



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΤΜΗΜΑ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ +
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων (M132)

Δίκτυα πρόσβασης – Κινητά Δίκτυα

Διδάσκων:

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

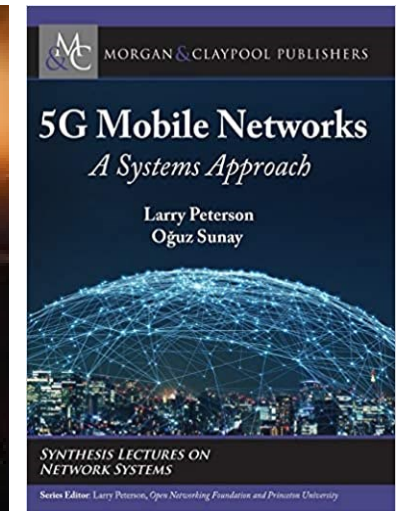
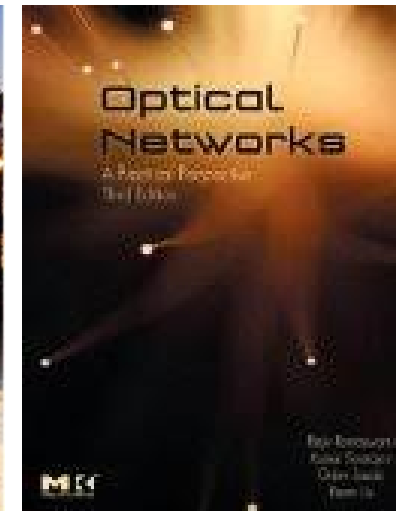
kchristodou@di.uoa.gr

<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**
(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^η 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

Κινητά Δίκτυα

■ Εισαγωγή

- Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
- Γενιές κυψελοειδών δικτύων

■ Ραδιοφάσμα

■ 4G LTE

- Αρχιτεκτονική
- Radio Access Network (RAN)
- Evolved Packet Core (EPC)

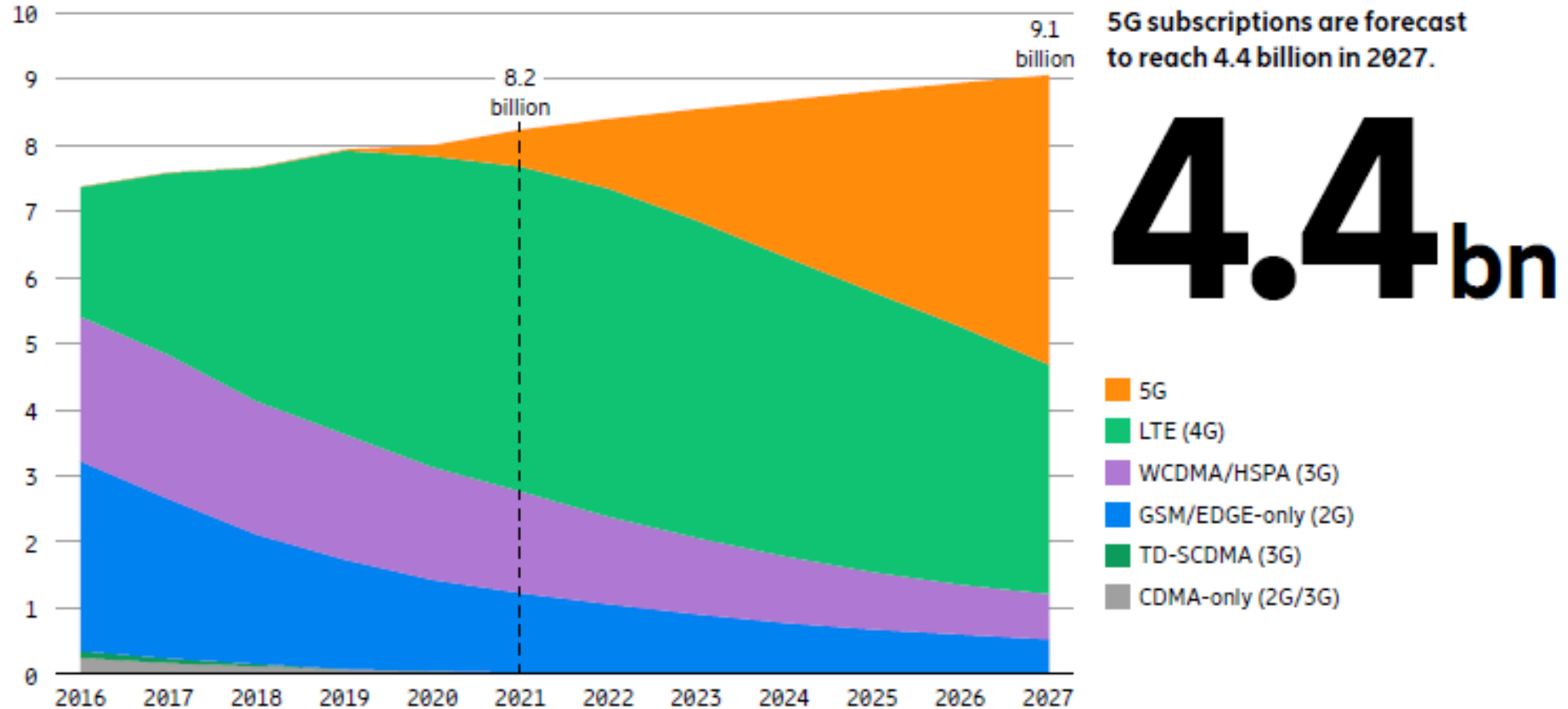
■ 5G

- Numerology/Radio frames
- Cloud-RAN
- 5G Core
- Deployment options, slicing



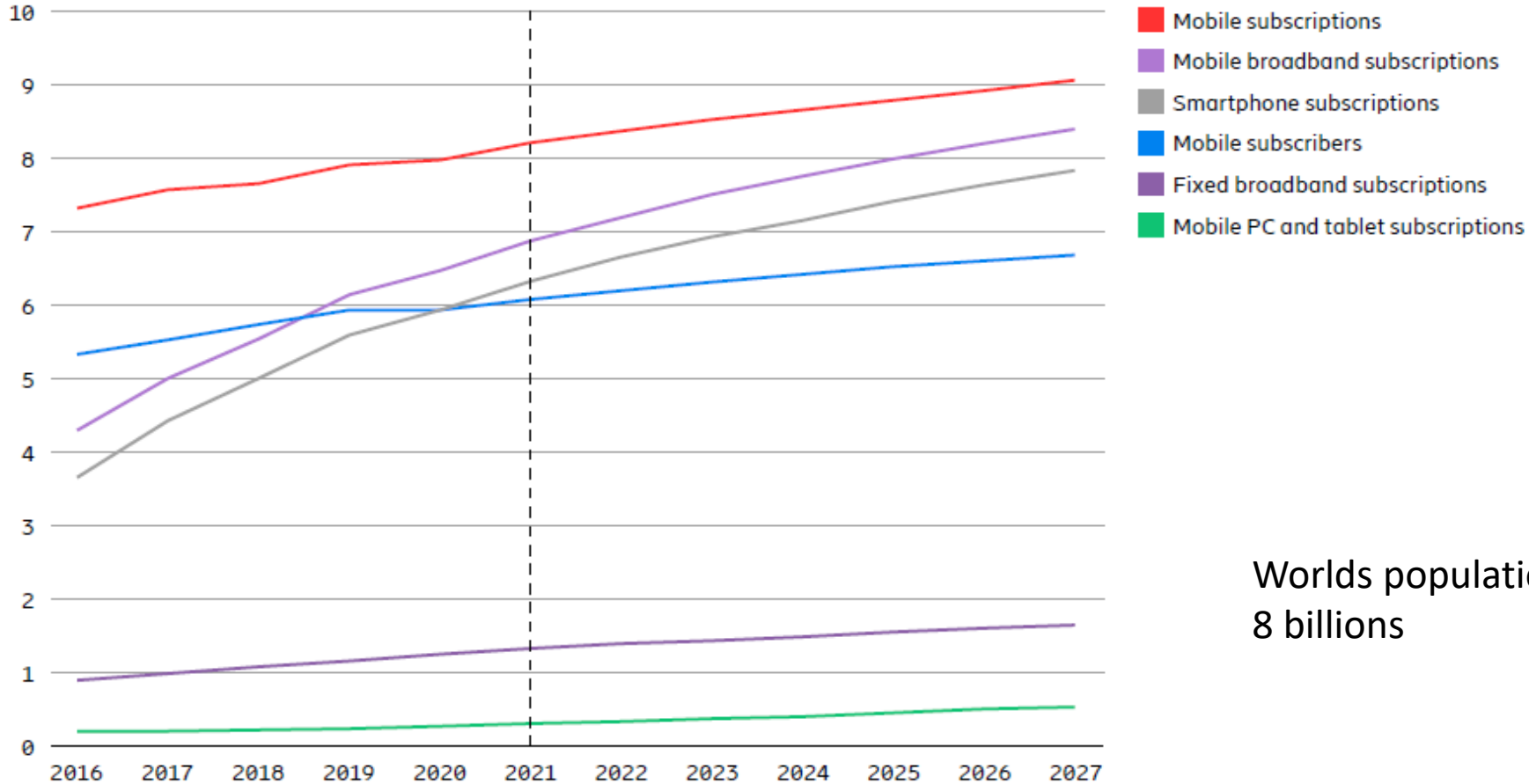
Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

Figure 1: Mobile subscriptions by technology (billion)



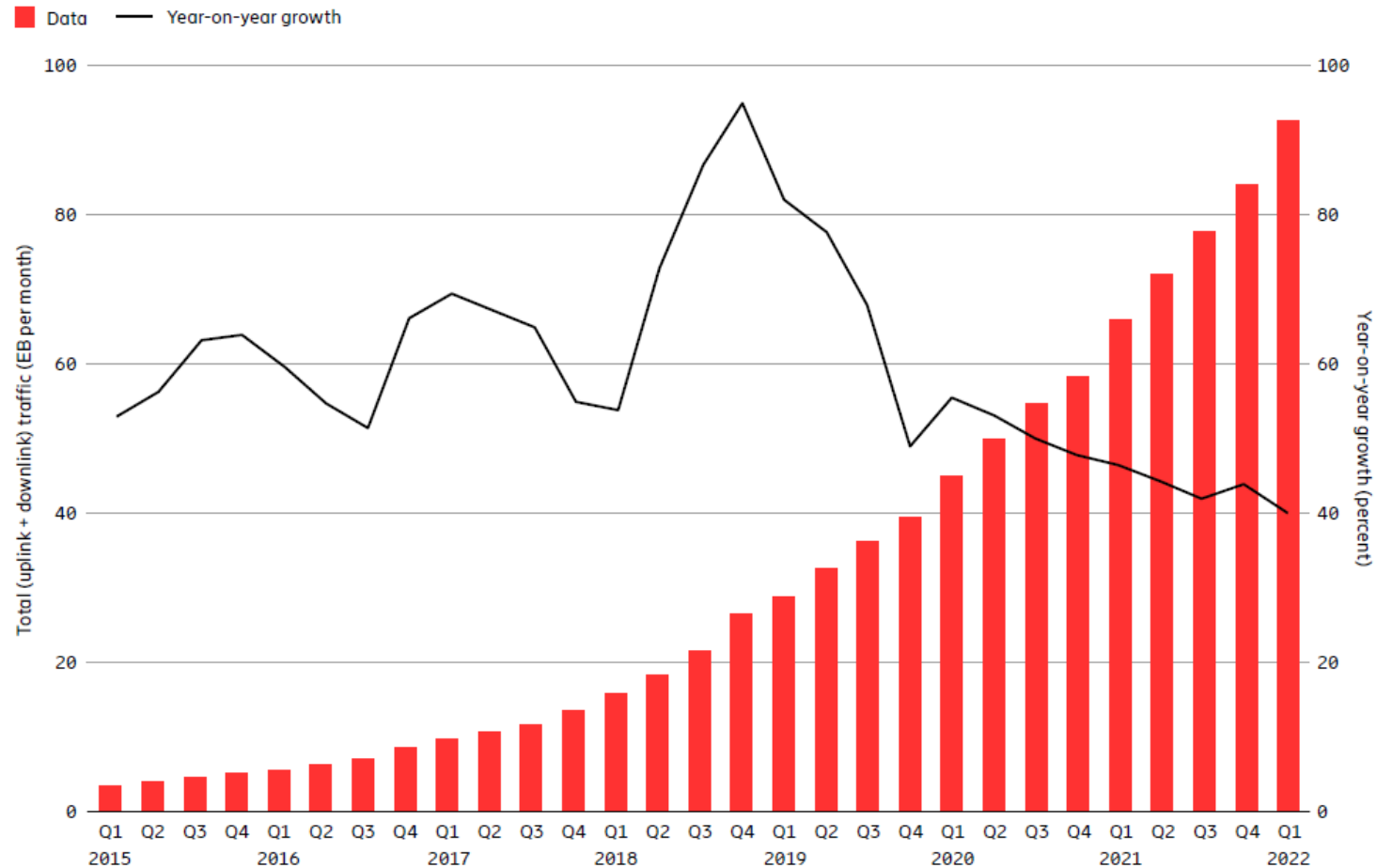
Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

