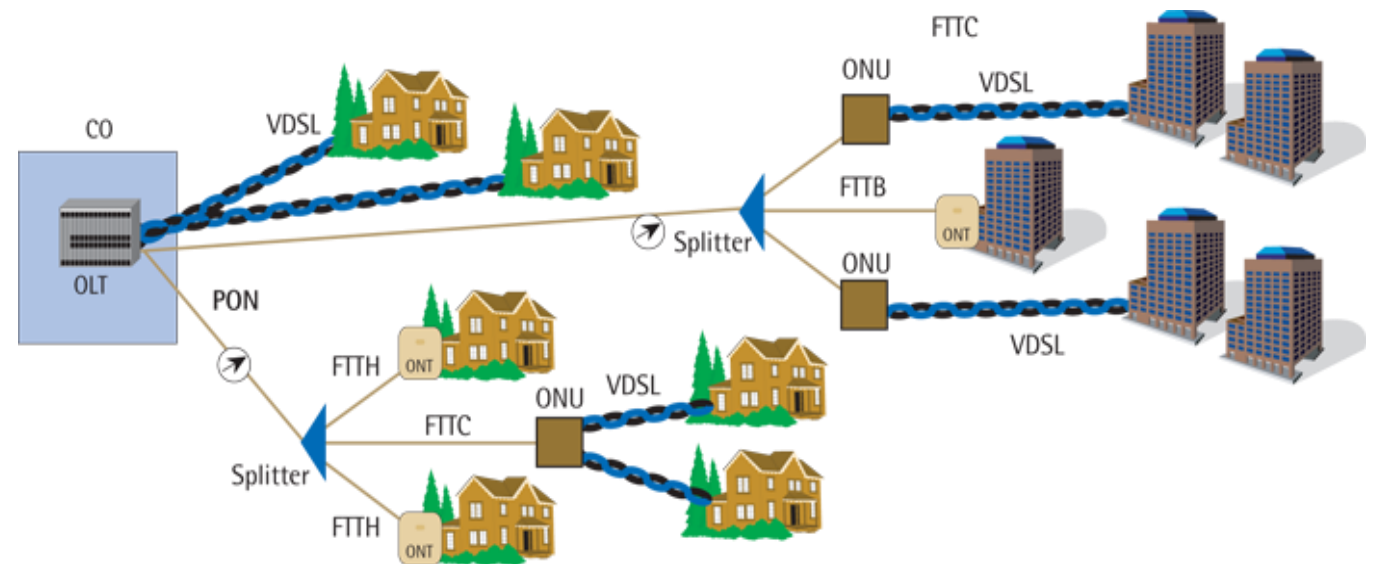
Global consumer broadband subscriptions by technology and percentage of fiber connections



Source: Omdia

FWA: Fixed Wireless Access

© 2021 Omdia

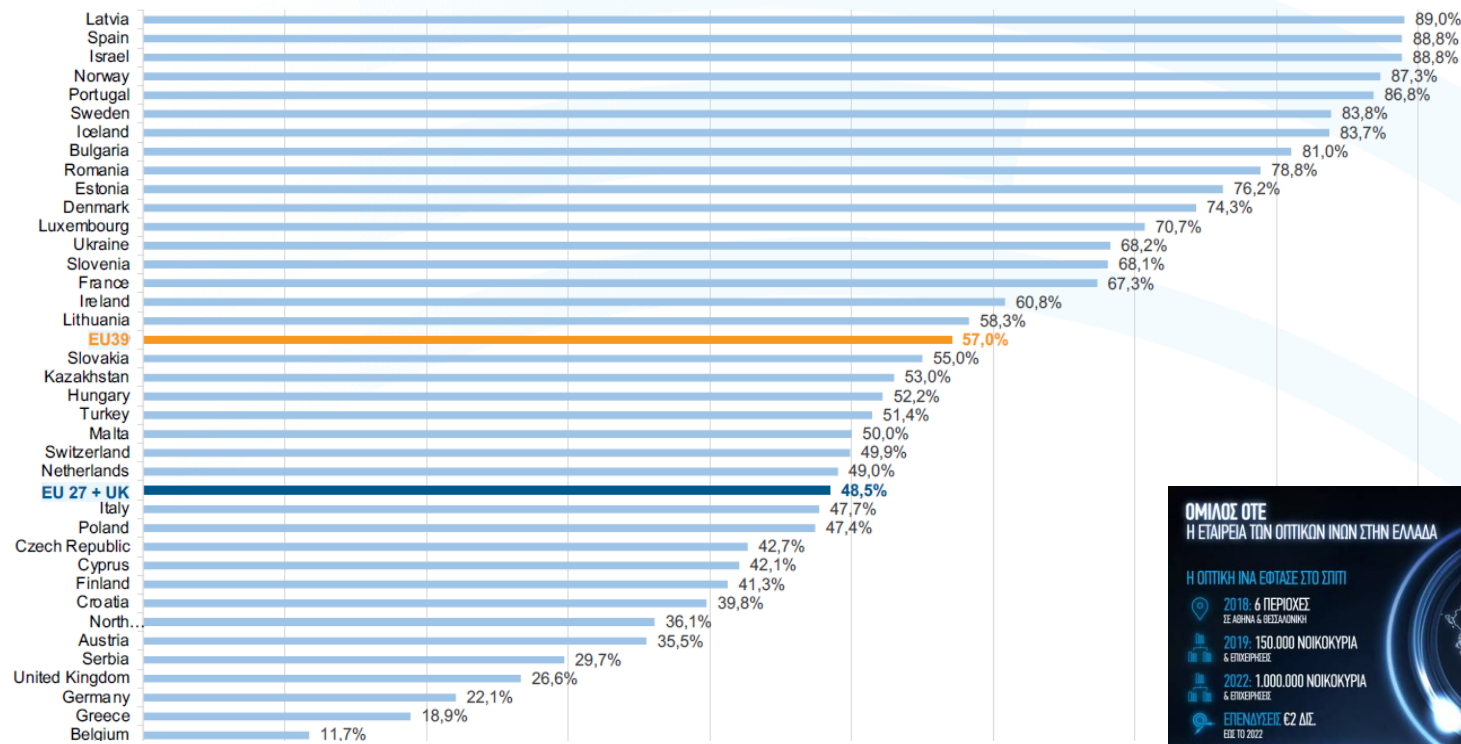


# ΡΟΝ – δίκτυα πρόσβασης

## European leaderboards - EU39

EU39 : 3 out of 5 countries now have more than 50% of total homes with fibre!

FTTH/B coverage\* as of September 2021 (\* Homes passed / Households)



- Παγκόσμια: UAE, Singapore, China, South Korea, Japan > 80%
- Στην Ελλάδα το FTTH/B δεν είναι πολύ διαδεδομένο
- VDSL συνδέσεις γίνονται με FTTC or P2P ίνα στο “καφάο”
- Μεγάλες επενδύσεις >2018 σε FTTH/B

<https://www.key4biz.it/wp-content/uploads/2022/05/Market-Panorama-2022.pdf>

**ΟΜΙΛΟΣ ΟΤΕ**  
Η ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

**Η ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ ΕΦΘΑΣΕ ΣΤΟ ΣΤΠΤ**

- 2018: 6 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΕ ΑΘΗΝΑ & ΒΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
- 2019: 150.000 ΝΟΙΚΟΚΥΡΙΑ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ
- 2022: 1.000.000 ΝΟΙΚΟΚΥΡΙΑ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ

**ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ €2 ΔΙΣ. ΕΩΣ ΤΟ 2022**

**COSMOTE**

**NOVA**

**ΧΤΙΖΟΥΜΕ ΔΙΚΤΥΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ 10 GIGABIT**  
Για μια Ελλάδα έτοιμη για το μέλλον

ΑΞΕΠΕΡΑΣΤΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ 100x ΓΡΗΓΟΡΟΤΕΡΕΣ ΣΕ:

- € 4,5 εκ. ιδίτες και επιχειρήσεις
- 70% των περιφερειών της χώρας

ΝΕΑ ΕΠΟΧΗ ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ:

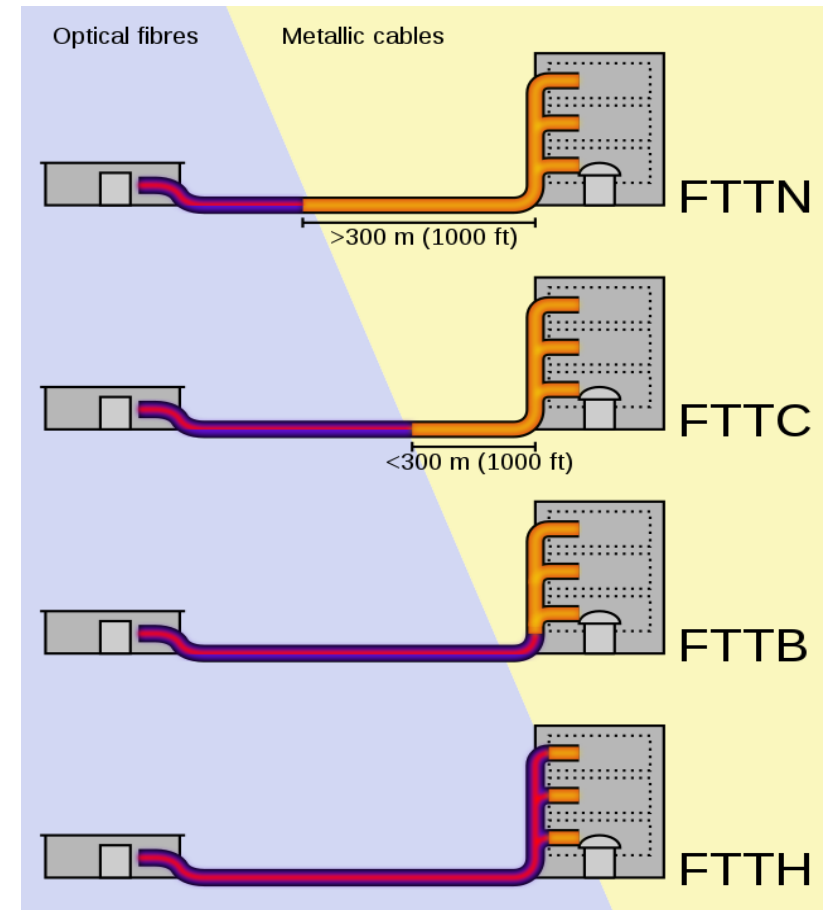
- € 2 δισ. επένδυση (2021-2022)
- ✓ Ιδιόκτητο δίκτυο οπτικών ινών
- 22.000 χλμ δίκτυου οπτικών ινών σε όλη την Ελλάδα

# FTTx

## Fiber to the x (FTTx)

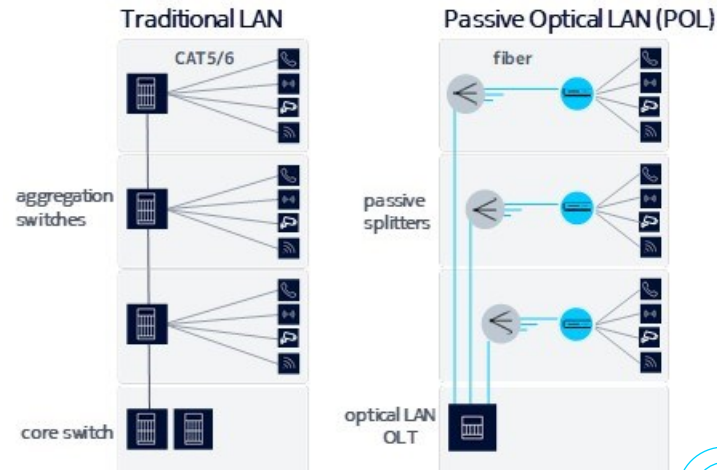
x = ανάλογα με τον τερματισμό της οπτική ίνα

- Ίνα στο ΚΑΦΑΟ (Fiber To The Cabinet)
- Ίνα στο κτίριο (Fiber to the building – FTTB)
- Ίνα στο σπίτι (Fiber To The Home – FTTH)
  
- FTTE (fiber-to-the-edge) , FTTP (fiber-to-the-premises), FTTM (fiber-to-the-machine), FTTA (fiber-to-the-antenna), FTTN (fiber-to-the-neighborhood) ...
  