Figure 3: Subscriptions and subscribers (billion)



Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

Figure 15: Global mobile network data traffic and year-on-year growth (EB per month)

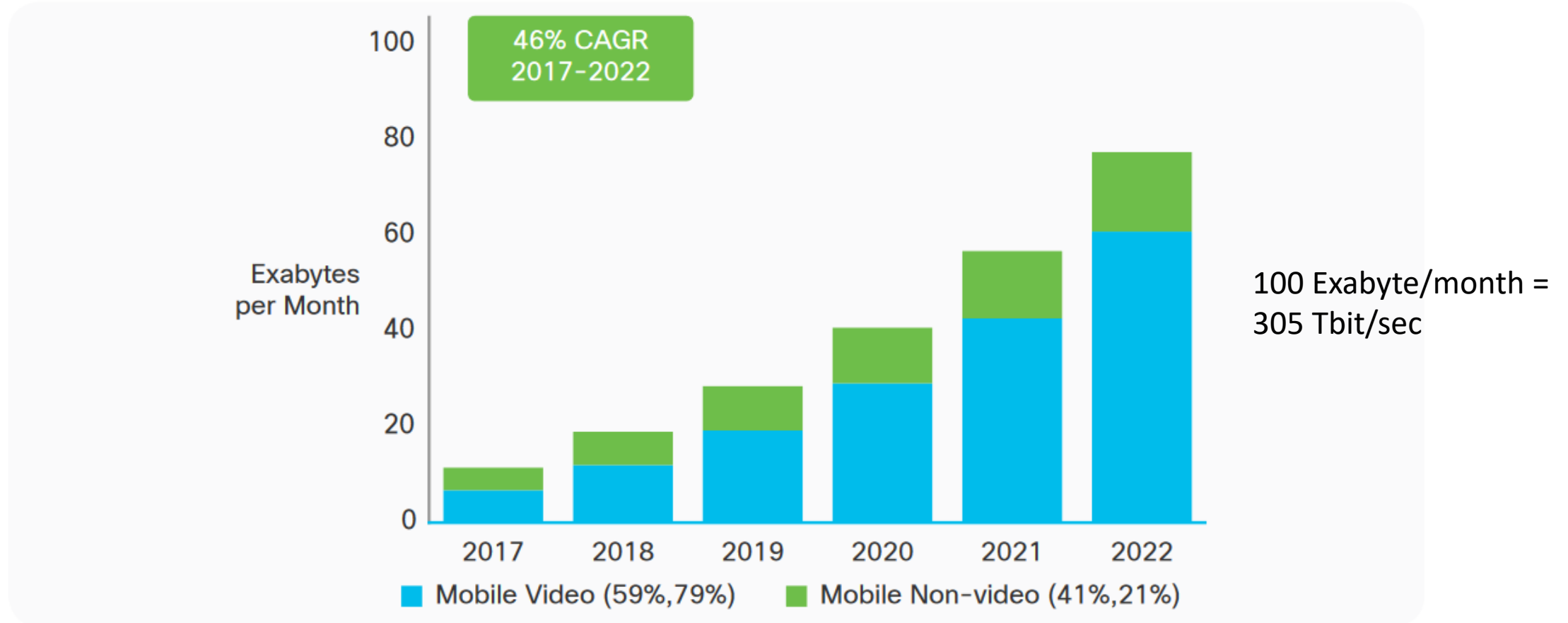


Source: Ericsson traffic measurements (Q1 2022).

Note: Mobile network data traffic also includes traffic generated by fixed wireless access (FWA) services.

Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

Figure 21. Mobile Video Will Generate Nearly Four-Fifths of Mobile Data Traffic by 2022



Note: Figures in parentheses refer to 2017 and 2022 traffic share.

Source: Cisco VNI Mobile, 2019

Κινητά Δίκτυα (Mobile Networks)

- Περισσότεροι συνδρομητές κινητών (mobile) τηλεφώνων παρά σταθερών (wired) (10-προς-1 το 2019)!
- Περισσότερες κινητές-ευρυζωνικές κινητές (mobile-broadband) συσκευές συνδεδεμένες παρά σταθερές-ευρυζωνικές (fixed-broadband) (5-1 in 2019)!
- 4G/5G κυψελοειδή δίκτυα ακολουθούν την στοίβα πρωτοκόλλων του Internet και το software defined networking (SDN)
- Δύο σημαντικές προκλήσεις
 - ασύρματη επικοινωνία
 - κινητικότητα: κινητός χρήστης που αλλάζει σημείο σύνδεσης στο δίκτυο

Χαρακτηριστικά ασύρματης ζεύξης (1)

σημαντικές διαφορές από ενσύρματη ζεύξη

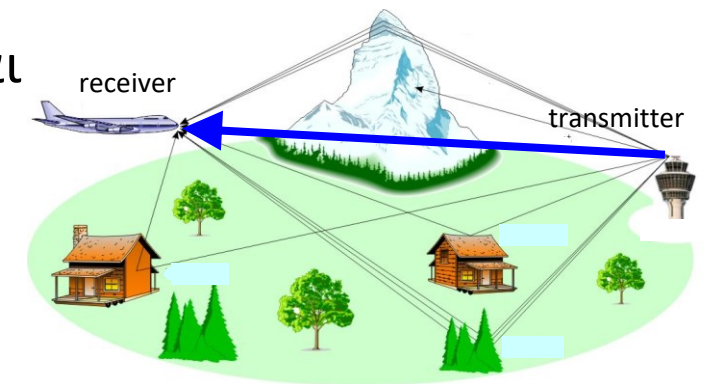
- **Εξασθένηση ισχύς σήματος:** το ραδιοσήμα εξασθενεί καθώς διαδίδεται στον αέρα (τα κύματα διαδίδονται σε 3 διαστάσεις free space path loss FSPL $\sim d^2$, οι υψηλές συχνότητες έχουν μεγάλη εξασθένηση $\sim f^2$) + επιπλέον εξασθένηση από εμπόδια
- **Παρεμβολές από άλλες πηγές:** οι συχνότητες μοιράζονται με άλλες συσκευές (π.χ., 2.4 GHz (wifi) ίδιο με DECT, φούρνους μικροκυμάτων)
- **Διάδοση πολλαπλών διαδρομών:** τα ραδιοσήματα ανακλώνται από αντικείμενα στο έδαφος, φθάνοντας στον προορισμό σε ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους

.... κάνουν την επικοινωνία πάνω από μια ασύρματη ζεύξη (ακόμα και «σημείου προς σημείο») πολύ πιο “δύσκολη”

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

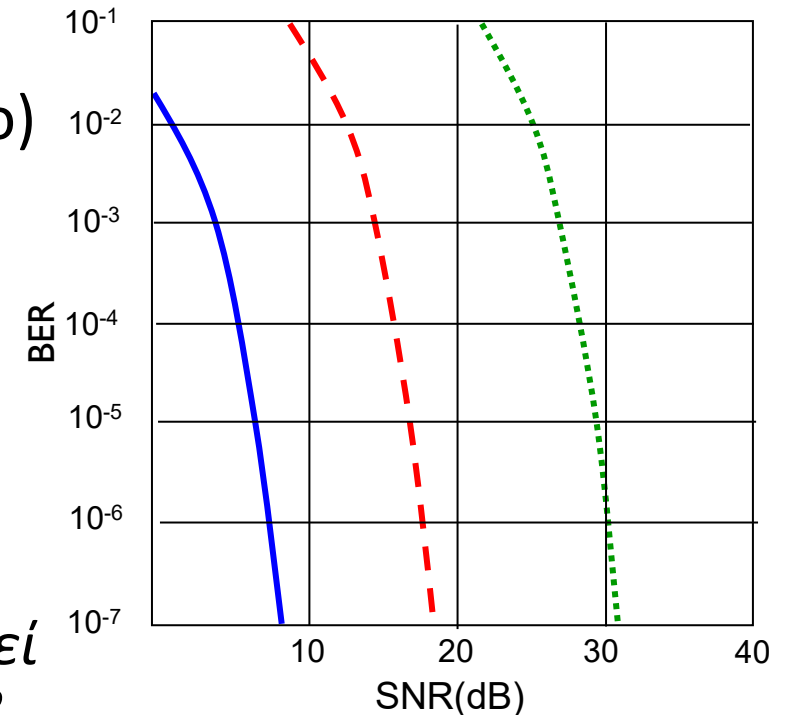
$$FSPL(\text{dB}) = 20 \log_{10}(d_{\text{km}}) + 20 \log_{10}(f_{\text{GHz}}) + 92.45$$

π.χ. 10 km, 3 GHz: 122 dB



Χαρακτηριστικά ασύρματης ζεύξης (2)

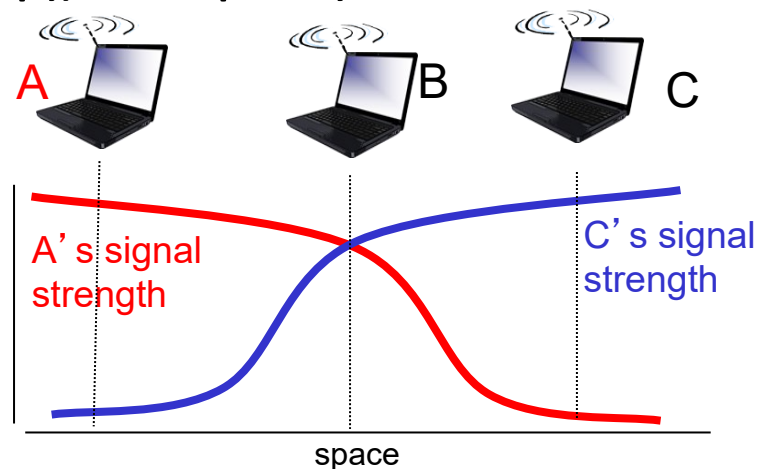
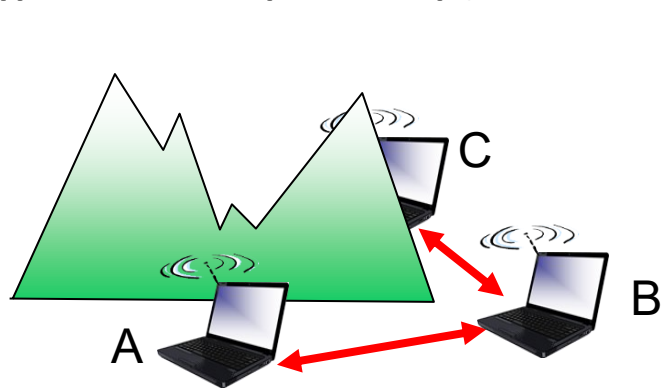
- Αποδεκτή επικοινωνία $BER > \text{όριο FEC}$ (π.χ. 10^{-2})
- SNR: signal-to-noise ratio (λόγος σήματος προς θόρυβο)
 - Μεγάλο SNR – ο δέκτης εξάγει ευκολότερα το σήμα από τον θόρυβο
- Διαφορετικές μορφές διαμόρφωσης / διαφορετικές συναρτήσεις **BER – SNR**
 - *δεδομένου καναλιού/θορύβου:*
αύξηση ισχύος \rightarrow αύξηση SNR \rightarrow μείωση BER
 - *δεδομένου SNR:* επιλογή διαμόρφωσης που ικανοποιεί το BER όριο, βέλτιστη απόδοση για συγκεκριμένο SNR
- Στις ασύρματες επικοινωνίες το SNR αλλάζει με την *κίνηση* της συσκευής ή του περιβάλλοντος
 - λύση: **δυναμική προσαρμογή** (ισχύς και μορφής διαμόρφωσης)



- QAM256 (8 Mbps)
- - - QAM16 (4 Mbps)
- BPSK (1 Mbps)

Χαρακτηριστικά ασύρματης ζεύξης (3)

Πολλαπλοί ασύρματοι αποστολείς και παραλήπτες δημιουργούν επιπλέον προβλήματα (πέραν της πολλαπλής πρόσβασης) – κυρίως σε δίκτυα WiFi



Πρόβλημα κρυμμένου τερματικού (Hidden terminal)

- B, A ακούνε ο ένας τον άλλο
- B, C ακούνε ο ένας τον άλλο
- A, C δεν ακούνε ο ένας τον άλλο: οι A, C αγνοούν τις παρεμβολές τους στο B

Εξασθένηση σήματος

- B, A ακούνε ο ένας τον άλλο
- B, C ακούνε ο ένας τον άλλο
- A, C αγνοούν τις παρεμβολές τους στο B

Πως χειριζόμαστε τα λάθη

- Αιτία λαθών
 - Ενσύρματα: λίγα λάθη στη μετάδοση, απώλεια πακέτων εξαιτίας συμφόρησης στους δρομολογητές
 - Ασύρματα: λάθη στη μετάδοση
- Τι κάνουμε στα ενσύρματα
 - Έλεγχος (κάποιες φορές και διόρθωση) σε κάθε (ενσύρματη) ζεύξη για λάθη μετάδοσης, απόρριψη πακέτων με λάθη (μικρή πιθανότητα)
 - TCP: Επαναμεταδόσεις από-άκρο-σε-άκρο και έλεγχο ροής για τις απώλειες στους δρομολογητές
- Τι κάνουμε στα ασύρματα
 - Αύξηση της ισχύος μετάδοσης
 - Περισσότερη κατανάλωση ενέργειας (κακό για τη μπαταρία)
 - Δημιουργεί παρεμβολές σε άλλους δέκτες
 - Επιλογή κατάλληλης τεχνικής διαμόρφωσης
 - Ρίχνουμε τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για να μειωθούν τα λάθη
 - Έλεγχος και διόρθωση λαθών και επαναμεταδόσεις
 - Πιο ισχυροί κώδικες (βαριά επεξεργασία, πλεονασμός - μεγαλύτερη κατανάλωση καναλιού)
 - Επαναμεταδόσεις σε μία ζεύξη (μεγαλύτερη κατανάλωση καναλιού)

4G/5G κυψελωτά δίκτυα

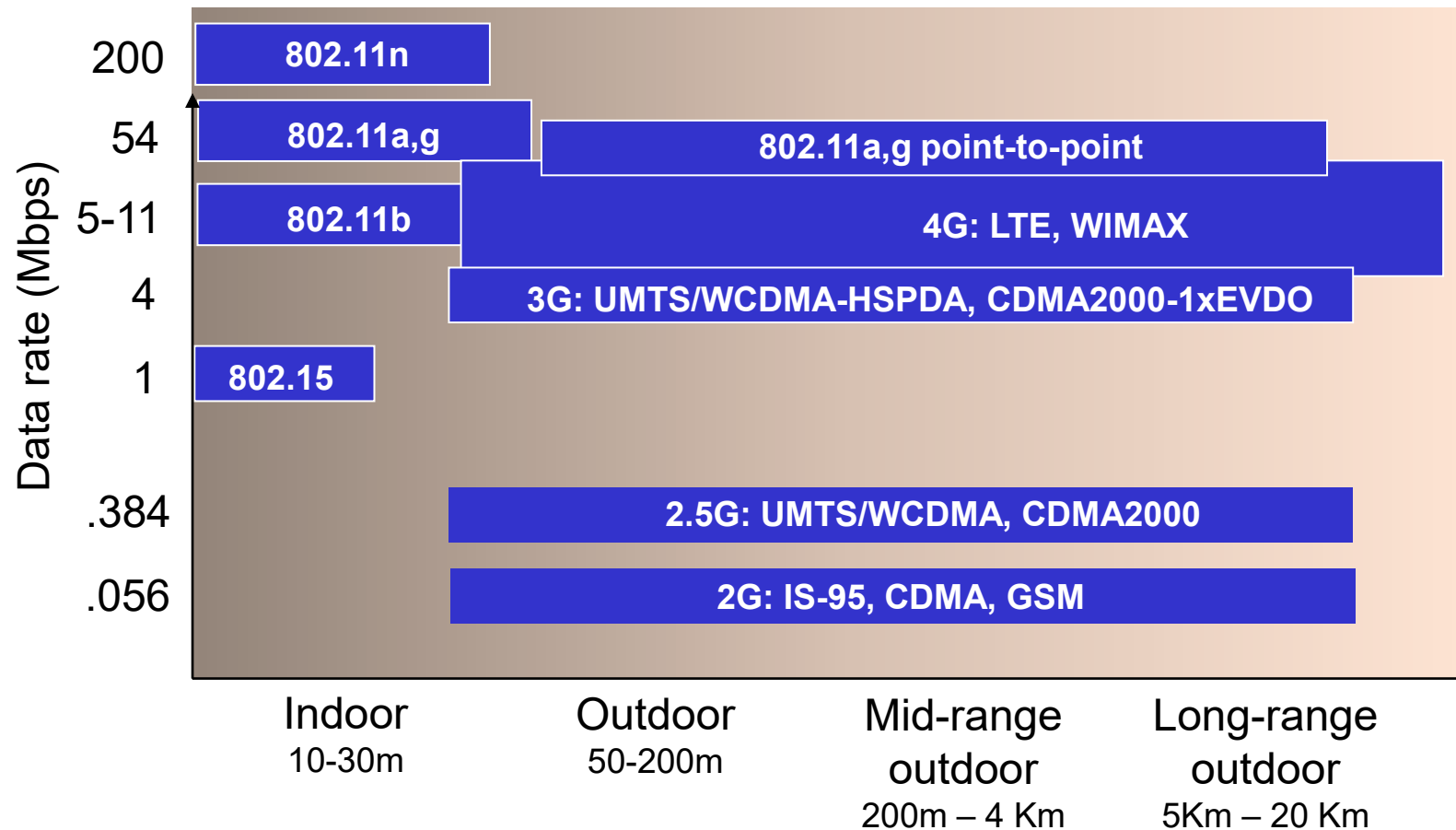
Ομοιότητες με τα ενσύρματα

- Διάκριση άκρης/πυρήνα δικτύου, αλλά και τα δύο ανήκουν στον ίδιο πάροχο στα κυψελωτά
- Παγκόσμιο κυψελωτό δίκτυο: ένα δίκτυο δικτύων
- Ευρεία χρήση των πρωτοκόλλων της TCP/IP στοίβας: HTTP, DNS, TCP, UDP, IP, NAT, Ethernet, σήραγγες
- Διαχωρισμός των επιπέδων δεδομένων/ελέγχου (SDN)
- Διασυνδεδεμένο με το ενσύρματο Διαδίκτυο

Διαφορές από ενσύρματα δίκτυα

- Διαφορετικό επίπεδο ζεύξης
- Κινητικότητα ως βασική υπηρεσία
- «Ταυτότητα» χρήστη (μέσω SIM)
- Επιχειρηματικό μοντέλο: οι χρήστες γίνονται συνδρομητές ενός παρόχου κινητής τηλεφωνίας
 - ισχυρή έννοια του «οικιακού δικτύου» και έννοια της περιαγωγής σε επισκεπτόμενα δίκτυα
 - παγκόσμια πρόσβαση, με υποδομή επαλήθευσης ταυτότητας και διακανονισμούς μεταξύ παρόχων

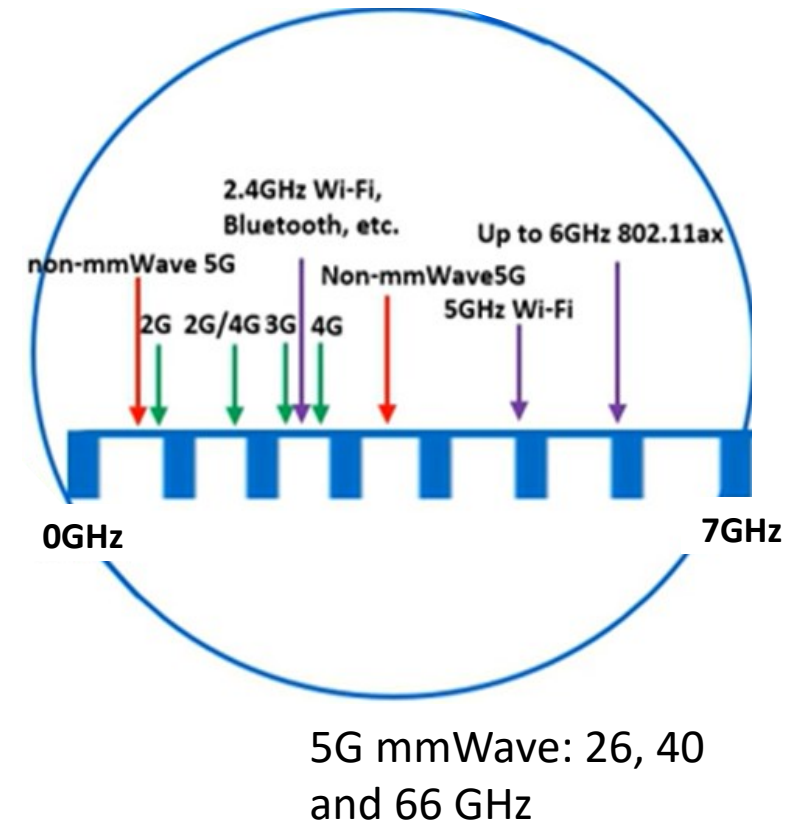
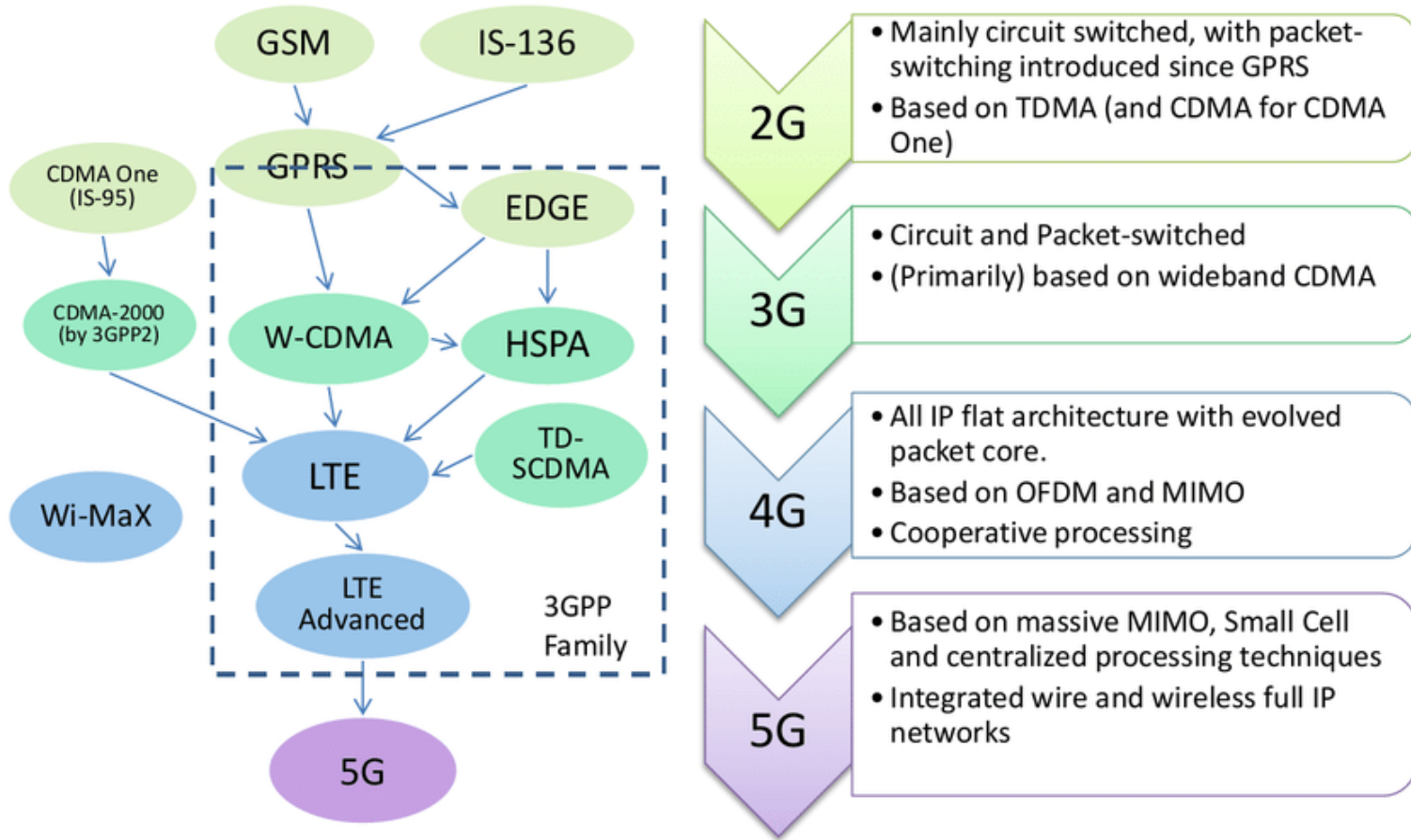
Χαρακτηριστικά επιλεγμένων ασύρματων προτύπων