- Έρευνα για FTTR - Fiber to the Room !



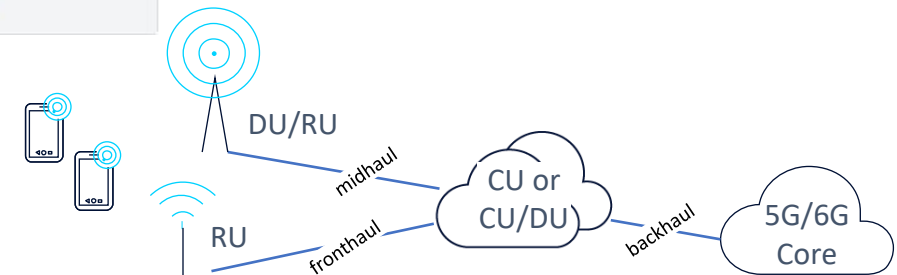
# PON – άλλες αγορές εκτός FTTH/B

Passive optical LAN (POL): εφαρμογή PON σε τοπικά δίκτυα (local are network – LAN) εκτός των δικτύων πρόσβασης



- Less active equipment
- Less power consumption
- Less floor space
- Easier maintenance
- Cost-efficient upgrades
- Carrier grade reliability
- Military grade security

- Κινητά δίκτυα
  - back-/ mid-/ fronthaul κίνηση για 5G/6G δίκτυα
- Βιομηχανία και κάθετες αγορές
  - Αυτοματισμός στη βιομηχανική παραγωγή, smart city, smart grid, ...
- Ενδοεπικοινωνία σε κέντρα δεδομένων (Intra-datacenter)
  - μικρά DC / edge cloud, συνδέσεις intra-pod / intra-rack



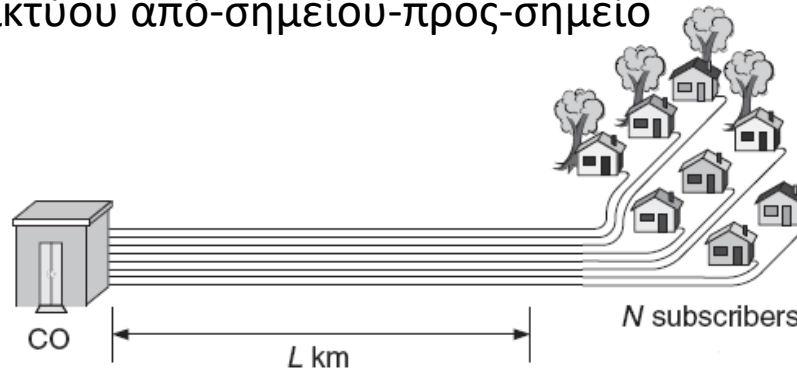
# Γιατί PON

## Αρχιτεκτονική δικτύου από-σημείου-προς-σημείο

### Point-to-point network

$N$  fibers

$2N$  transceivers

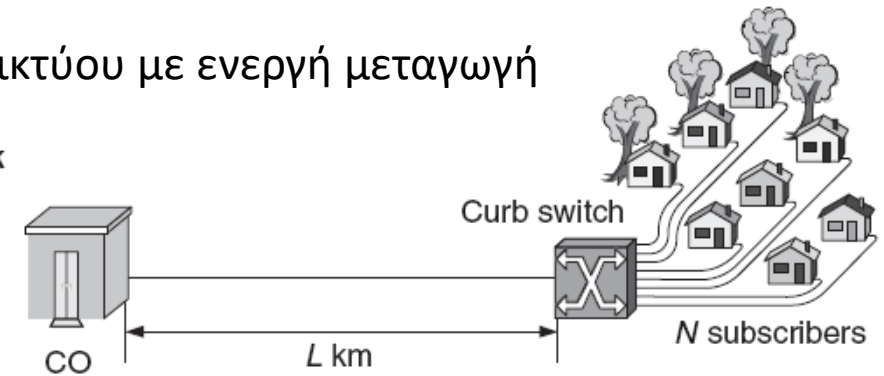


## Αρχιτεκτονική δικτύου με ενεργή μεταγωγή

### Curb-switched network

1 fiber

$2N + 2$  transceivers

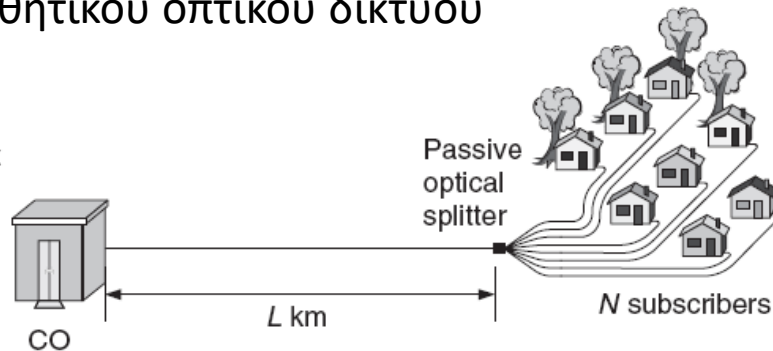


## Αρχιτεκτονική παθητικού οπτικού δικτύου

### Passive optical network

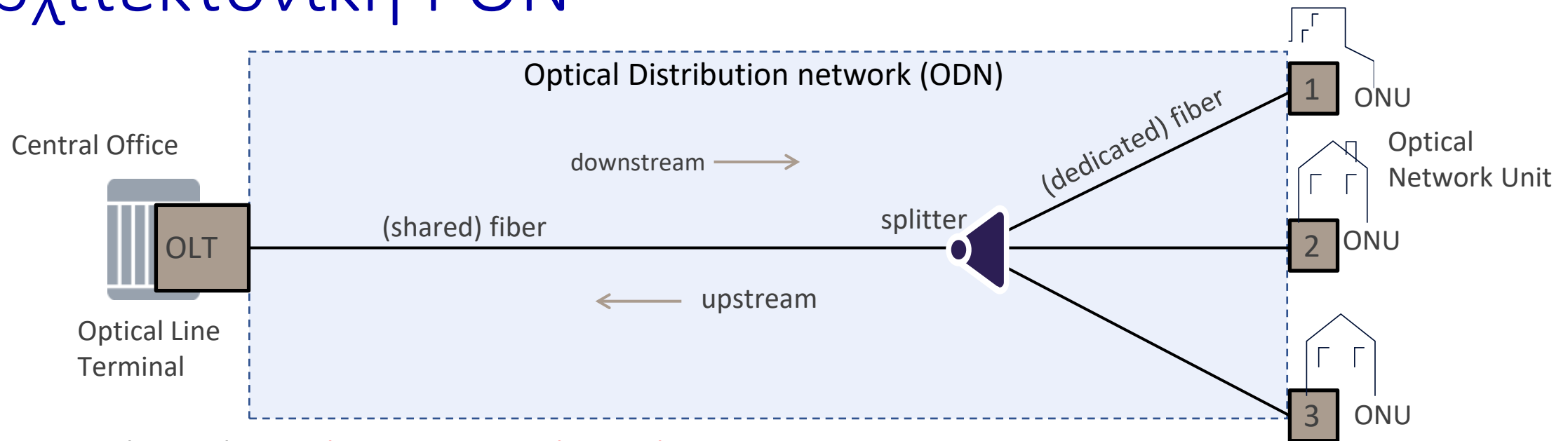
1 fiber

$N$  transceivers





# Αρχιτεκτονική PON

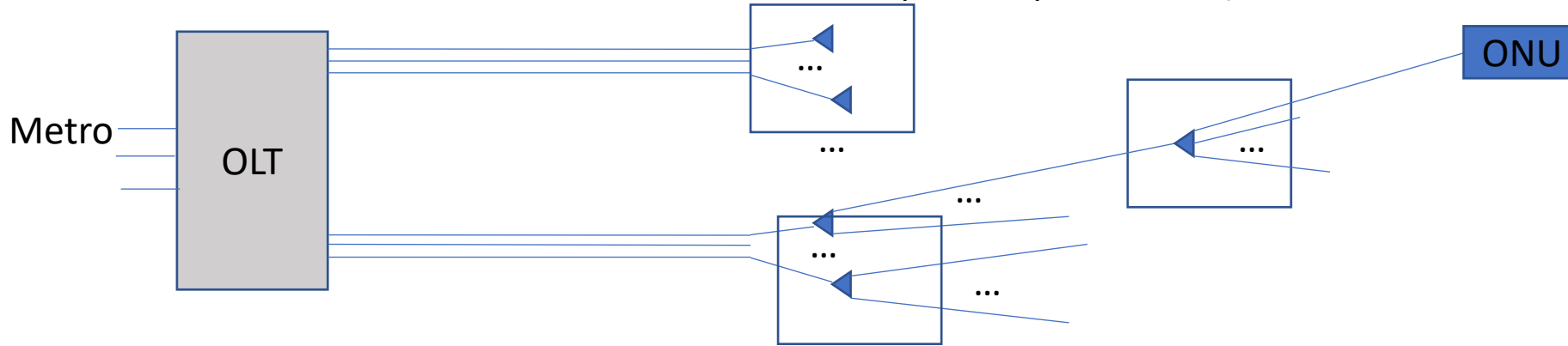


- Τοπολογία: από-σημείο-σε-πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint – PTMP)
  - **Σημείο**: το κεντρικό γραφείο (central office) Optical Line Terminal (OLT)
  - **Πολλαπλά σημεία**: Optical Network Unit (ONU) – έως 128 (συνήθως 32 ή 64)
  - OLT – ODN (Κοινή ίνα – παθητικός οπτικός διαχωριστής – μεμονωμένες ίνες) – ONUs
  - Το ODN μπορεί να είναι πιο σύνθετο π.χ 2 επίπεδα splitter και οπτικό patchpanel
- Χαμηλό κόστος
  - 1 πομποδέκτης στο OLT (burst mode - σχετικά ακριβός), φτηνοί πομποδέκτες στα ONUs (χρήστες)
  - Κοινή ίνα (συνήθως το μεγαλύτερο μήκος π.χ. 18 km σε σχέση με τις μεμονωμένες ίνες π.χ. 2 km)
  - Παθητικό

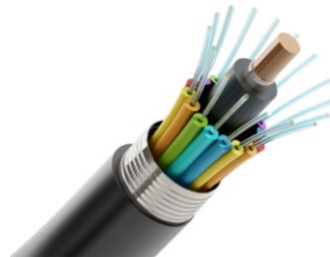


# PON εξοπλισμός

Μπορεί τα σημεία διαχωρισμού να είναι περισσότερα του ενός

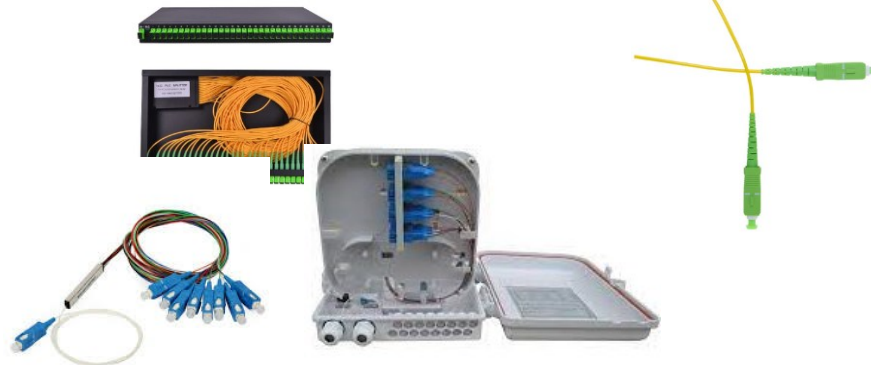


OLT chassis  
(multiple OLTs / PONs)