Εξέλιξη κυψελωτών επικοινωνιών

Generation	Standard	name	Frequency (main bands)	Max Speed DownLink	Multiple Access	Notes
2G ~1990	GSM	Global System for Mobile Communications	900 MHz, 1.8 GHz	14 Kbps	TDMA/FDMA	Europe and then global
	GPRS (G)	General Packet Radio Service	900 MHz, 1.8 GHz	171 Kbps	TDMA/FDMA	Improved GSM + introduce Internet service (2.5 G)
	EDGE (E)	Enhanced Data rates for GSM Evolution	900 MHz, 1.8 GHz	384 Kbps	TDMA/FDMA	Improved GPRS (2.75 G)
	IS95 (CDMAOne)	Interim Standard	800 MHz and 1.900 GHz	14 Kbps	CDMA	US and Asia
3G ~2000	UMTS (W-CDMA)	Universal Mobile Telecommunications Systems	2.1 GHz	2 Mbps	CDMA	Following the GSM architecture– different MAC
	HSPA (H, H+)	High-Speed Packet Access, later HSPA+	2.1 GHz	14 – 40 Mbps	CDMA	Improved UMTS (3.5G)
	EV-DO CDMA2000	Evolution Data Optimized	850 MHz, 1.9 GHz	153 Kbps	CDMA	Improved IS95
4G ~2010	LTE	Long Term Evolution	1.8, 2, 2.6 GHz	100 Mbps	OFDMA	all-IP, MIMO
	LTE-A	Long Term Evolution – Advanced, then Pro	1.8, 2, 2.6 GHz	1 Gbps	OFDMA	Carrier aggregation (wider spectrum) & higher MIMO
5G ~2020	5G	5G NR New Radio	700 MHz, 2, 3.4, 26, 40, 66 GHz	10 Gbps	OFDMA	Massive MIMO, beam-forming, mmWaves

Εξέλιξη κυψελωτών επικοινωνιών

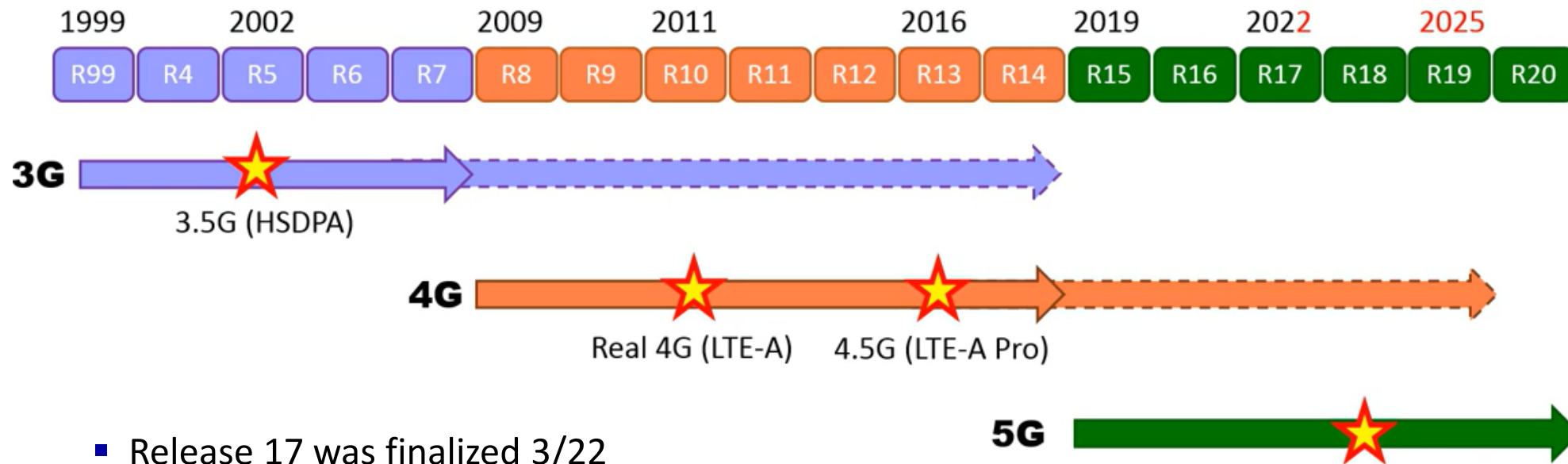


3GPP standards



The 3rd Generation Partnership Project is an umbrella term for several standards organizations (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC) which develop protocols for mobile telecom

3GPP Releases Timeline



- Release 17 was finalized 3/22
- Release 18 was finalized 12/23
- Now working on release 19, release 20 will be on 6G (work will start 2025)!



Κινητά Δίκτυα

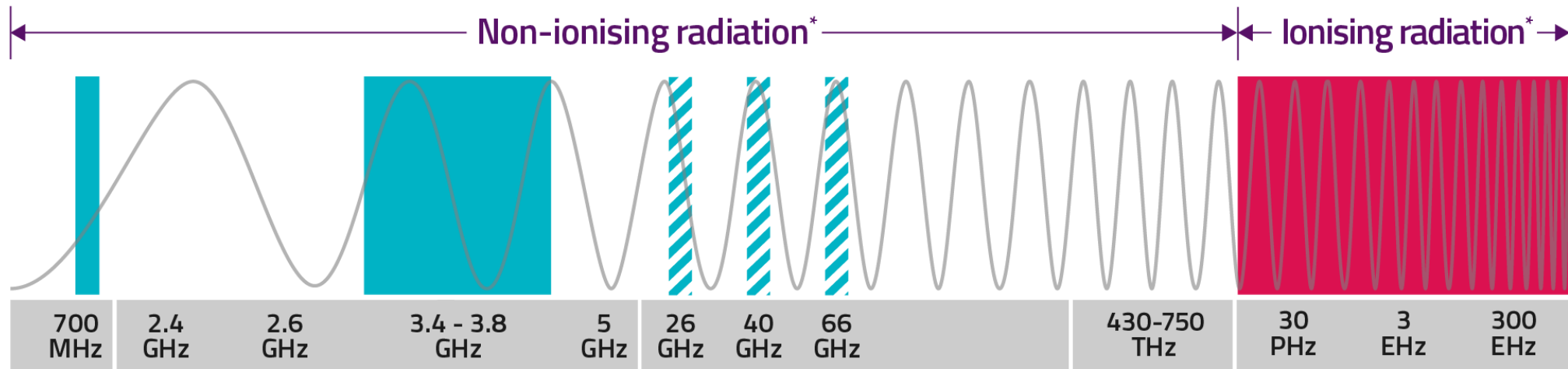
- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- **Ραδιοφάσμα**
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing



Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

The Electromagnetic Spectrum

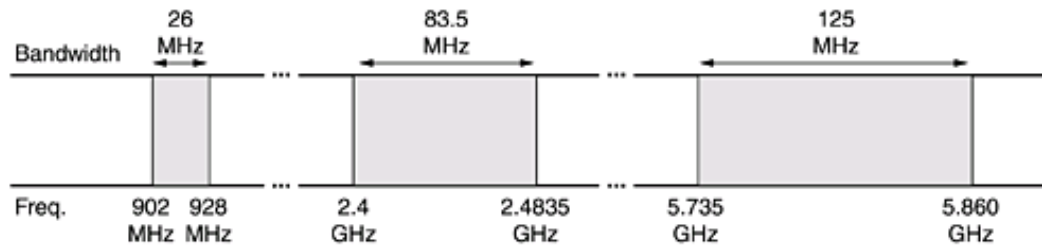


*Radio frequencies needed for common household items to work, from televisions to microwave ovens (usually between 3KHz and 300GHz), produce radiation which is classed as 'non-ionising'. This means that it does not have sufficient energy to break chemical bonds or remove electrons, as opposed to 'ionising radiation', which occurs at much higher frequencies and is generally considered to be hazardous to humans. (Source: International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP))

Hertz (Hz) key:
 kHz: kilohertz = 10^3 Hz
 MHz: megahertz = 10^6 Hz
 GHz: gigahertz = 10^9 Hz
 THz: terahertz = 10^{12} Hz
 PHz: petahertz = 10^{15} Hz
 EHz: exahertz = 10^{18} Hz

Αδειοδότηση φάσματος

ISM Bands (Industrial Scientific Medical)



- Ελεύθερο φάσμα - χωρίς άδεια
- Χρησιμοποιείται από τα Wireless LANs (wifi)

- Το φάσμα για κυψελοειδής επικοινωνίες δεν είναι ελεύθερο
- Το 3GPP ορίζει πιθανά τμήματα φάσματος (κανάλια), η κάθε χώρα επιλέγει κάποια από αυτά και τα δημοπρατεί
 - Για το 5G το 3GPP ορίζει 2 περιοχές: FR1 (450 MHz–6 GHz) και FR2 (24 GHz–52 GHz)
 - Στην Ελλάδα η δημοπρασία φάσματος για 5G οργανώθηκε από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), 7/2020
 - Cosmote, Vodafone & Wind απέκτησαν δικαίωμα χρήσης σε τμήματα των: 700 MHz, 2 GHz, 3400-3800 MHz και 26 GHz
 - Συνολικά έσοδα από δημοπρασία 372 Μ ευρώ

* COSMOTE (123.034.000 €):

- 15 κανάλια στη ζώνη των 3400-3800 MHz με τίμημα 30.705.000 €
- 2 κανάλια στη ζώνη των 700 MHz με τίμημα 50.578.000 €
- 4 κανάλια στη ζώνη των 2 GHz με τίμημα 35.270.000 €
- 2 κανάλια στη ζώνη των 26 GHz με τίμημα 6.481.000 €

* VODAFONE-ΠΑΝΑΦΟΝ (130.176.000 €):

- 14 κανάλια στη ζώνη των 3400-3800 MHz με τίμημα 37.516.000 €
- 2 κανάλια στη ζώνη των 700 MHz με τίμημα 51.060.000 €
- 4 κανάλια στη ζώνη των 2 GHz με τίμημα 35.120.000 €
- 2 κανάλια στη ζώνη των 26 GHz με τίμημα 6.480.000 €

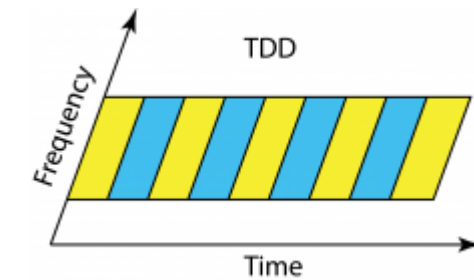
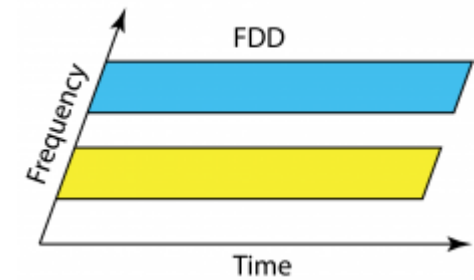
* WIND (119.051.153 €):

- 10 κανάλια στη ζώνη των 3400-3800 MHz με τίμημα 30.306.051 €
- 2 κανάλια στη ζώνη των 700 MHz με τίμημα 50.080.051 €
- 4 κανάλια στη ζώνη των 2 GHz με τίμημα 35.420.000 €
- 1 κανάλι στη ζώνη των 26 GHz με τίμημα 3.245.051 €

3GPP - 5G channels, and US/DS multiplexing

Το 3GPP ορίζει πιθανά τμήματα φάσματος (κανάλια), η κάθε χώρα επιλέγει κάποια από αυτά και τα δημοπρατεί

NR operating band	Uplink (UL) operating band	Downlink (DL) operating band	Duplex Mode
n1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
n5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
n7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
n8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
n12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
n20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
n25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
n38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
n39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
n40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
n41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
n50	1432 MHz – 1517 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	TDD
n51	1427 MHz – 1432 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	TDD
n66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	FDD
n71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
n74	1427 MHz – 1470 MHz	1475 MHz – 1518 MHz	FDD
n75	N/A	1432 MHz – 1517 MHz	SDL
n76	N/A	1427 MHz – 1432 MHz	SDL
n77	3300 MHz – 4200 MHz	3300 MHz – 4200 MHz	TDD
n78	3300 MHz – 3800 MHz	3300 MHz – 3800 MHz	TDD
n79	4400 MHz – 5000 MHz	4400 MHz – 5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz – 1785 MHz	N/A	SUL
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz – 1980 MHz	N/A	SUL
n86	1710 MHz – 1780MHz	N/A	SUL
n257	26500 MHz – 29500 MHz	26500 MHz – 29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz – 27500 MHz	24250 MHz – 27500 MHz	TDD
n260	37000 MHz – 40000 MHz	37000 MHz – 40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz – 28350 MHz	27500 MHz – 28350 MHz	TDD



TDD profile (4G)

Uplink-Downlink Structure	Subframe Number									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