Καλώδιο με  
πολλαπλές ίνες  
(πολλαπλά PON)

splitters

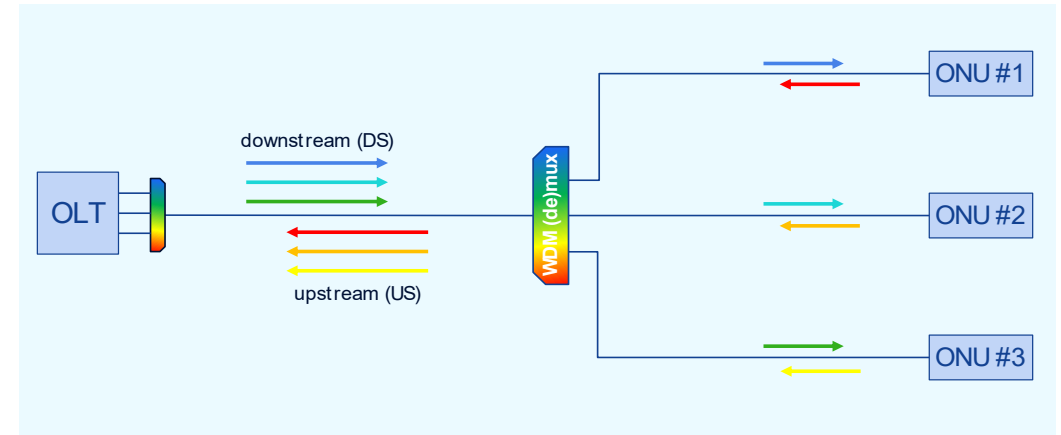
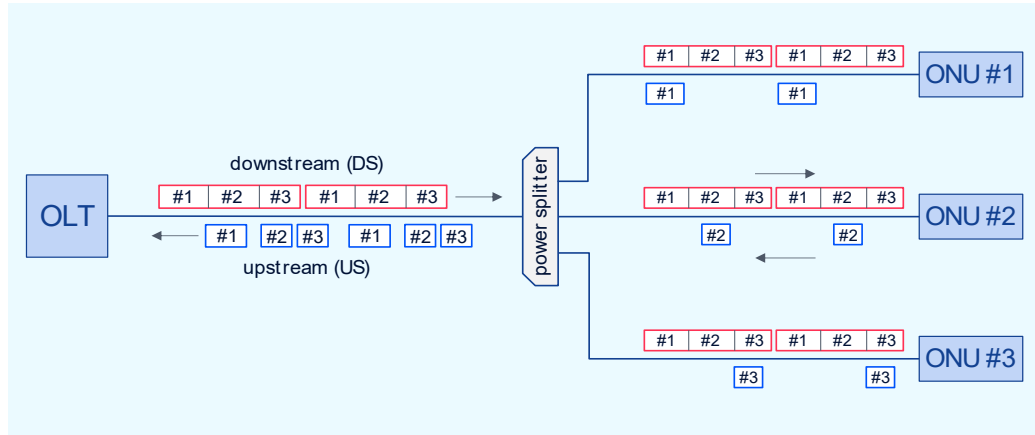


Συνήθως 2 επίπεδα splitters  
π.χ. i) 1x4 και ii) 1x4 (συνολικό 1x16)

ONUs



# PON – πολυπλεξία κίνησης



## TDM-PON

- η πιο διαδεδομένη και πιο οικονομική λύση
- κοινόχρηστο οπτικό κανάλι, τοπολογία σημείο προς πολλαπλά σημεία (PTMP)
- βέλτιστη για δυναμική κίνηση και στατιστική πολυπλεξία

### Περισσότερες παραλλαγές

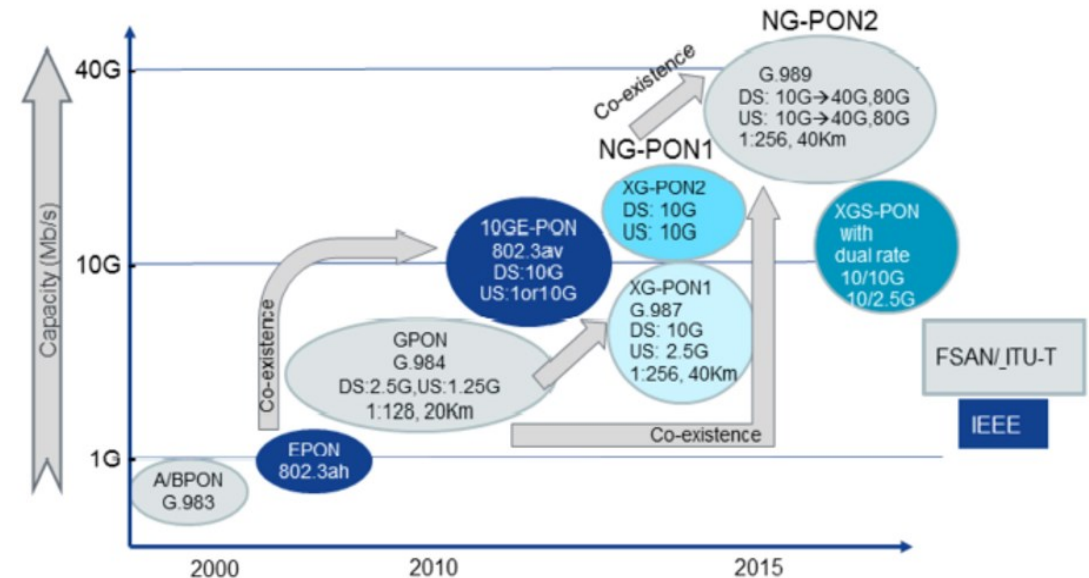
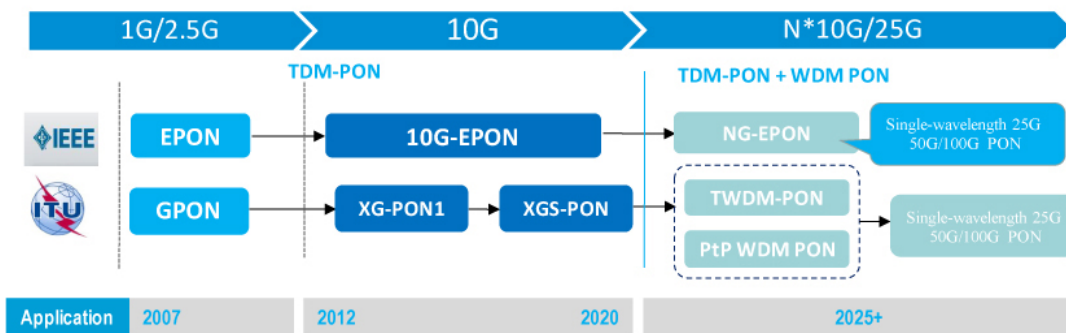
- TWDM-PON: πολλαπλά μήκη κύματος, το καθένα με TDM
- WDM overlay: από σημείο σε σημείο (PTP) μήκη κύματος ταυτόχρονα με TDM-PON (1 μήκος κύματος)

## WDM-PON

- όχι ευρέως διαδεδομένη, όχι (ακόμα) φθηνό...
- αποκλειστικά οπτικά κανάλια, από σημείο σε σημείο (PTP)
- βέλτιστη για υψηλό σταθερό ρυθμό ανά κόμβο

# Πρότυπα Παθητικών Οπτικών Δικτύων

- **2 κύριοι φορείς προτυποποίησης** της PON τεχνολογίας: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) και ITU (International Telecommunications Union)
- **IEEE Standards**
  - 802.3ah – EPON/GEPON (Ethernet PON/ Gigabit Ethernet PON)
  - 802.3av – 10G-EPON
- **ITU – T Standards**
  - G.984 – GPON (Gigabit PON)
  - G.987 – XG-PON / XGS-PON



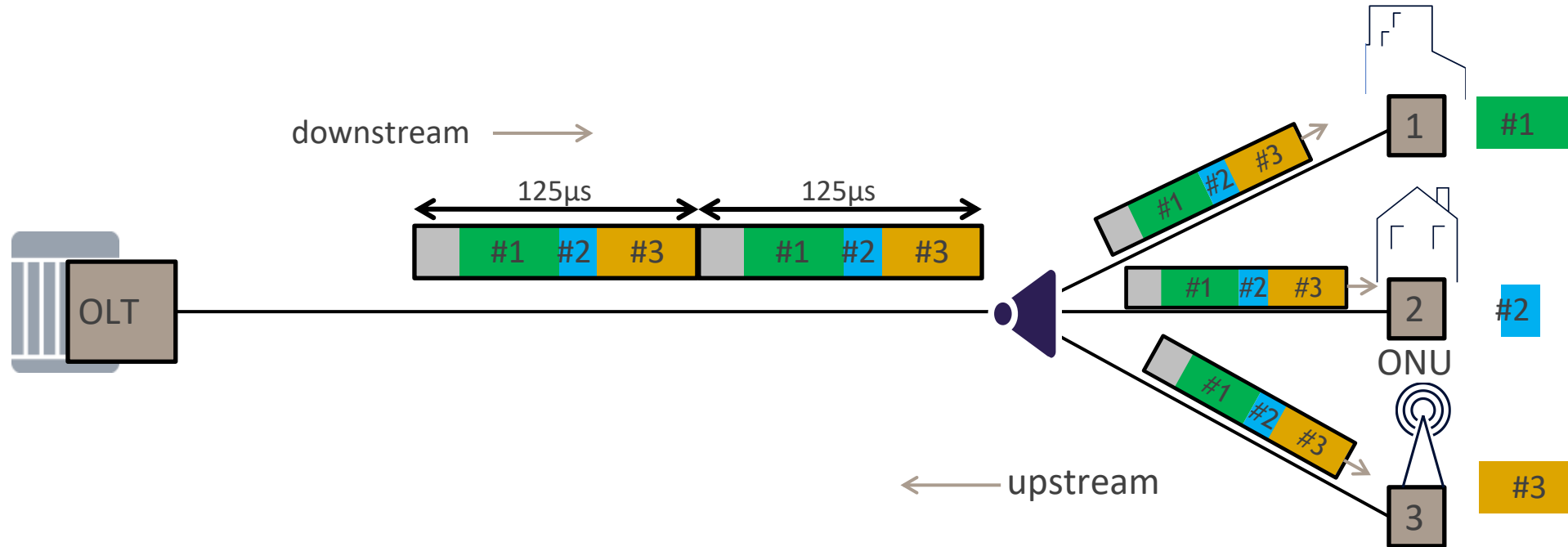
# GPON & EPON

- Διαφορετικά μήκη κύματος, splitting ratio, αποστάσεις, διαφορετικοί ρυθμοί
- Διαφορετικά πρωτόκολλα, ενθυλάκωση, παροχή QoS, διαδικασία χρονοπρογραμματισμού
- Και οι δύο χρησιμοποιούν το TDM και τον χρονοπρογραμματισμό και κάνουν ίδια πράγματα αλλά με διαφορετικούς τρόπους

**Εστιάζουμε στο ITU-T (GPON, XGPON) και περιγράφουμε μερικές διαφορές τους**

Specifications	GPON	EPON
Downlink Rate	1244/2488 Mbit/s	1250
Uplink Rate	155/622/1244/2488 Mbit/s	1250
Line Coding	NRZ	8B/10B
Ethernet Transmission Efficiency	93% uplink, 94% downlink	61% uplink, 73% downlink
Splitter Ratio	64-128	32-64
Transmission Distance	60km	20
TDM Capability	TDM over ATM/Packet	TDM over Ethernet
Video Capability	Support cable TV and IPTV	Not support cable TV
Security	Support Advanced Encryption Standard(AES)	Undefined
OAM	Provide ONT management control standard	Ethernet(SNMP available)

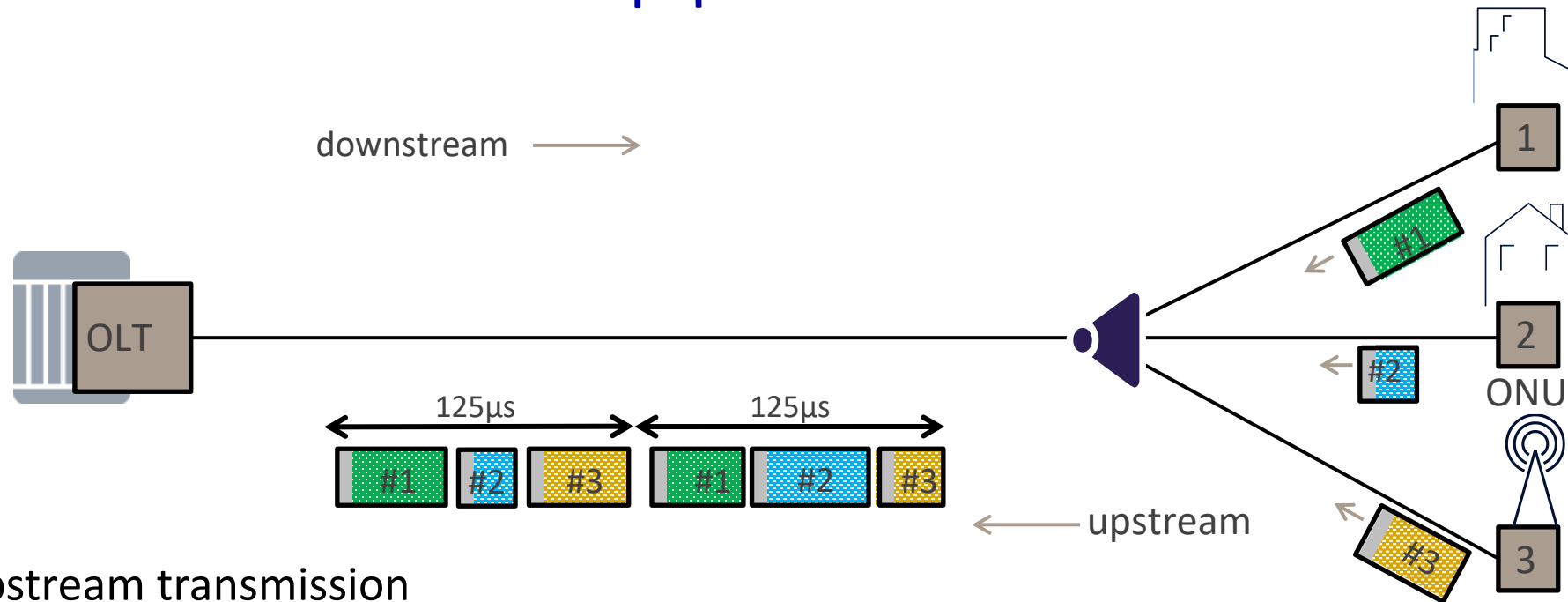
# TDM PON λειτουργία



## Downstream transmission (OLT -> ONUs)

- Συνεχής μετάδοση (Continuous Mode)
- Μετάδοση προς όλα τα ONUs: PON πλαίσια (frames) των 125 μs
  - 125 μs frame period (= SONET !) στα ITU PON (GPON, XGPON,...)
  - Στα IEEE E-PON δεν υπάρχουν πλαίσια, αλλά 'συνεχόμενες' μεταδώσεις bursts από το OLT
- Τα ONUs λαμβάνουν όλα τα δεδομένα αλλά επεξεργάζονται μόνο όσα απευθύνονται σε αυτά
- Το OLT δίνει οδηγίες για το upstream transmission (χρόνο μετάδοσης) σε κάθε ONU στην επικεφαλίδα του downstream PON πλαισίου (BWMp)

# TDM PON λειτουργία

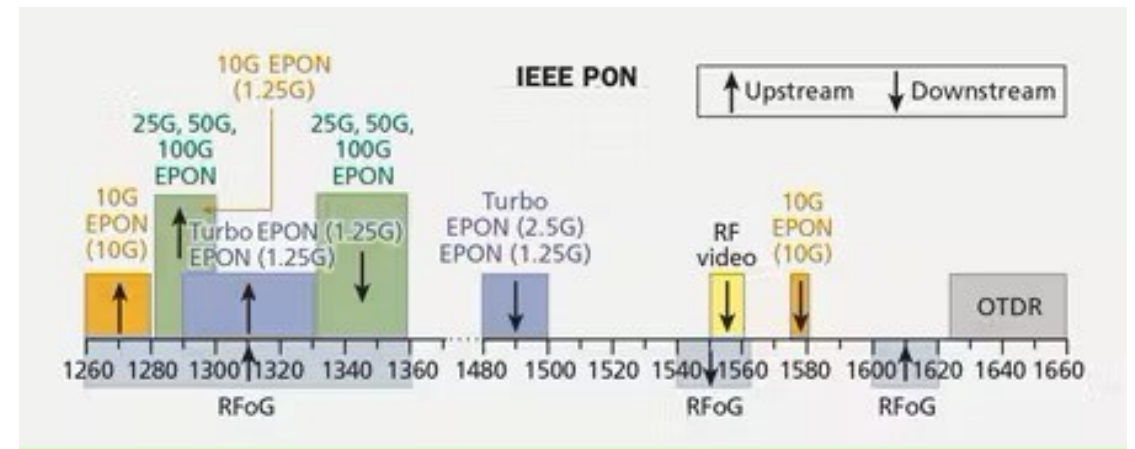
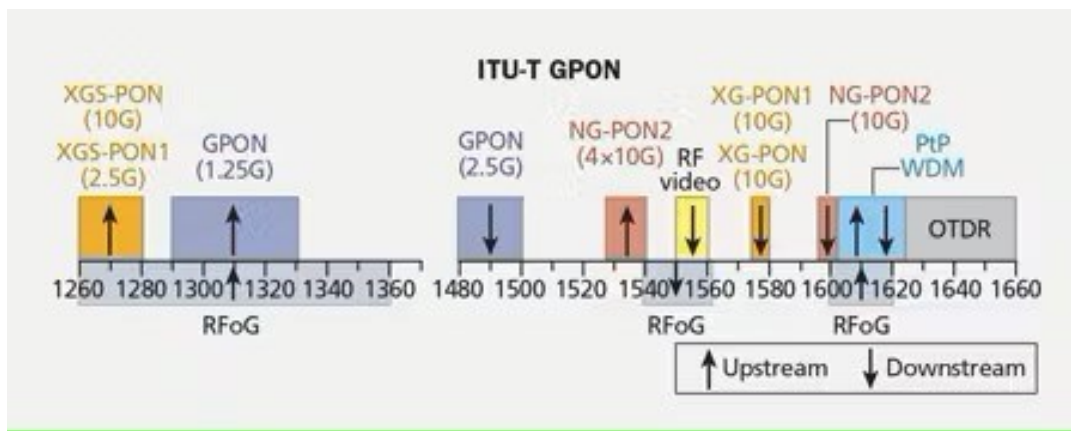


## Upstream transmission

- Σε καταιγισμούς (bursts) –guard-time μεταξύ καταιγισμών – πέρα από δεδομένα το ONU βάζει και πληροφορίες για το μέγεθος του buffer του
- Αποφυγή συγκρούσεων: συγχρονισμός και χρονοπρογραμματισμός (MAC)
  - Συγχρονισμένα ONUs (με βάση τη λήψη του downstream πλαισίου και την απόστασή τους από το OLT)
  - Χρονοπρογραμματισμός: ανάθεση καταιγισμών από το OLT
    - Αλγόριθμος ανάθεσης Dynamic Bandwidth Allocation (DBA)
      - Στατική ανάθεση (τμήματος) της χωρητικότητας και δυναμική ανάθεση του υπολοίπου
  - Ενημέρωση για την ανάθεση (από το OLT στα ONUs) στα downstream πλαίσια (BWMap)

# Φάσμα

- Οι διαφορετικές γενιές PON χρησιμοποιούν διαφορετικά τμήματα του φάσματος
  - Για συνύπαρξη, π.χ. σε ένα Optical Distribution Network (ODN) παραπάνω από 1 γενιά/τεχνολογία PON
- ίδια ίνα για upstream και για downstream
  - Σε αντίθεση με core & metro που συνήθως έχουμε 1 ίνα ανά κατεύθυνση





# Physical layer

## ■ GPON

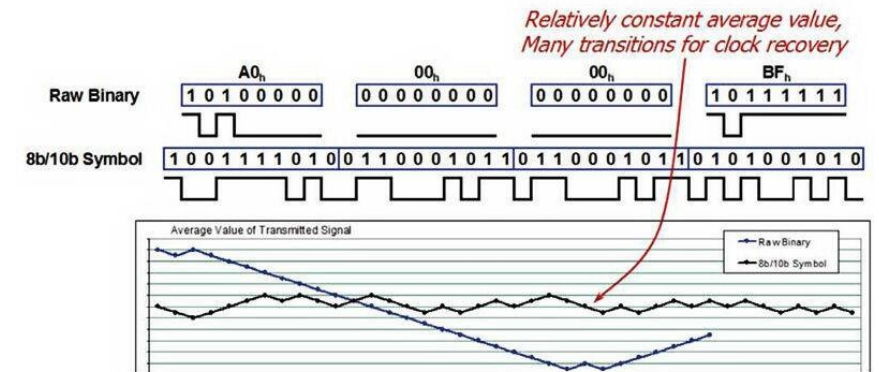
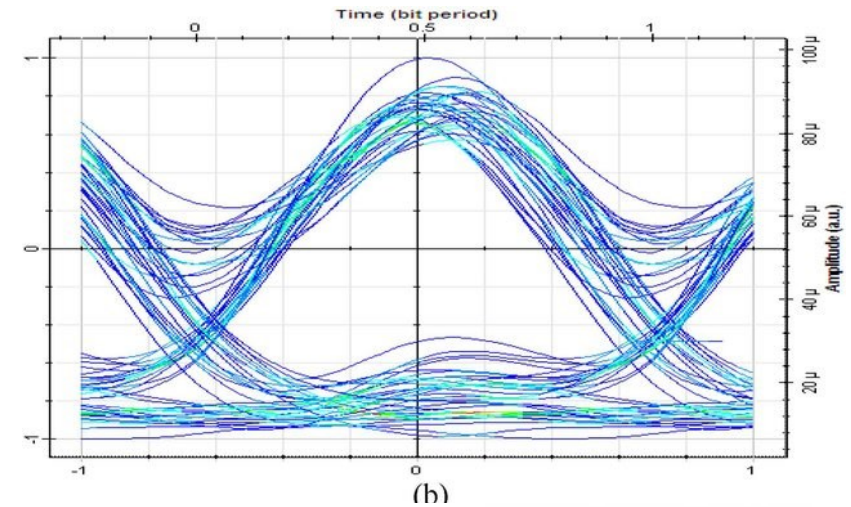
- NRZ code (high is 1 and low is 0) + scrambling (in the payload)

## ■ EPON

- 802.3z (1000BASE-X) 8B/10B code (8 data bits → 10)
- Special function codes (e.g. idle, start of packet, end)
- 1000 Mbps is expanded to 1250 Mbps
- 10GbE uses 64B/66B

## ■ FEC

- Every 239 data bytes, 16 parity (255 Byte FEC block)
  - Up to 8 byte errors can be corrected
  - Improves the power budget by >3 dB
- Use of FEC is negotiated between OLT and ONU