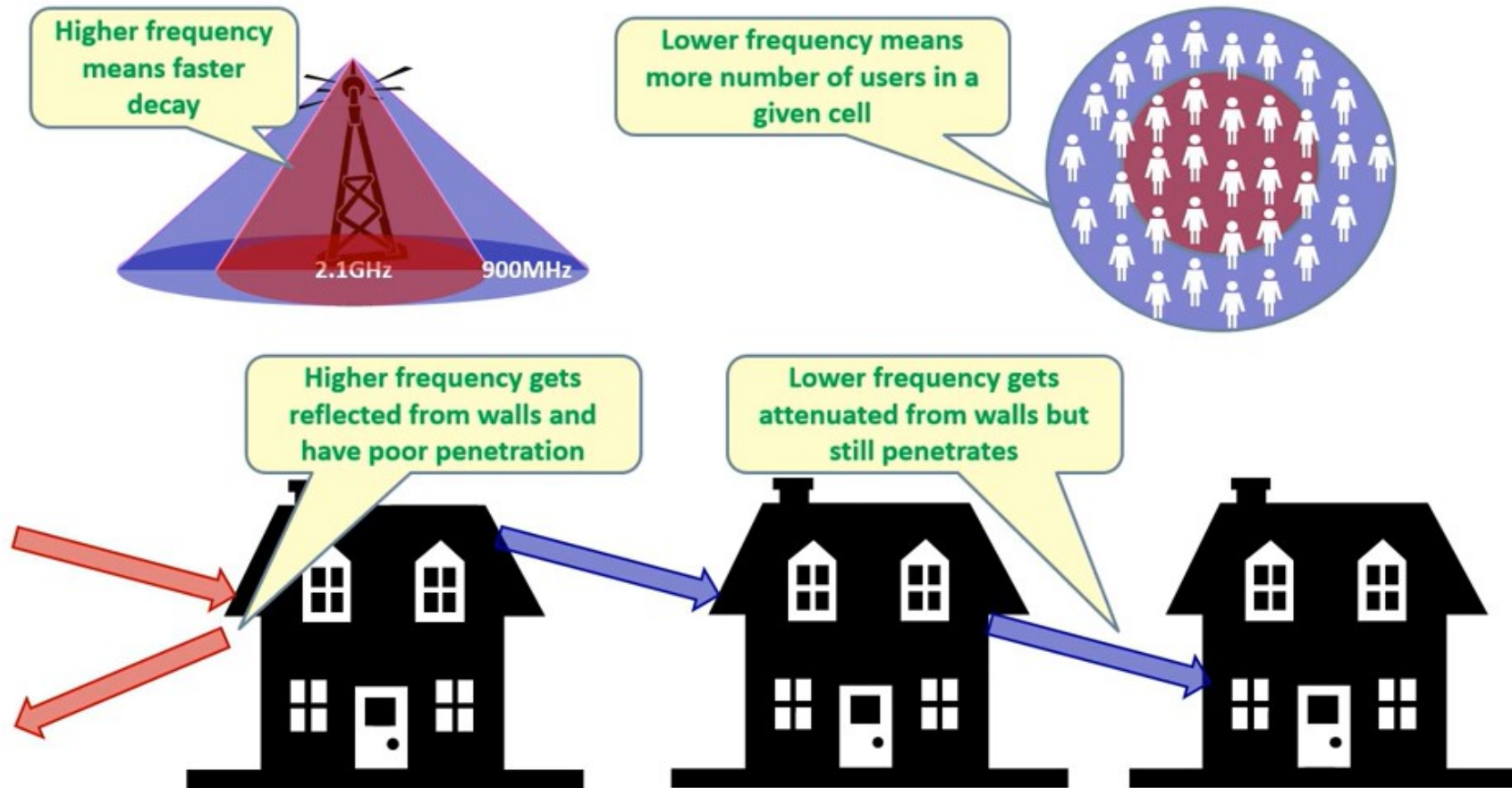
10 ms

FDD: Frequency division duplex (typically equal spectrum uplink & downlink)

TDD: Time division duplex (subframes for uplink and downlink, profiles)

SUL, SDL: Supplementary uplink, Supplementary downlink

High vs low frequency



Υψηλές συχνότητες

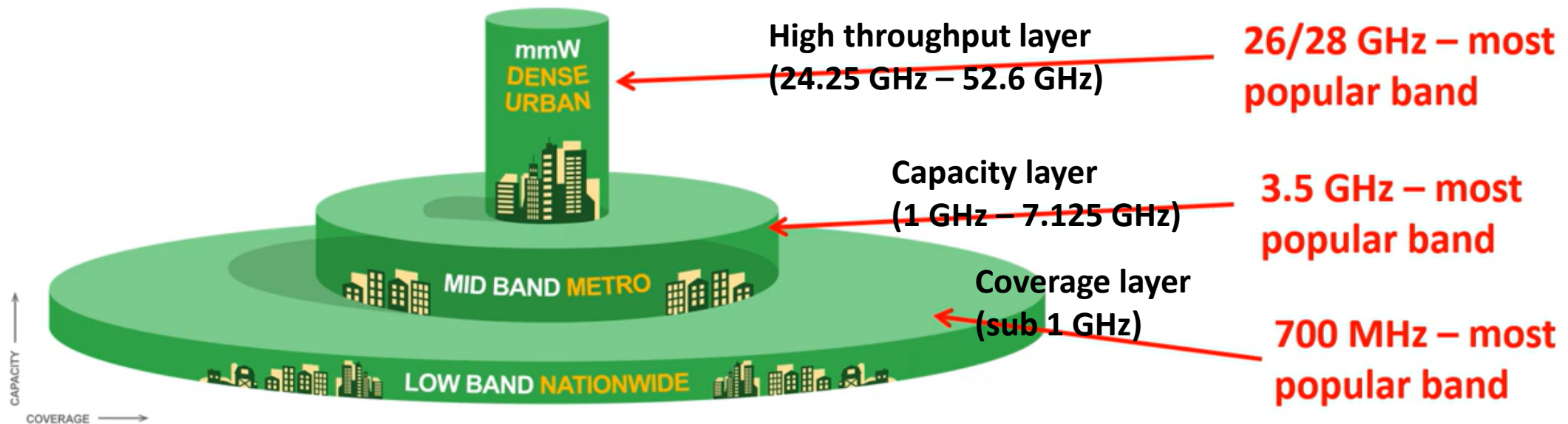
Θετικά:

- i) συνήθως περισσότερο διαθέσιμο φάσμα, άρα περισσότερη χωρητικότητα
- ii) μικρή κάλυψη / κυψέλη, λιγότεροι χρήστες, άρα περισσότερη χωρητικότητα σε κάθε χρήστη

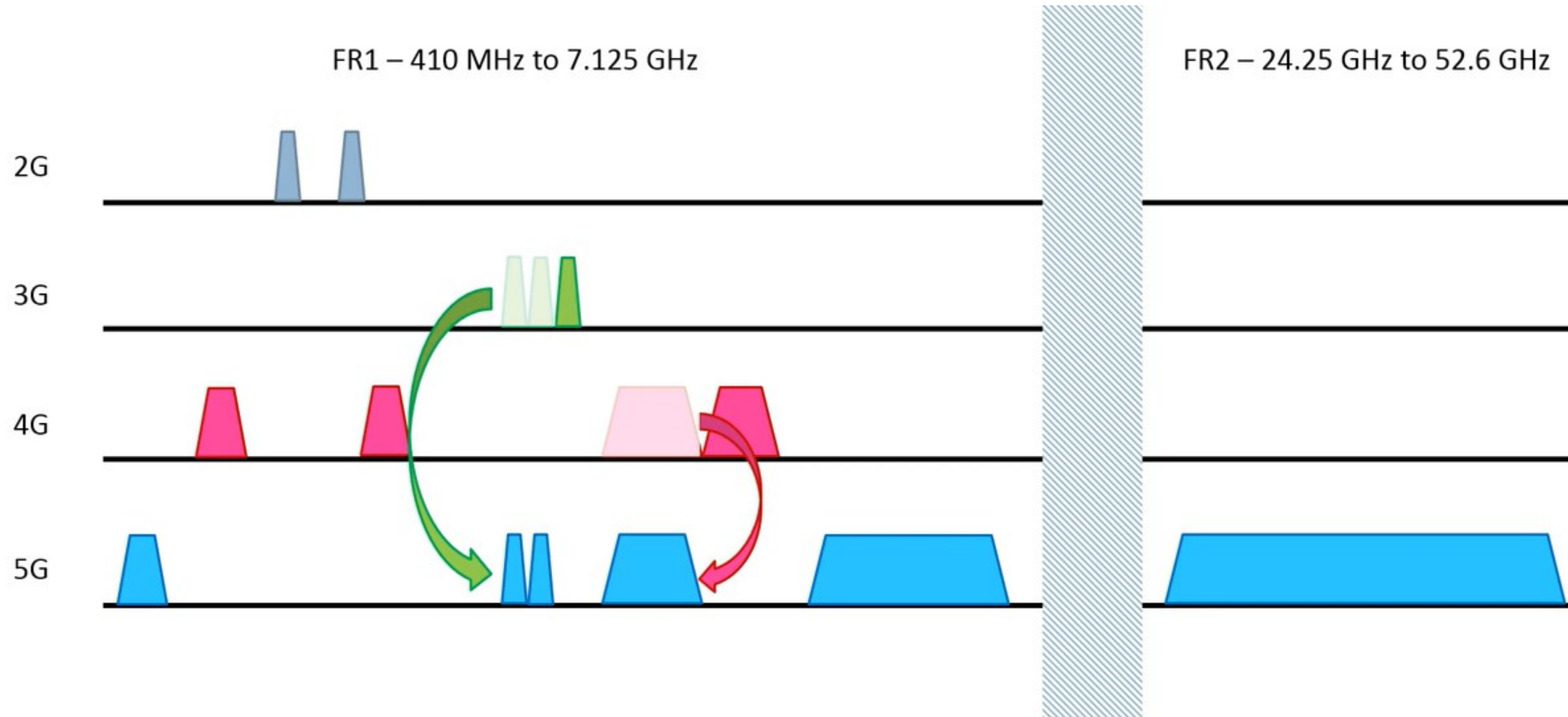
Αρνητικά:

- i) πρόβλημα εξασθένησης
- ii) Χρειάζεται πυκνότερη εγκατάσταση

5G coverage vs capacity



5G spectrum repurposing



Κινητά Δίκτυα

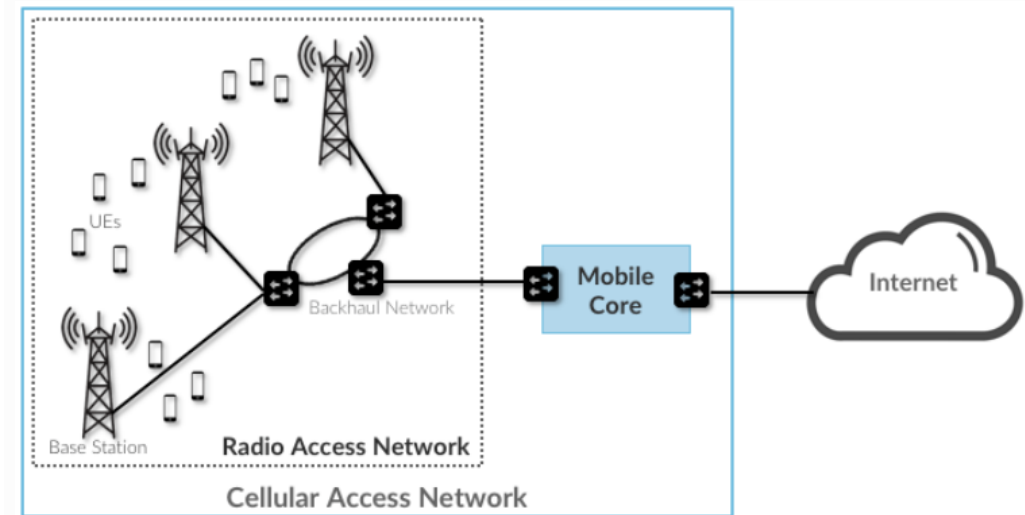
- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- **4G LTE**
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing