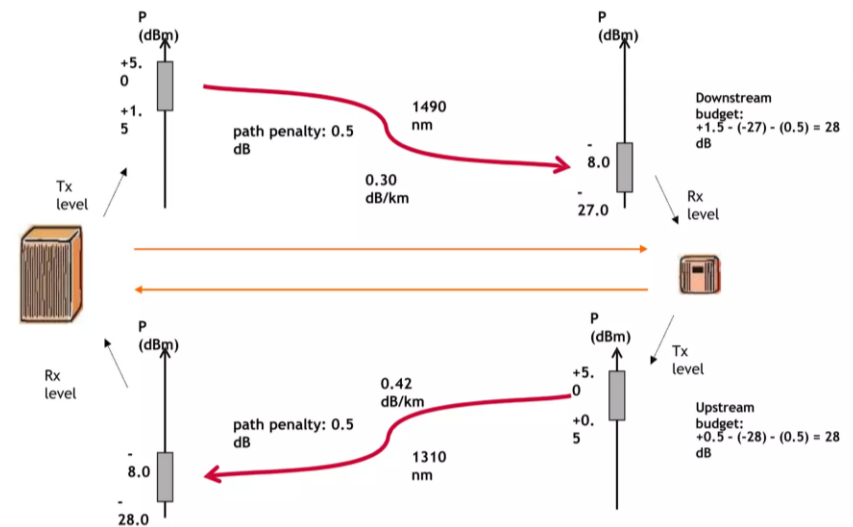


# Απώλειες και απόσταση

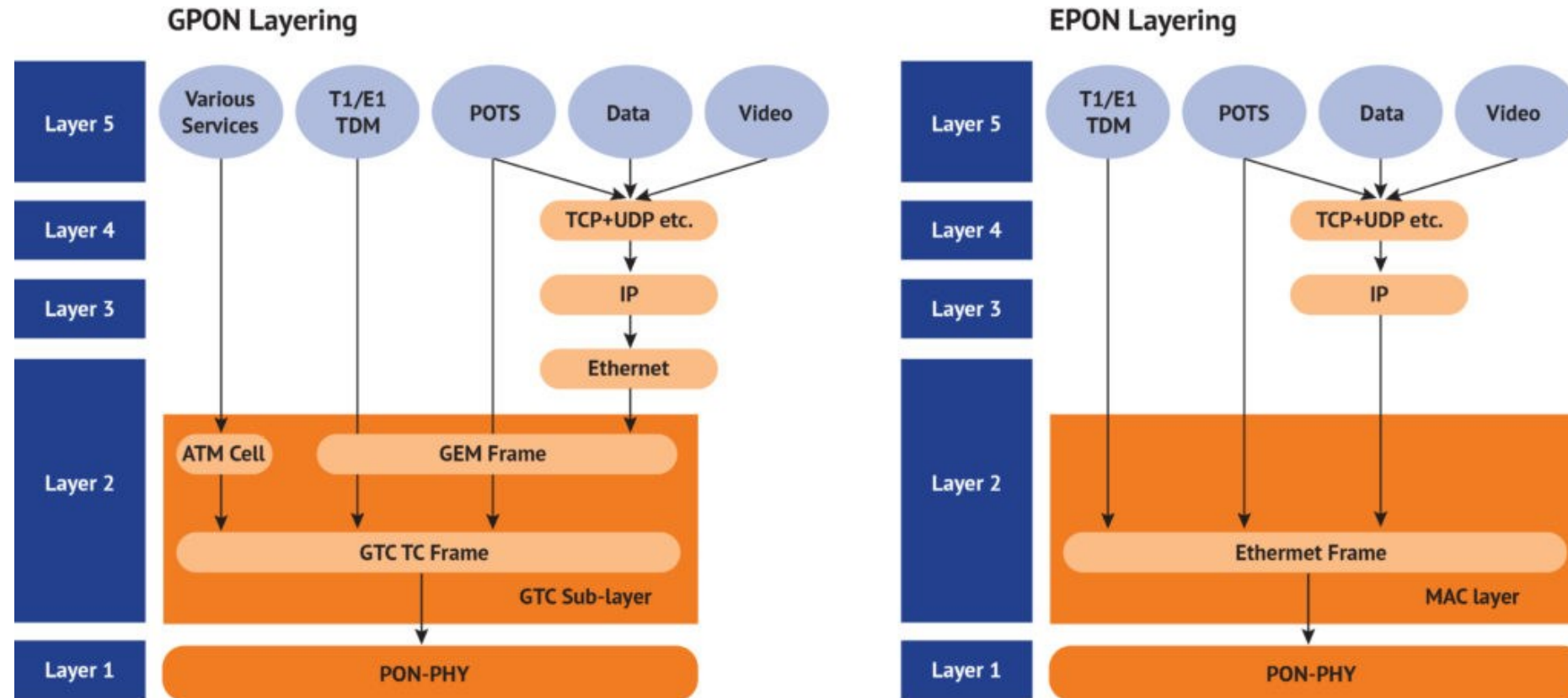
- Τυπικός σχεδιασμός για απώλειες 28 dB
- Κλάσεις δικτύων και κλάσεις πομποδεκτών (π.χ. Class B+: OLT launch power: +1.5 / + 5 dBm, ONU sensitivity: -27 / -8 dBm)
- Πίνακες για απόσταση, split, τύπο πομποδεκτών

Optical Component	dB	Quantity	Result (dB)
<b>Splitters:</b>			
Splitter 1 x 64	20.1		0
Splitter 1 x 32	17.4	1	17.4
Splitter 1 x 16	13.8		0
Splitter 1 x 8	10.5		0
<b>Splices:</b>			
Access splices	0.1	2	0.2
Mating splices	0.1	5	0.5
Maintenance splices	0.1	2	0.2
<b>Fiber:</b>			
1285 – 1330 nm in dB/km	0.4	20	8
1480 – 1575 nm in dB/km	0.3	0	0
Aging margin	0.7	1	0.7
<b>Other Losses:</b>			
Measurement Error	0.4	1	0.4
Connectors	0.35	2	0.7
WDM (for RF video only)	1.3	0	0
			<b>28.1</b>

## GPON LINK BUDGET (CLASS B+)EXAMPLE



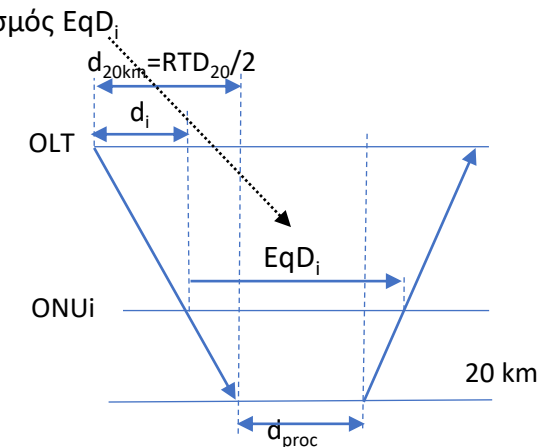
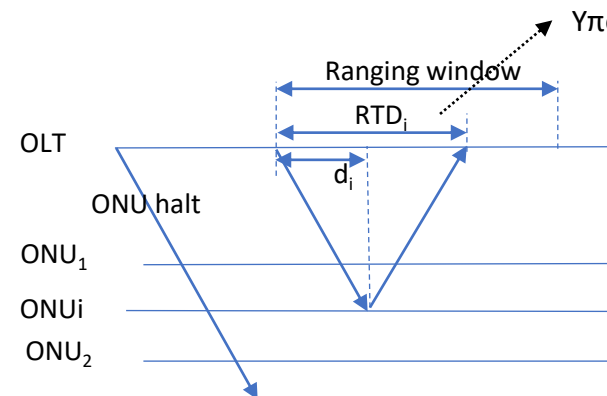
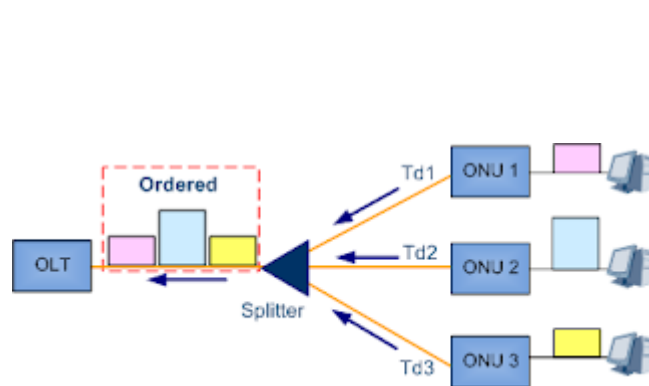
# Ενθυλάκωση - Encapsulation



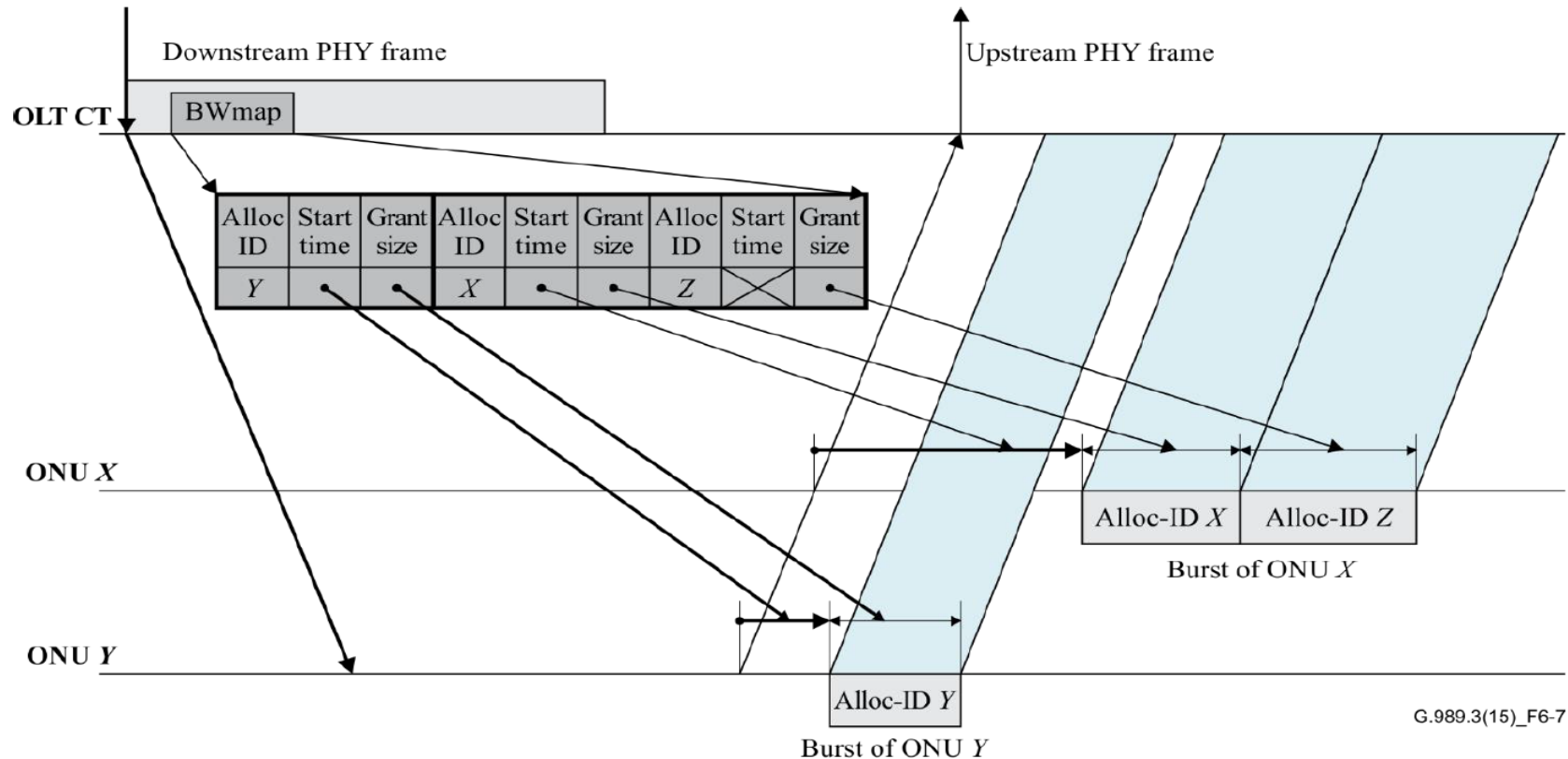
- EPON: Ethernet frames are carried natively on the PON with no changes. There is no extra adaption and encapsulation
- GPON: Ethernet frames are encapsulated into GTC (GPON Transmission Convergence) Encapsulation Method (GEM) frames. GEM frames are, in turn, encapsulated into a SONET/SDH-like GTC frame (in both upstream and downstream directions) that is transported synchronously every 125  $\mu$ sec over the PON

# TDM PON: Συγχρονισμός ONU - Ranging

- Δεδομένου ότι οι ONU βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το OLT, τα upstream δεδομένα (burst) πρέπει να σταλούν στις σωστές χρονικές στιγμές, έτσι ώστε να μην γίνουν συγκρούσεις στην κοινή ίνα
- Ο μηχανισμός **Ranging** συγχρονίζει τις ONUs ώστε το upstream frame να ξεκινάει ταυτόχρονα σε όλες τις ONUs
  - Ανά τακτά χρονικά διαστήματα το OLT στέλνει μήνυμα halt και ξεκινάει ένα ranging/ quiet window
  - στη διάρκεια του ranging/ quiet window το OLT στέλνει σε ένα συγκεκριμένο ONU (i) μήνυμα αίτησης μέτρησης καθυστέρησης Round-Trip-Delay
  - Με την απάντηση το OLT μετράει το Round-Trip-Delay ( $RTD_i = 2d_i$ ) και υπολογίζει καθυστέρηση εξισορρόπησης  $EqD_i$   
$$EqD_i = RTD_{20km} - RTD_i + d_{proc}$$
, όπου  $d_{proc}$  σταθερά (μέγιστος χρόνος επεξεργασίας DS frame, π.χ. 20 msec)
  - Αρχή upstream frame στο ONU(i) = άφιξη downstream frame(i) +  $EqD_i$
- Με αυτόν τον τρόπο (πρόσθεση καθυστέρησης εξισορρόπησης) όλα τα ONUs βρίσκονται στην ίδια 'εικονική' απόσταση (20 km) από το OLT και το upstream frame ξεκινάει ταυτόχρονα



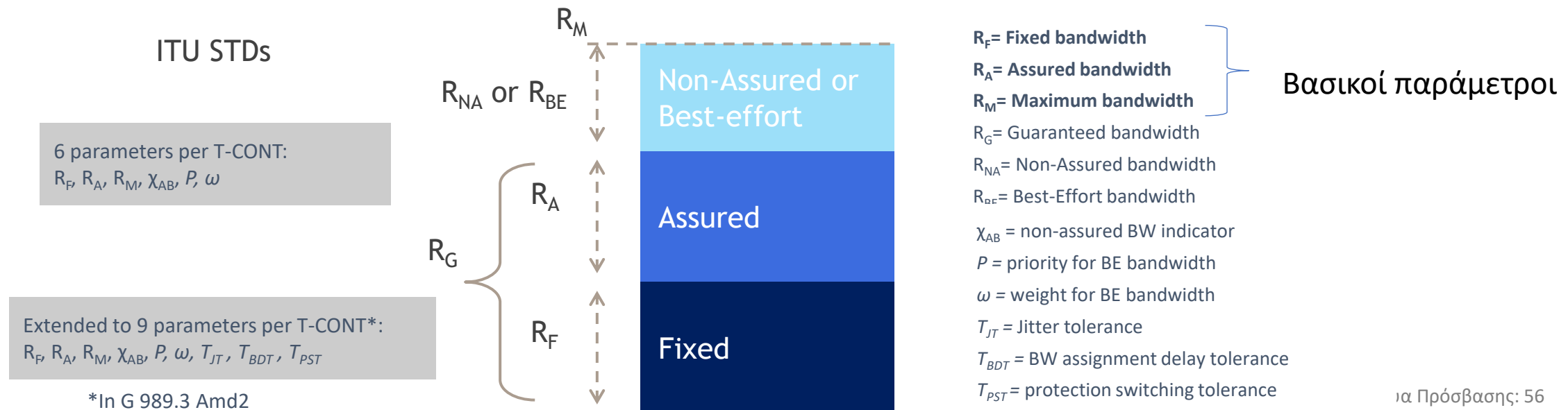
# TDM PON – BWMap



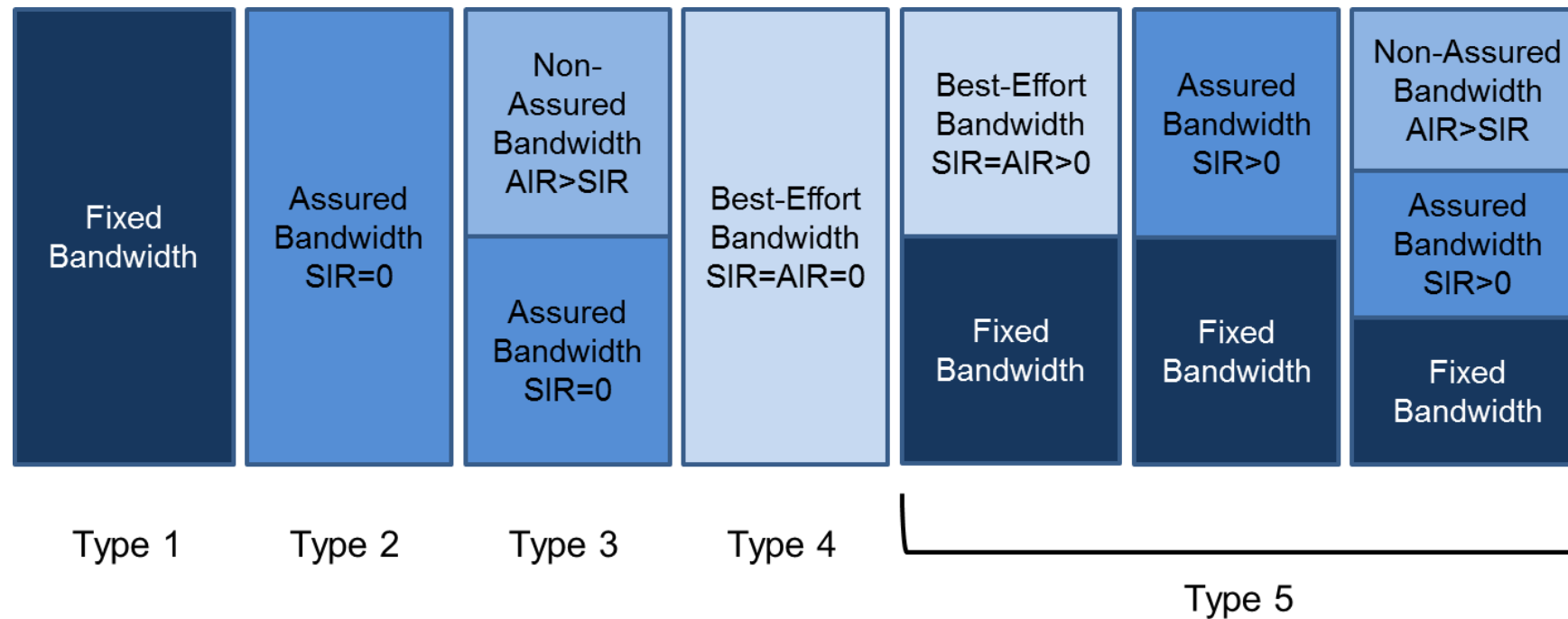
Το OLT δίνει οδηγίες για το upstream transmission (χρόνο μετάδοσης) σε κάθε ONU στην επικεφαλίδα του προηγούμενου downstream PON πλαισίου

# Ποιότητα υπηρεσιών - T-CONT traffic descriptors

- Ένα ONU μπορεί να έχει ένα ή περισσότερα T-CONT
- Transmission CONTainer (T-CONT): η οντότητα στο GPON στην οποία ανατίθεται upstream χωρητικότητα (πολλά GEM ports μπορούν να ανήκουν σε ένα T-CONT, αλλά η ανάθεση γίνεται σε T-CONT)
- Ένα T-CONT καταχωρείται στο OLT με ένα σύνολο παραμέτρων περιγραφής κίνησης (traffic descriptors)
- Το OLT κάνει ορισμένους ελέγχους κατά την εγγραφή: το εγγυημένο BW ( $R_F + R_A$ ) για όλα τα T-CONT θα πρέπει να επαρκεί ( $< \text{PON rate}$ ), εφικτοί περιορισμοί καθυστέρησης ( $T_{BDT}$ ) κ.λπ.
- Το OLT χρησιμοποιεί αυτές τις παραμέτρους περιγραφής κυκλοφορίας στη διαδικασία DBA



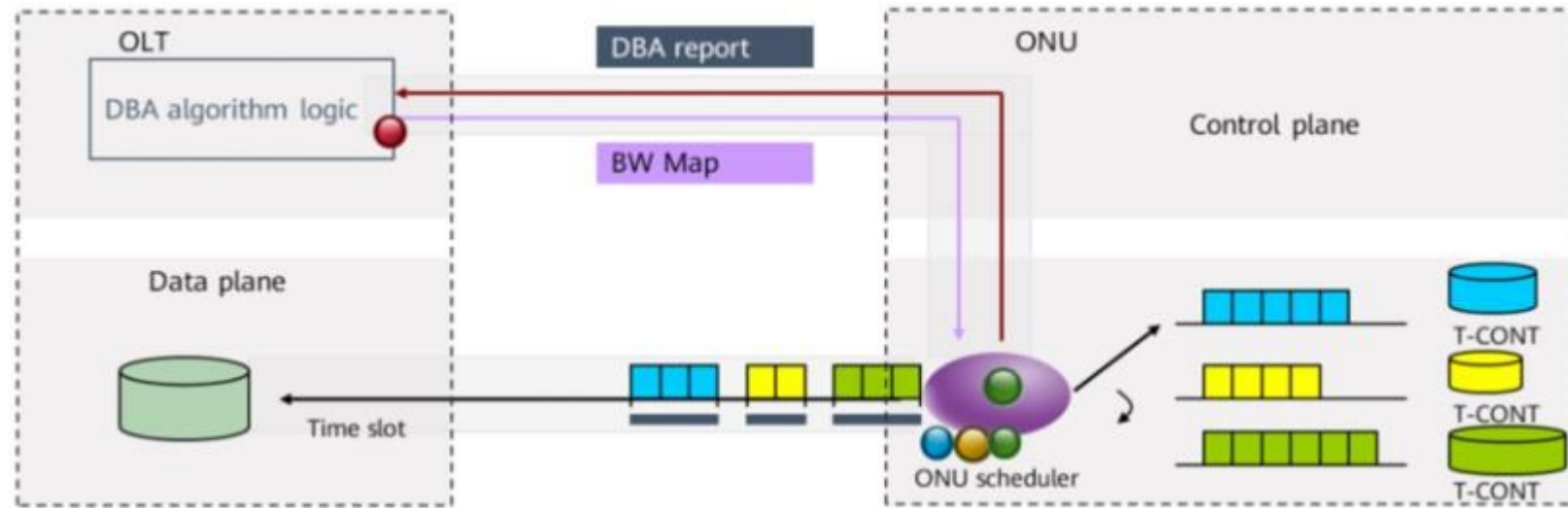
# T-CONT Types (Upstream QoS)



- Ανάλογα με τις (βασικές) παραμέτρους ( $R_F$  Fixed bandwidth,  $R_A$  Assured bandwidth,  $R_M$  = Maximum bandwidth = non assured/best effort ) ένα T-CONT χαρακτηρίζεται σε έναν τύπο QoS
- QoS type 1 > 2 > 3 > 4, Type 5 είναι μίξη κάτι από όλα
- Σχετίζεται με το πως αναθέτει χωρητικότητα το DBA process: πρώτα Fixed, μετά assured, μετά BE