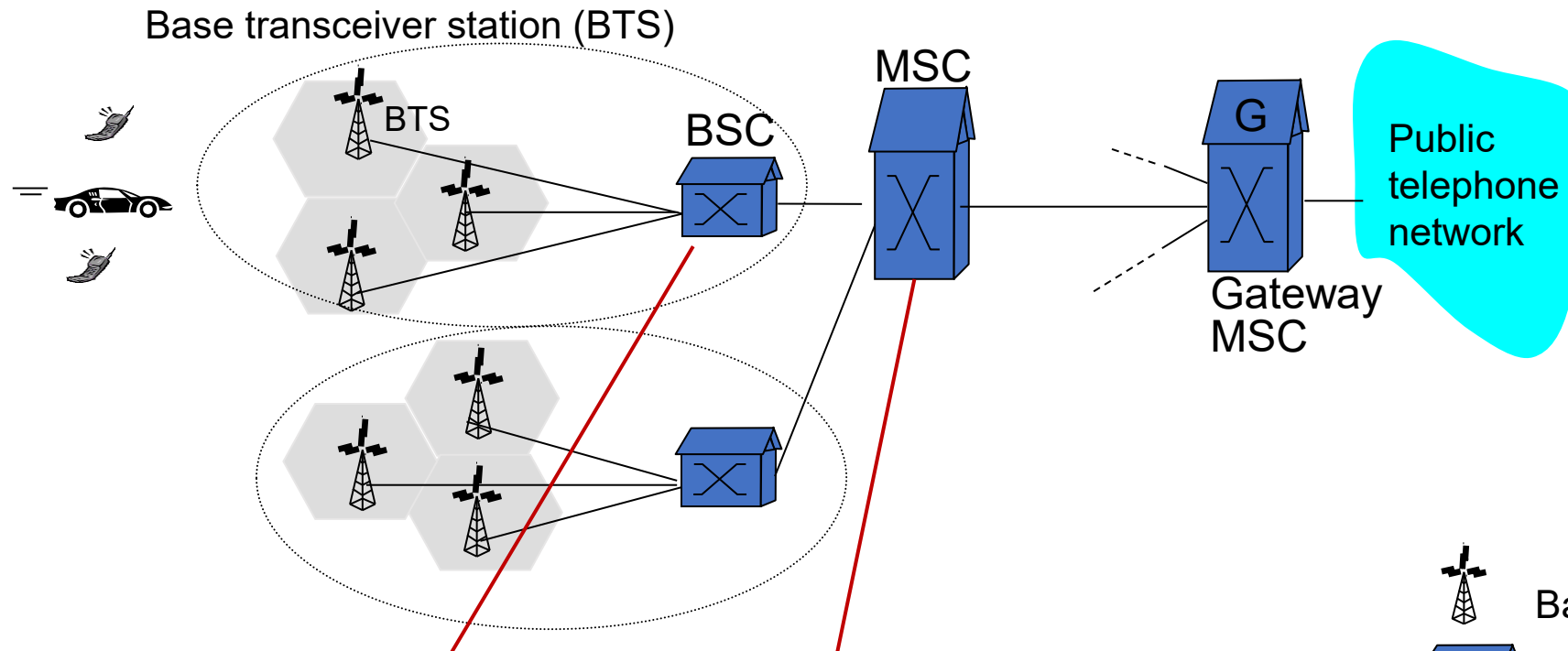


Αρχιτεκτονική κυψελωτών δικτύων

- Τα κυψελωτά δίκτυα έχουν 2 τμήματα: RAN, Core
- Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης-Radio Access Network (RAN)
 - Ασύρματο κομμάτι: κινητό <-> κεραία + επεξεργασία, L1 & L2 (phy & link layer) της ασύρματης επικοινωνίας
 - Στο 4G καλείται Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), το 5G: New Radio (NR)
- Κορμός του Κυψελωτού Δικτύου - Mobile Core
 - Παρέχει συνδεσιμότητα στο υπόλοιπο δίκτυο για υπηρεσίες δεδομένων και φωνής
 - Αυθεντικοποίηση, κινητικότητα, υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών, χρέωση των χρηστών, κλπ
 - Στο 4G καλείται Evolved Packet Core (EPC) και στο 5G καλείται Next Generation Core (NG-Core)



2G GSM (φωνή) - Αρχιτεκτονική

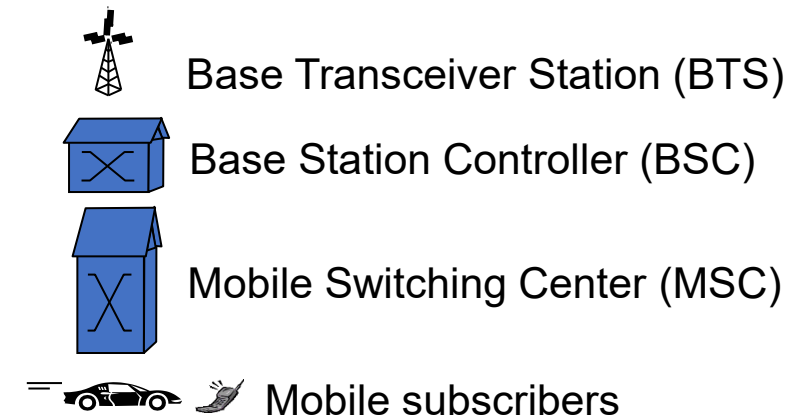


Base Station controller (BSC)

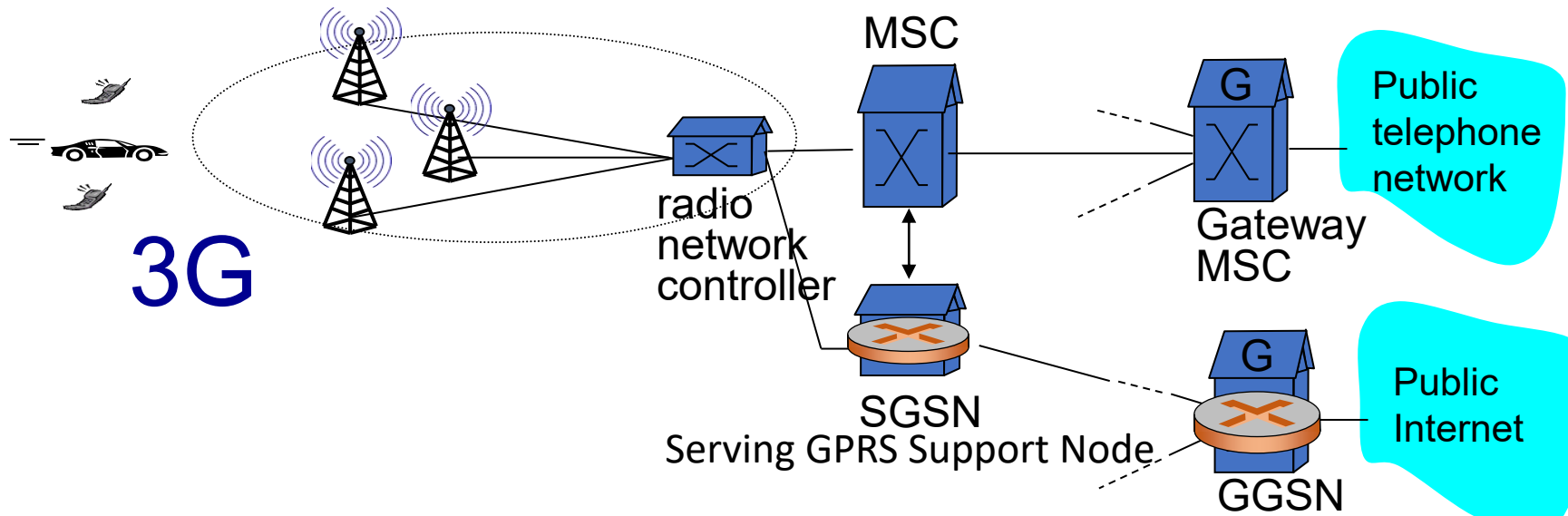
- κατανέμει κανάλια σε χρήστες (bearer: κανάλι χρήστη)
- Paging, καταγραφή θέσης
- hand-over (μεταπομπή)

Mobile Switching Center (MSC)

- συνδέει κυψέλες στο ενσύρματο τηλεφωνικό δίκτυο
- αυθεντικοποίηση
- διαχειρίζεται εγκατάσταση κλήσης
- διαχειρίζεται την κινητικότητα



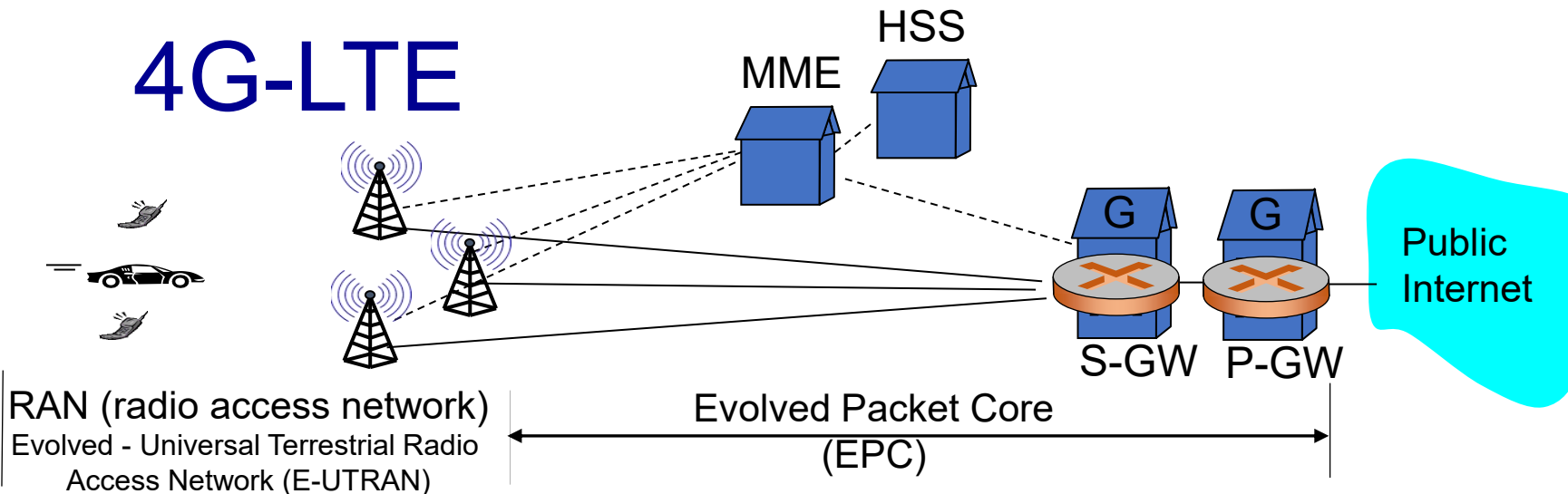
3G και 4G αρχιτεκτονικές



3G

Σύνδεση με 2 παράλληλα δίκτυα: τηλεφωνικό και Διαδίκτυο (ξεκίνησε από το 2.5G)

4G-LTE



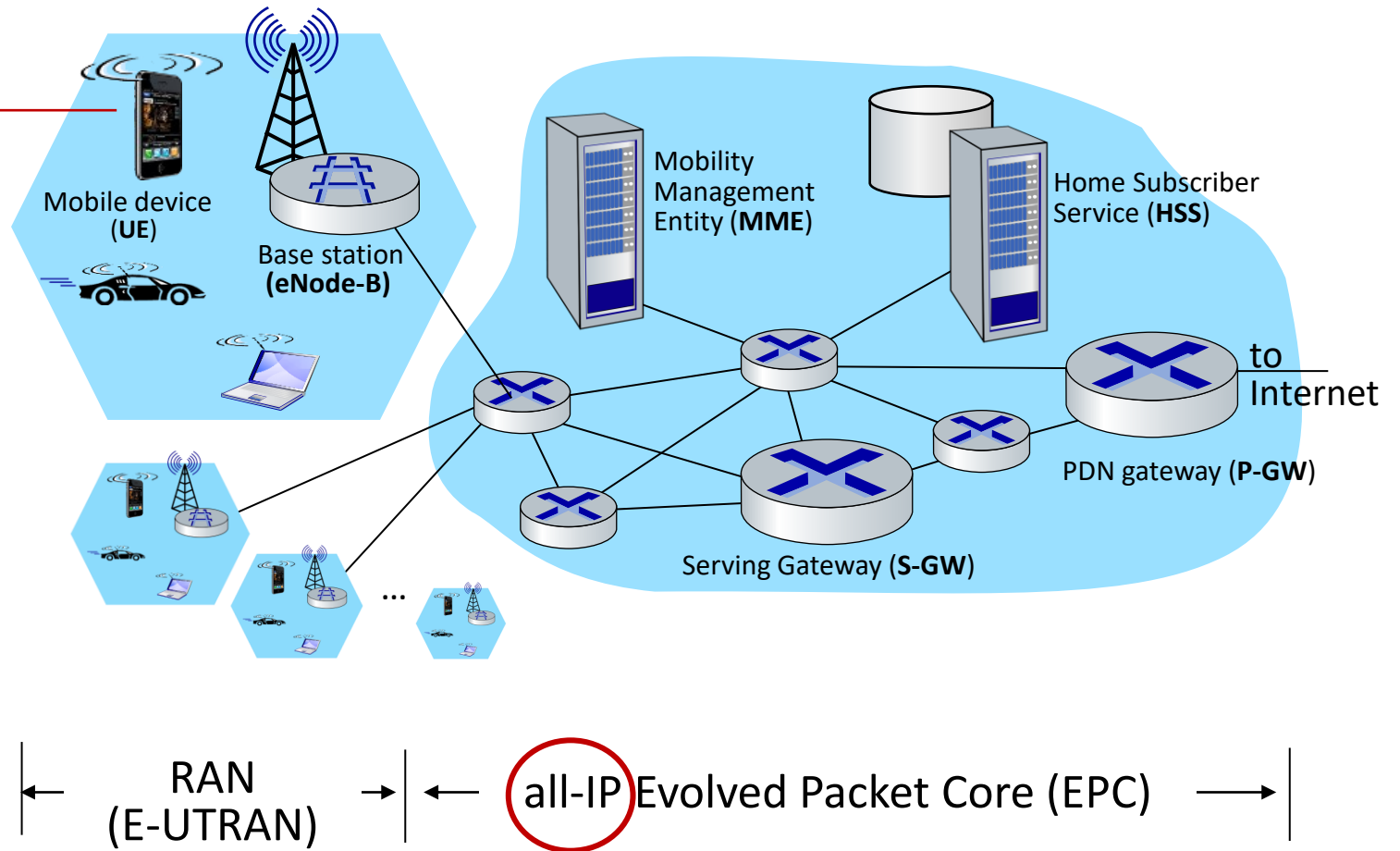
4G

Σύγκλιση δικτύων: δεν υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ δικτύου φωνής και δεδομένων – όλη η κίνηση μεταφέρεται μέσω του πυρήνα IP (με χρήση σηράγγων)

4G LTE αρχιτεκτονική

Κινητή συσκευή:

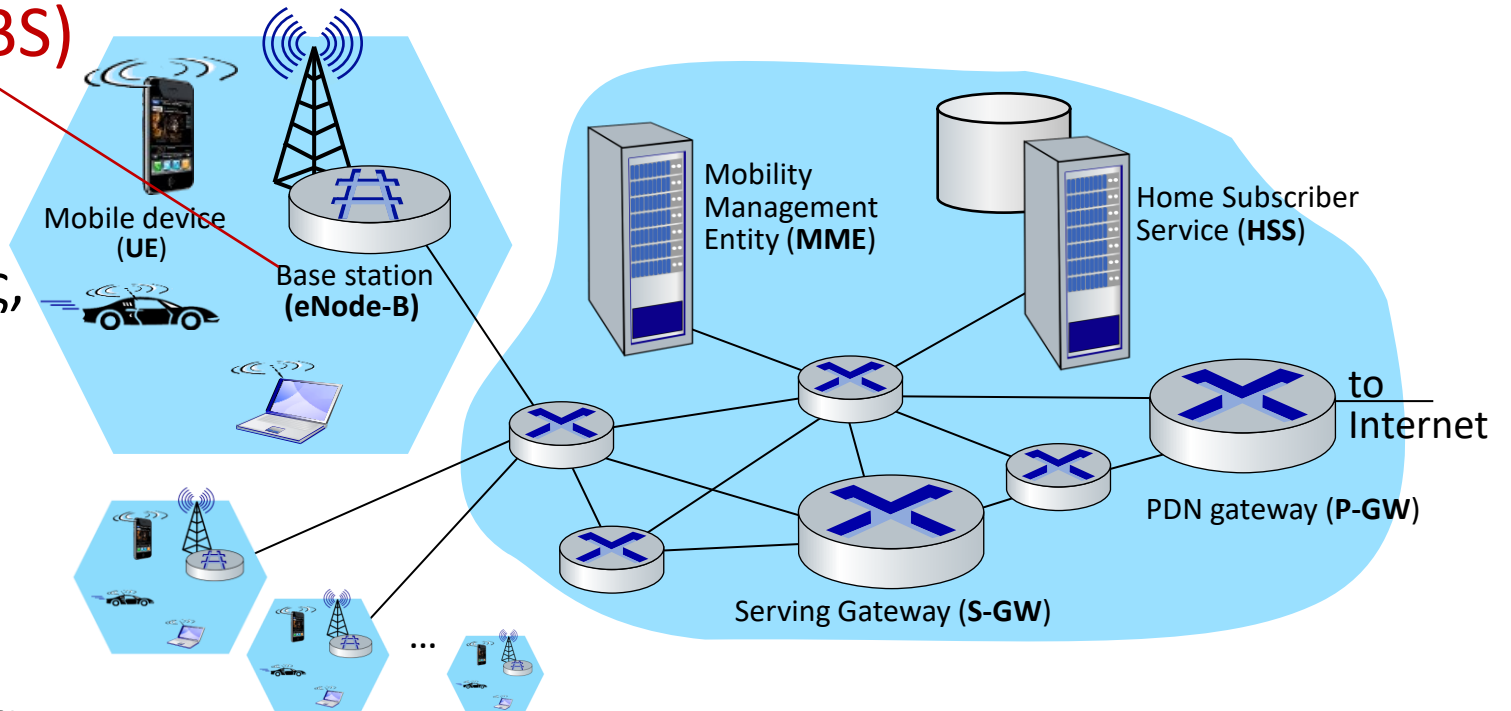
- smartphone, tablet, laptop, IoT, ... με 4G LTE radio
- Μοναδική ταυτότητα: 64-bit International Mobile Subscriber Identity (IMSI), αποθηκευμένη στην κάρτα SIM (Subscriber Identity Module)
- LTE ορολογία: εξοπλισμός χρήστη - User Equipment (UE)



4G LTE αρχιτεκτονική

Σταθμός βάσης (Base Station BS)

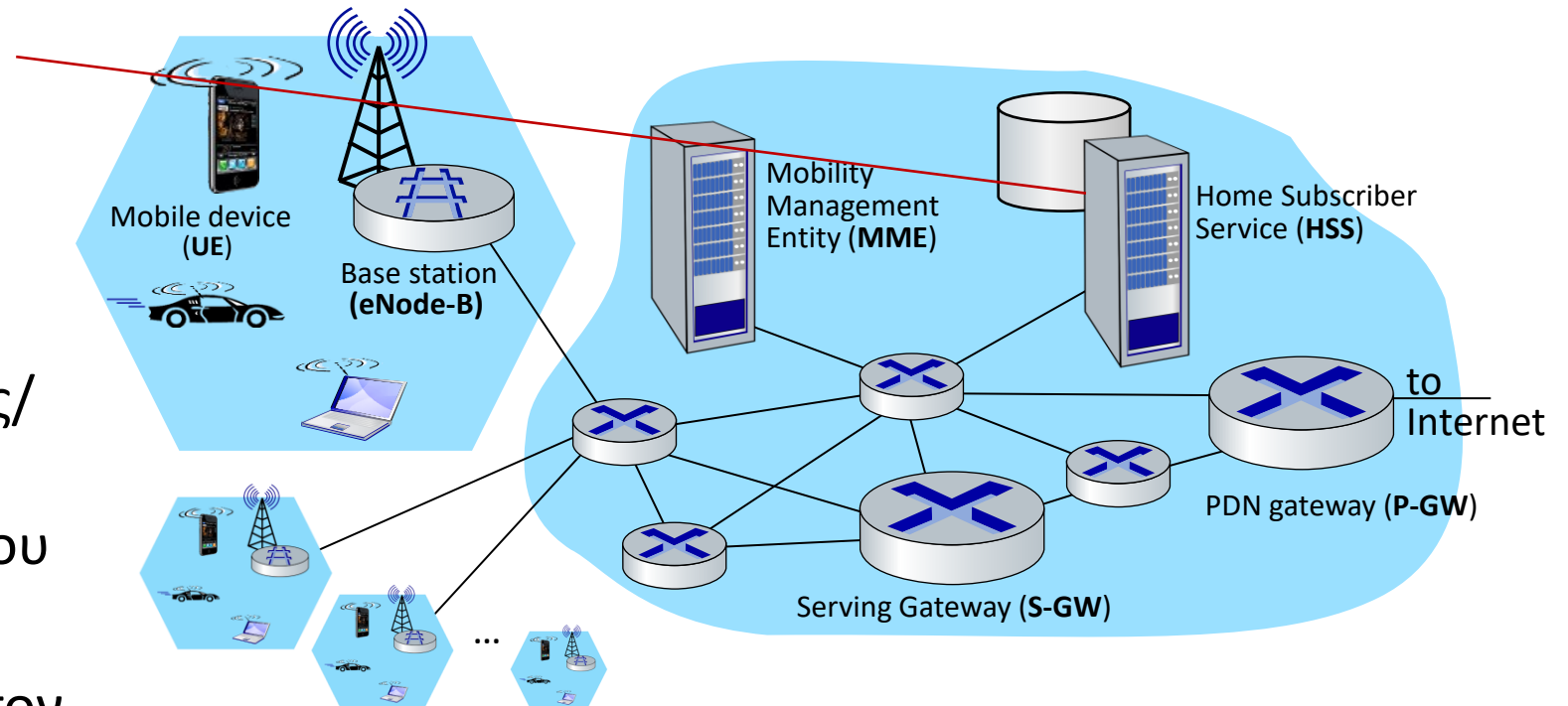
- τερματίζει το ασύρματα κανάλι - ξεκινάει το ενσύρματο δίκτυο
- διαχειρίζεται ασύρματους πόρους, φορητές συσκευές στην περιοχή κάλυψής του («κυψέλη»)
- συντονίζει τον έλεγχο ταυτότητας της συσκευής με το EPC
- παρόμοιο με το WiFi AP αλλά:
 - έχει ενεργό ρόλο στην κινητικότητα
 - συνομιλεί με κοντινούς σταθμούς βάσης για βελτιστοποίηση της επικοινωνίας
- LTE ορολογία: eNB (evolved NodeB), 3G: NodeB (node Bearer)



4G LTE αρχιτεκτονική

Εξυπηρετής οικείων συνδρομητών - Home Subscriber Server (HSS)

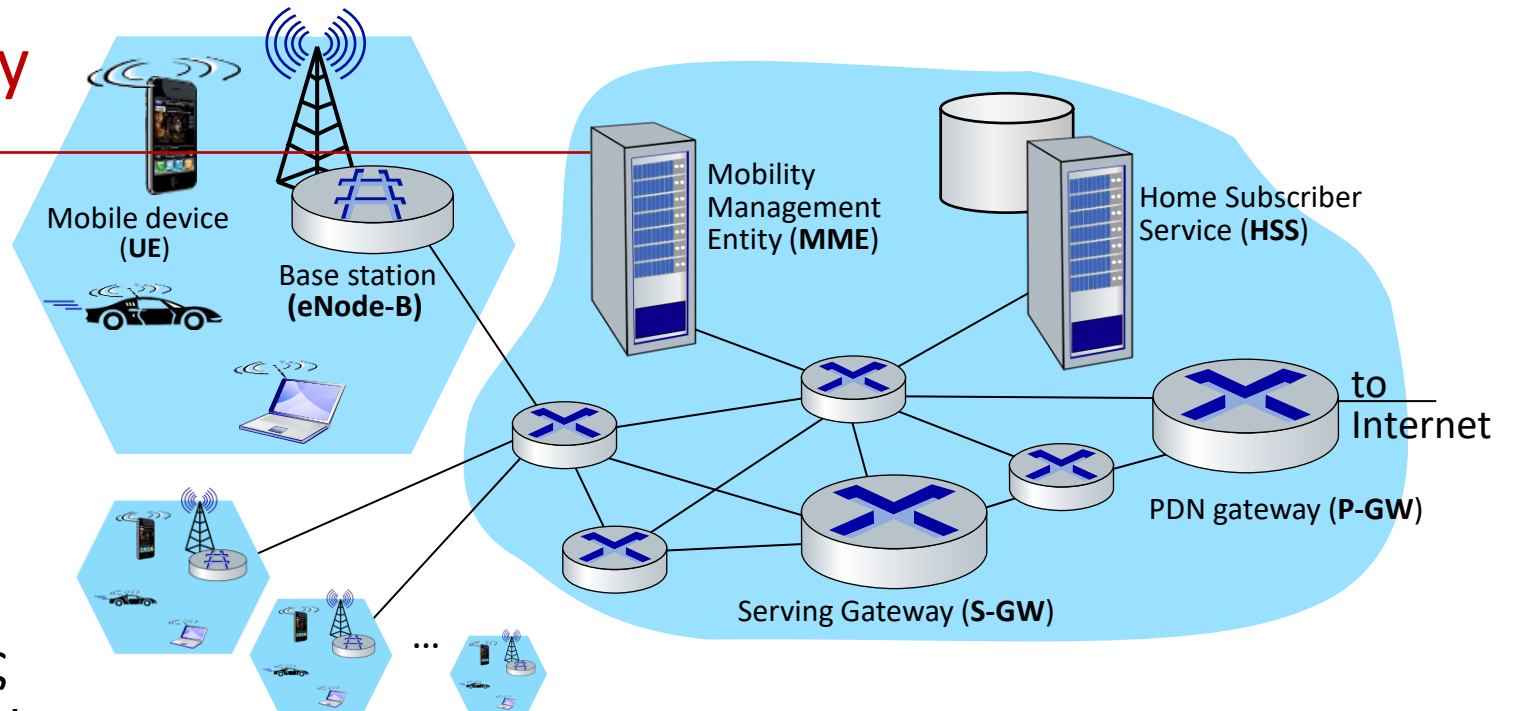
- αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με κινητές συσκευές/ συνδρομητές για τις/τους οποίες/οποίους το δίκτυο του HSS είναι "οικιακό"
- συνεργάζεται με το MME στον έλεγχο ταυτότητας συσκευής