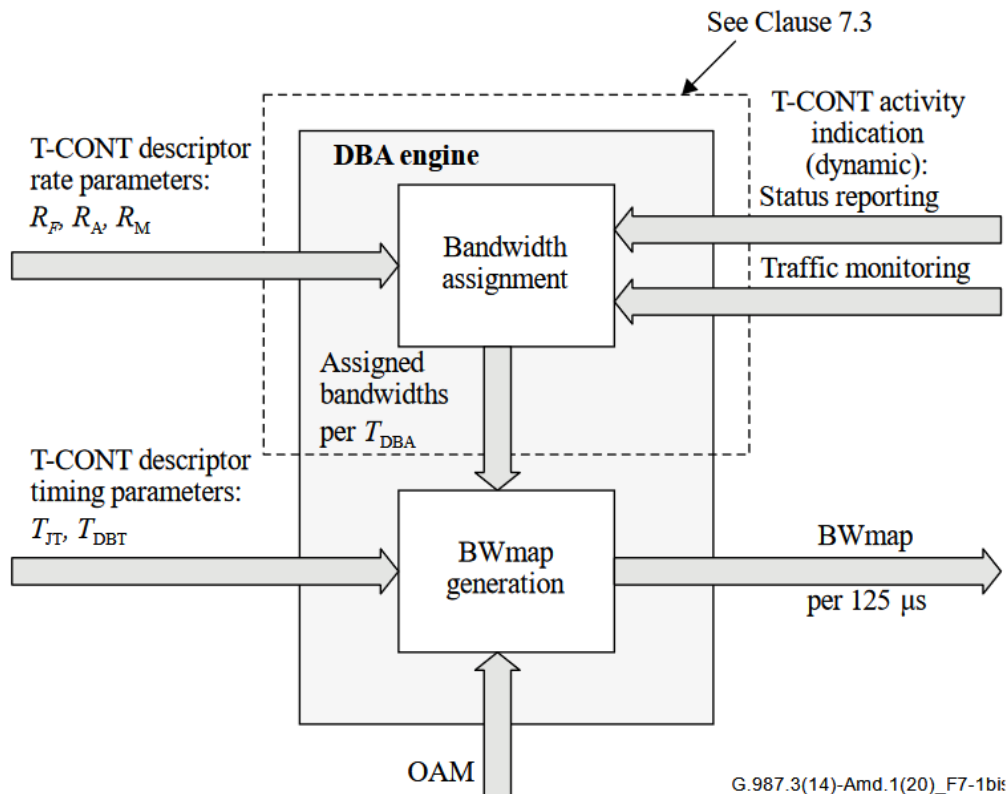


# DBA logical representation



- Το DBA process του OLT συλλέγει αναφορές μεγέθους των buffers (DB Report upstream - DBRu) και βλέπει πως χρησιμοποίησαν τις προηγούμενες αναθέσεις τα T-CONTs, εκτελεί υπολογισμούς, αναθέτει χρονοθυρίδες και στέλνει τις αναθέσεις στα T-CONTs με τη μορφή ενός 'χάρτη' (BWMap)
  - Το BWMap υπάρχει σε κάθε downstream frame (125  $\mu$ s) και περιέχει τις αναθέσεις για το επόμενο upstream frame
  - Μπορεί να μην εξυπηρετηθούν όλα τα T-CONT στο επόμενο upstream frame, δυνατή η ανάθεση διαφορετικού χρόνου σε κάθε T-CONT
- Το ONU/T-CONT στέλνει δεδομένα σε καταιγισμούς (bursts) στις χρονοθυρίδες που του έχουν ανατεθεί σύμφωνα με τις πληροφορίες του BWMap και πληροφορίες για το μέγεθος των buffer

# Dynamic Bandwidth Allocation process



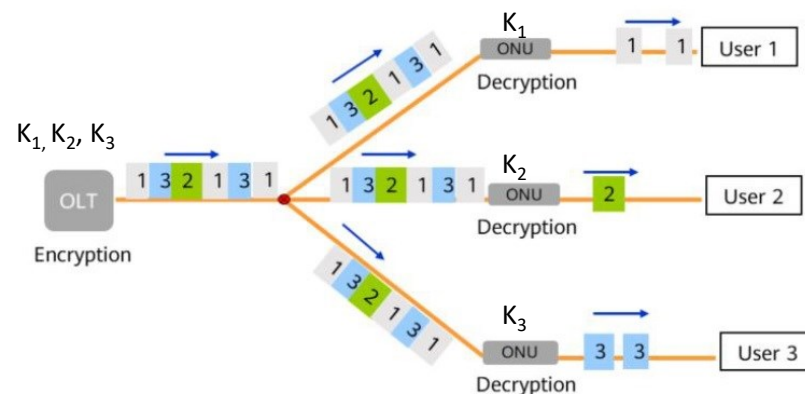
- DBA τρέχει σε κύκλους π.χ. 8 msec στο OLT
- Είσοδοι
  - T-CONT traffic descriptors (fixed  $R_F$ , assured  $R_A$ , best effort BW), στατικοί παράμετροι
  - Εκτίμηση της κίνησης για κάθε T-CONT
    - traffic monitoring (TM): η κίνηση που έστειλε το T-CONT στον προηγούμενο κύκλο
    - status reporting (SR): ενημέρωση από το ONU του μεγέθους του T-CONT buffer (DBRu reports)
- DBA αναθέτει χωρητικότητα (bit/sec) στα T-CONT
  - Αναθέτει πρώτα το εγγυημένο BW ( $R_F, R_A$ )
  - Μετά το υπόλοιπο BW «δίκαια» (fair) σύμφωνα με την εκτίμηση κίνησης και τους T-CONT traffic descriptors
- Οι ανατεθειμένες χωρητικότητες δίνονται στο BWmapper, που τις χρησιμοποιεί μαζί με παραμέτρους χρονισμού T-CONT traffic descriptors ( $T_{JT}, T_{DBT}$ ), για να δημιουργήσει το BWmap ενός upstream frame (κάθε 125  $\mu$ s)

# Physical Layer Operation Administration and Maintenance (PLOAM)

- Το Physical Layer Operation Administration and Maintenance (PLOAM) είναι πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στα PON για τη διαχείριση και τη συντήρηση του φυσικού επιπέδου
- Το PLOAM εκτελεί διάφορες λειτουργίες
  - Ανακάλυψη
    - Όταν ένα ONU (επανα)συνδέεται στο PON, στέλνει ένα μήνυμα εντοπισμού στο OLT για να ταυτοποιηθεί (μετά ακολουθεί η διαδικασία ranging)
  - Ranging
    - Διαδικασία μέτρησης της απόστασης / καθυστέρησης εξισορρόπησης ενός ONU
  - Ενεργοποίηση
    - Ενός νέου ONU από το OLT. Το OLT στέλνει PLOAM μήνυμα ενεργοποίησης στο ONU, το οποίο περιλαμβάνει διάφορες παραμέτρους διαμόρφωσης
  - Εντοπισμός σφαλμάτων, παρακολούθηση της απόδοσης
    - Το ONU στέλνει περιοδικά PLOAM μηνύματα κατάστασης στο OLT, που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της απόδοσης και εντοπισμό βλαβών. Εάν εντοπιστεί βλάβη, το OLT στέλνει PLOAM μήνυμα στο ONU και απομονώνει το σφάλμα, αποτρέποντας από το να επηρεάσει όλο το δίκτυο

# TDM-PON: Encryption

- Δεδομένου ότι downstream όλα τα δεδομένα φτάνουν σε όλα τα ONU/ONT, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί κρυπτογράφηση για ιδιωτικότητα
- Η κρυπτογράφηση ξεκινά από το OLT που στέλνει συγκεκριμένο μήνυμα PLOAM (Physical Layer Operation Administration and Maintenance) στο ONU
- Το ONU δημιουργεί το κλειδί και το στέλνει πίσω στο OLT
- Εφόσον το κλειδί αποστέλλεται upstream, δεν είναι ορατό από τα άλλα ONUs
- Μετά τα δεδομένα κρυπτογραφούνται από το OLT (μόνο το payload) χρησιμοποιώντας το κλειδί και AES (Advanced Encryption Standard) - AES128 (GPON)
- Μόνο το ONU που έχει δημιουργήσει το κλειδί μπορεί να τα αποκρυπτογραφήσει
- Για να γίνει το σύστημα πιο ασφαλές, τα κλειδιά αλλάζουν συχνά



backup

# WiMax

- **Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)** is a family of wireless broadband communication standards based on the IEEE 802.16 set of standards, which provide physical layer (PHY) and media access control (MAC) options
- last mile wireless broadband access as an alternative to cable and DSL
- initially designed to provide 30 to 40 megabit-per-second data rates, with the 2011 update providing up to 1 Gbit/s for fixed stations
- Newer versions, still backward compatible, include WiMAX release 2.2 (2014) and WiMAX release 3 (2021, adds interoperation with 5G NR)
- A physical layer operating in the 10 to 66 GHz range. 802.16a, updated in 2004 to 802.16-2004
- Fixed (non moving) and mobile WiMax
- Although WiMax was much earlier to market than LTE, LTE was an upgrade and extension of previous 3G (GSM and CDMA) standards, whereas WiMax was a relatively new and different technology. Ultimately, LTE won the war to become the 4G standard because mobile operators chose to extend their investments in know-how, equipment and spectrum from 3G to LTE, rather than adopt a new technology standard.

Σήμερα, περισσότερα από 1.300.000 σπίτια κι επιχειρήσεις σε όλη την χώρα, μπορούν να απολαμβάνουν τις νέες ασύλληπτες ταχύτητες, ενώ μέχρι το τέλος του 2027, πρόσβαση σε αυτές θα έχουν 3.000.000 σπίτια κι επιχειρήσεις, καλύπτοντας τα 2/3 της Ελλάδας.

**Γιατί ένας κόσμος πιο γρήγορος για όλους, είναι ένας κόσμος καλύτερος για όλους.**

**Δυνατότητα για 100% εγγυημένη ταχύτητα Internet, μέσω της υποδομής Fiber To The Home σε:**



Feedback



**3.100.000**

ιδιώτες & επιχειρήσεις  
έως σήμερα



**7.650.000**

ιδιώτες & επιχειρήσεις  
έως το τέλος του 2027

**Σήμερα το COSMOTE Fiber,  
μέσω υποδομών FTTC & FTTH, έχει συνολικά:**

Μήκος  
**>43.000χλμ.**

Ενεργές καμπίνες  
**16.400**

Κάλυψη σε  
**3.400.000**  
νοικοκυριά & επιχειρήσεις

Ταχύτητες έως  
**200Mbps**  
μέσω FTTC

Ταχύτητες  
**1Gbps**  
μέσω FTTH



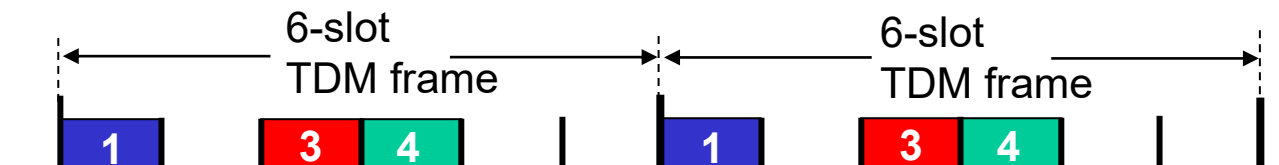


# Πρωτόκολλα MAC κατάτμησης καναλιού: TDMA

TDMA: time division multiple access (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου)

- Πρόσβαση στο κανάλι σε "γύρους" (γύρος = TDM πλαίσιο)
- Κάθε σταθμός παίρνει θυρίδα σταθερού μήκους (μήκος θυρίδας = χρόνος μετάδοσης πακέτου) σε κάθε γύρο / TDM πλαίσιο
- Θυρίδες σταθμών που δεν έχουν κίνηση παραμένουν αδρανείς

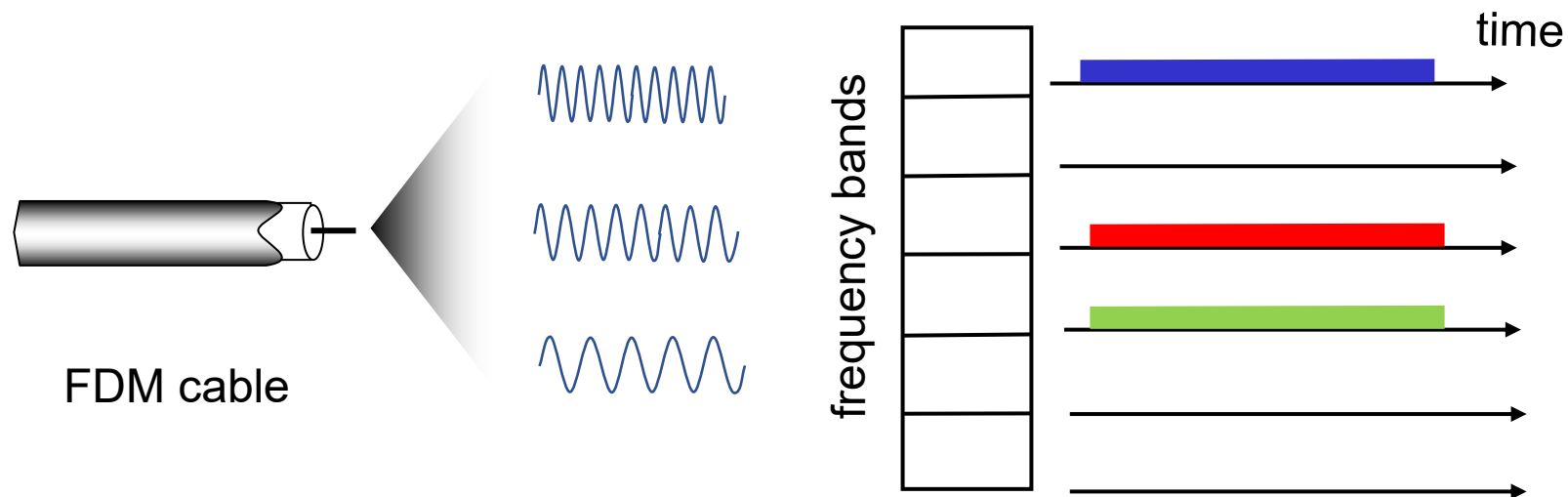
6 κόμβοι LAN, κόμβοι 1,3,4 έχουν πακέτα, κόμβοι 2,5,6 αδρανείς



# Πρωτόκολλα MAC κατάτμησης καναλιού: FDMA

**FDMA: frequency division multiple access (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας)**

- Το φάσμα του καναλιού διαιρείται σε ζώνες συχνοτήτων
  - Σε κάθε σταθμό εκχωρείται μια σταθερή ζώνη συχνοτήτων
  - Ο χρόνος που δεν χρησιμοποιείται στις ζώνες συχνοτήτων παραμένει αδρανής
- 6 κόμβοι LAN, κόμβοι 1,3,4 έχουν πακέτα, κόμβοι 2,5,6 αδρανείς



# Πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης

- Όταν ο κόμβος έχει πακέτο προς αποστολή
  - μεταδίδει με τον πλήρη ρυθμό του καναλιού  $R$
  - χωρίς *a priori* συντονισμό μεταξύ των κόμβων
- Δύο ή περισσότεροι κόμβοι μεταδίδουν: **σύγκρουση (collision)**
- Το πρωτόκολλο **MAC τυχαίας πρόσβασης** καθορίζει:
  - πώς να ανιχνεύονται οι συγκρούσεις
  - πώς να γίνεται η ανάνηψη από συγκρούσεις (π.χ., μέσω καθυστερημένων αναμεταδόσεων)
- Παραδείγματα πρωτοκόλλων MAC τυχαίας πρόσβασης:
  - ALOHA, θυριδωτό (slotted) ALOHA
  - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

# Θυριδωτό (slotted) ALOHA

## Υποθέσεις:

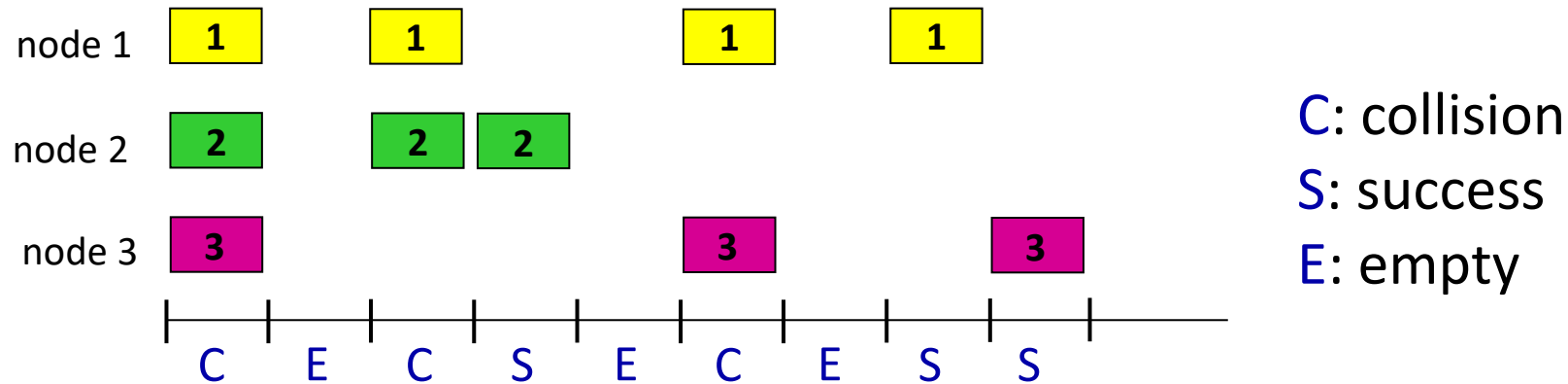
- όλα τα πλαίσια έχουν το ίδιο μέγεθος
- ο χρόνος διαιρείται σε ίσου μεγέθους θυρίδες (=χρόνος μετάδοσης 1 πλαισίου)
- οι κόμβοι ξεκινούν να μεταδίδουν πλαίσια μόνο στην αρχή των θυρίδων
- οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι
- αν 2 ή περισσότεροι κόμβοι μεταδώσουν σε μια θυρίδα, όλοι οι κόμβοι ανιχνεύουν τη σύγκρουση

## Λειτουργία:

- όταν ο κόμβος έχει νέο πλαίσιο το μεταδίδει στην επόμενη θυρίδα
  - αν όχι σύγκρουση: ο κόμβος μπορεί να στείλει νέο πλαίσιο στην επόμενη θυρίδα
  - αν σύγκρουση: ο κόμβος αναμεταδίδει το πλαίσιο σε κάθε επόμενη θυρίδα με πιθανότητα  $p$  μέχρι την επιτυχία

τυχαιοποίηση – γιατί;

# Θυριδωτό (slotted) ALOHA



## Πλεονεκτήματα:

- αν μόνο ένας κόμβος είναι ενεργός μπορεί να μεταδίδει διαρκώς στον πλήρη ρυθμό του καναλιού
- σε μεγάλο βαθμό αποκεντρωμένο: μόνο οι θυρίδες στους κόμβους χρειάζεται να είναι συγχρονισμένες
- απλό

## Μειονεκτήματα:

- συγκρούσεις, χάνονται θυρίδες
- αδρανείς θυρίδες (χαμένες και αυτές)
- οι κόμβοι ενδέχεται να μπορούν να ανιχνεύσουν σύγκρουση σε λιγότερο από το χρόνο μετάδοσης ενός πακέτου
- συγχρονισμός ρολογιού

# Θυριδωτό ALOHA: αποδοτικότητα (efficiency)

**Αποδοτικότητα:** ποσοστό επιτυχημένων θυρίδων σε βάθος χρόνου (πολλοί κόμβοι, όλοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή)

- Υπόθεση:  $N$  κόμβοι με πολλά πλαίσια προς αποστολή, ο καθένας μεταδίδει σε μια θυρίδα με πιθανότητα  $p$

- πιθανότητα ένας κόμβος να επιτύχει σε μια θυρίδα  $= p \cdot (1-p)^{N-1}$
- πιθανότητα κάποιος από όλους τους κόμβους να επιτύχει  $S(p) = N \cdot p \cdot (1-p)^{N-1}$
- μέγιστη αποδοτικότητα: στο  $p^*$  που μεγιστοποιεί το  $S(p)$

$$S'(p^*) = 0 \rightarrow p^* = 1/N$$

- το όριο του  $S(p^*) = N \cdot p^* \cdot (1-p^*)^{N-1}$  καθώς  $N$  πάει στο άπειρο (πολλοί κόμβοι), δίνει:

$$\text{μέγιστη αποδοτικότητα} = 1/e = 0.37$$

**Στην καλύτερη περίπτωση:** το κανάλι χρησιμοποιείται για ωφέλιμες μεταδόσεις το 37% του χρόνου!

# Πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος και ανίχνευση σύγκρουσης (CSMA/CD – Collision detection)

(απλό) **CSMA**: άκου πριν μεταδώσεις:

- αν το κανάλι είναι ανενεργό: μετάδωσε ολόκληρο το πλαίσιο
  - αν το κανάλι ανιχνευτεί απασχολημένο: ανέβαλε τη μετάδοση
- ανθρώπινη αναλογία: μη διακόπτεις τους άλλους!

**CSMA/CD**: CSMA με *ανίχνευση σύγκρουσης (collision detection)*

- οι συγκρούσεις ανιχνεύονται γρήγορα
  - οι μεταδόσεις που συγκρούονται **διακόπτονται**, μειώνοντας τον χαμένο χρόνο του καναλιού
  - η ανίχνευση είναι εύκολη στα ενσύρματα LANs (μέτρηση ισχύος, σύγκριση μεταδιδόμενου/λαμβανόμενου σήματος), και δύσκολη στα ασύρματα (το λαμβανόμενο σήμα «καλύπτεται» από το μεταδιδόμενο)
- ανθρώπινη αναλογία: ο ευγενικός συνομιλητής



# CSMA/CD αποδοτικότητα (efficiency)

- $t_{prop}$  = μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ 2 κόμβων στο LAN
- $t_{trans}$  = χρόνος για τη μετάδοση του πλαισίου μέγιστου μεγέθους

$$efficiency = \frac{1}{1 + 5t_{prop} / t_{trans}}$$

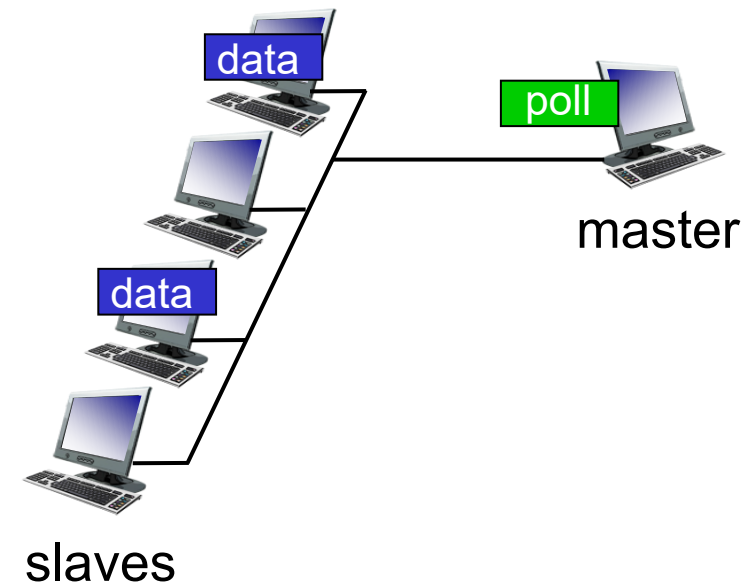
- η αποδοτικότητα πάει στο 1
  - όταν το  $t_{prop}$  πάει στο 0
  - όταν το  $t_{trans}$  πάει στο άπειρο
- καλύτερη απόδοση από το ALOHA: και απλό, φθηνό, αποκεντρωμένο!

Παράδειγμα: 100 m  $\rightarrow$   $t_{prop} \approx 0.5$   $\mu$ sec, R=100 Mb/s, L =1500 Bytes  $\rightarrow$   
 $t_{trans} = 120$   $\mu$ sec, efficiency  $\approx 0.98$  !

# Πρωτόκολλα MAC λειτουργίας εκ περιτροπής

## Σταθμοσκόπηση (polling):

- ο master κόμβος “προσκαλεί” τους slaves να μεταδώσουν με τη σειρά
- συνήθως χρησιμοποιείται με “χαζές” slave συσκευές
- προβληματισμοί:
  - overhead σταθμοσκόπησης
  - καθυστέρηση
  - μοναδικό σημείο αποτυχίας (master)



# Πρωτόκολλα MAC

- Χρησιμοποιούνται στα δίκτυα τοπικής περιοχής LAN (Ethernet, WiFi) αλλά και στα δίκτυα πρόσβασης (Cable TV, PON)
- Η επιλογή βασίζεται στην απόσταση / καθυστέρηση διάδοσης
  - Τα τοπικά δίκτυα έχουν μικρές αποστάσεις που κάνουν αποδοτικά τα πρωτόκολλα τυχαίας πρόσβασης
  - Τα δίκτυα πρόσβασης έχουν μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιούν συνήθως συνδυασμούς  
π.χ. TDM-PON δίνει δεδομένο εύρος ζώνης/χρονοσχιμές σε όλους και το υπόλοιπο το αναθέτει δυναμικά, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των χρηστών (εκ-περιτροπής)