4G LTE αρχιτεκτονική

Mobility Management Entity (MME)

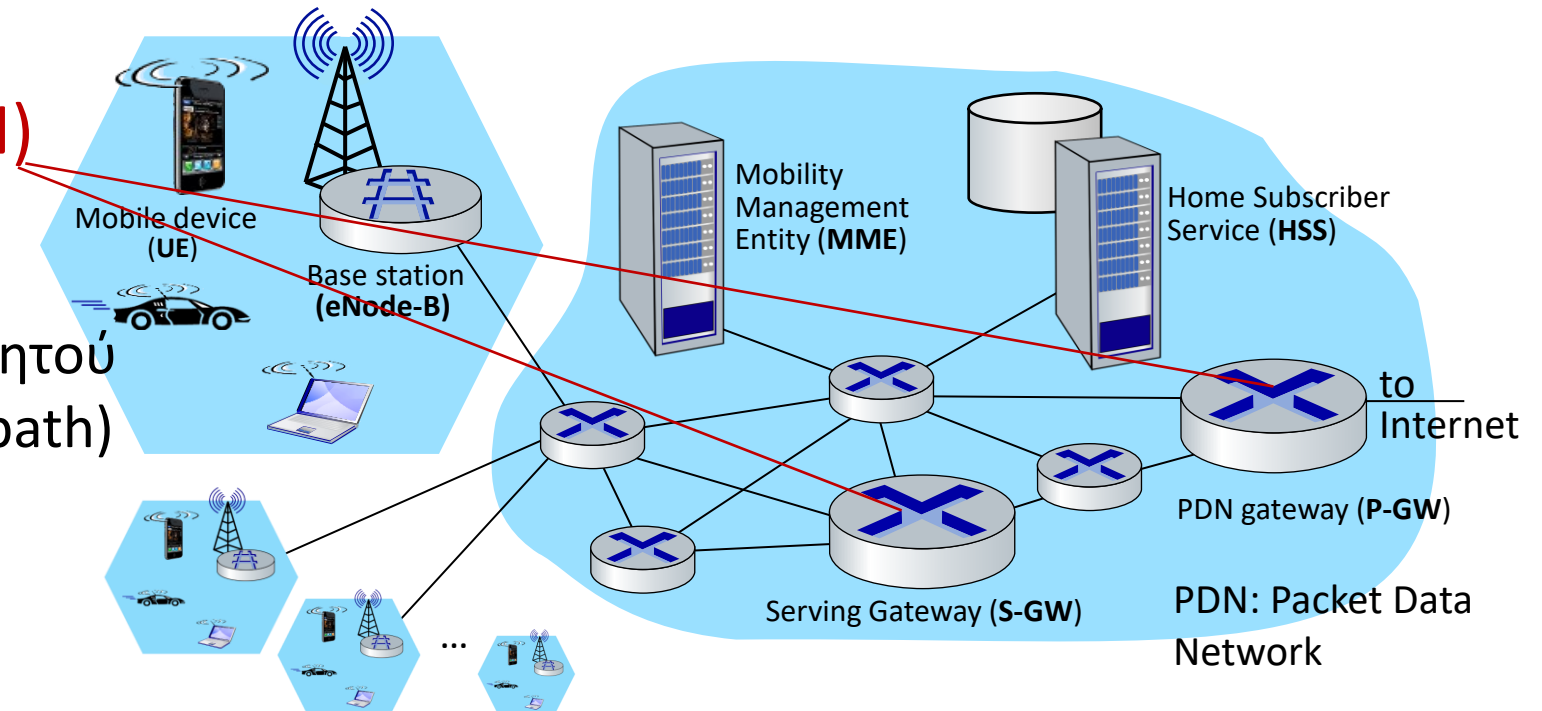
- αυθεντικοποίηση (συσκευή σε δίκτυο, δίκτυο σε συσκευή) σε συνεργασία με το HSS
- διαχείριση κινητικότητας:
 - μεταπομπή (handoff)
 - παρακολούθηση τοποθεσίας συσκευής, σελιδοποίηση (~ξύπνημα συσκευής για κλήση ή μήνυμα)
- ρύθμιση διαδρομής δεδομένων (σήραγγες) από κινητή συσκευή στο P-GW



4G LTE αρχιτεκτονική

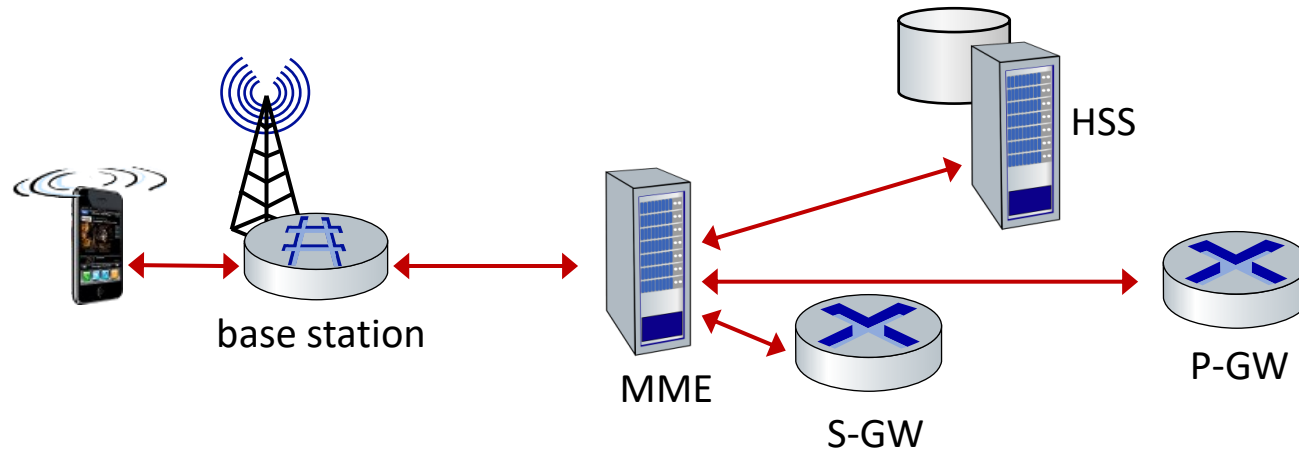
Serving Gateway (S-GW), Packet Data Network (PDN) Gateway (P-GW)

- στη διαδρομή δεδομένων κινητού – Διαδίκτυο (user plane datapath)
- S-GW
 - «άγκυρα» για μεταπομπές
- P-GW
 - πύλη του κυψελωτού δικτύου, σαν δρομολογητές πύλης Διαδικτύου
 - δίνει IP διευθύνσεις, NAT, firewall



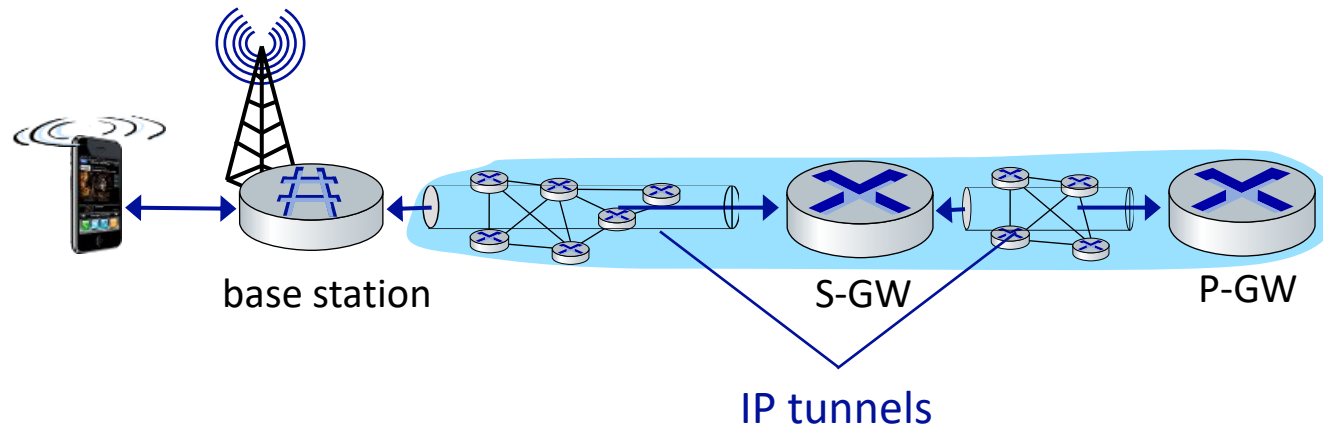
- Άλλοι δρομολογητές:
 - IP προώθηση (χρήση σήραγγας)

LTE: διαχωρισμός επιπέδου δεδομένων και ελέγχου



Επίπεδο ελέγχου (control plane)

- Νέα πρωτόκολλα για ασφάλεια, έλεγχο ταυτότητας, διαχείριση κινητικότητας



Επίπεδο δεδομένων (data plane)

- Νέα πρωτόκολλα στο επίπεδο ζεύξης (L2) και φυσικό επίπεδο (L1) στο ασύρματο τμήμα (RAN)
- Χρήση πρωτοκόλλων Διαδικτύου (TCP/IP) και εκτεταμένη χρήση σηράγγων στον πυρήνα

Κινητά Δίκτυα

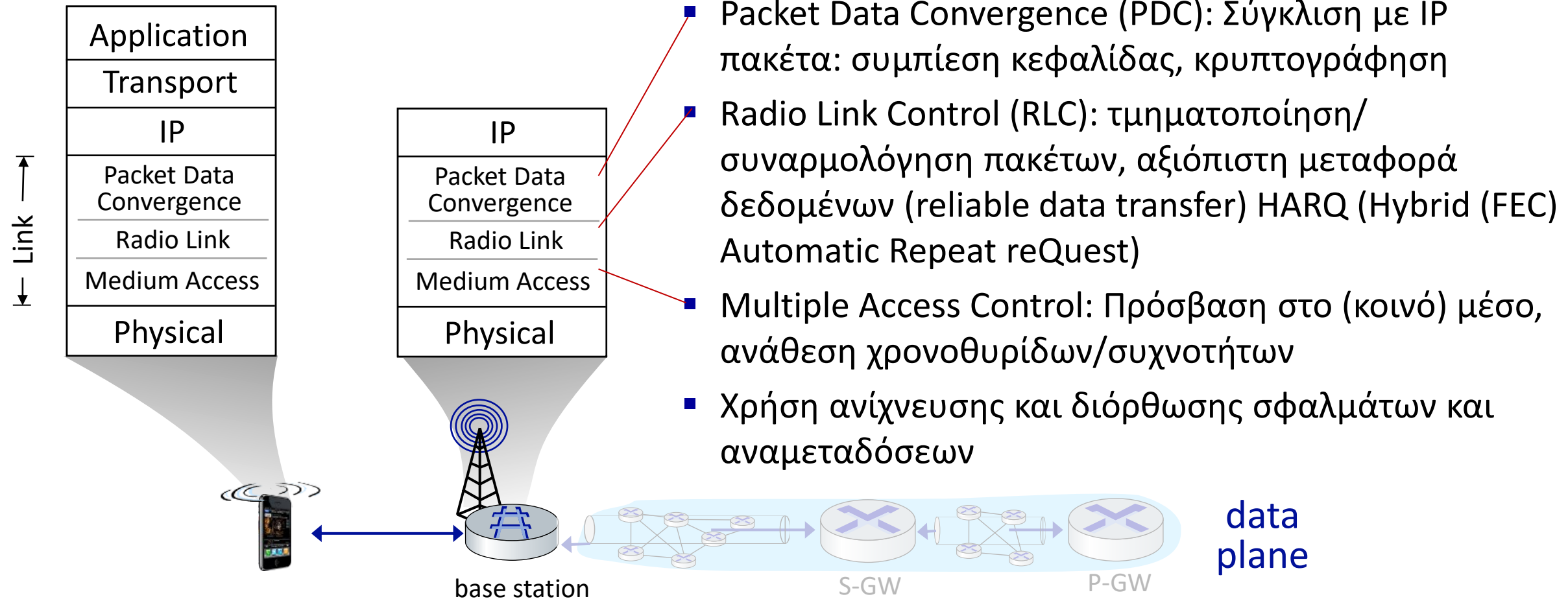
- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - **Radio Access Network (RAN)**
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing



LTE Radio Access Network (RAN)

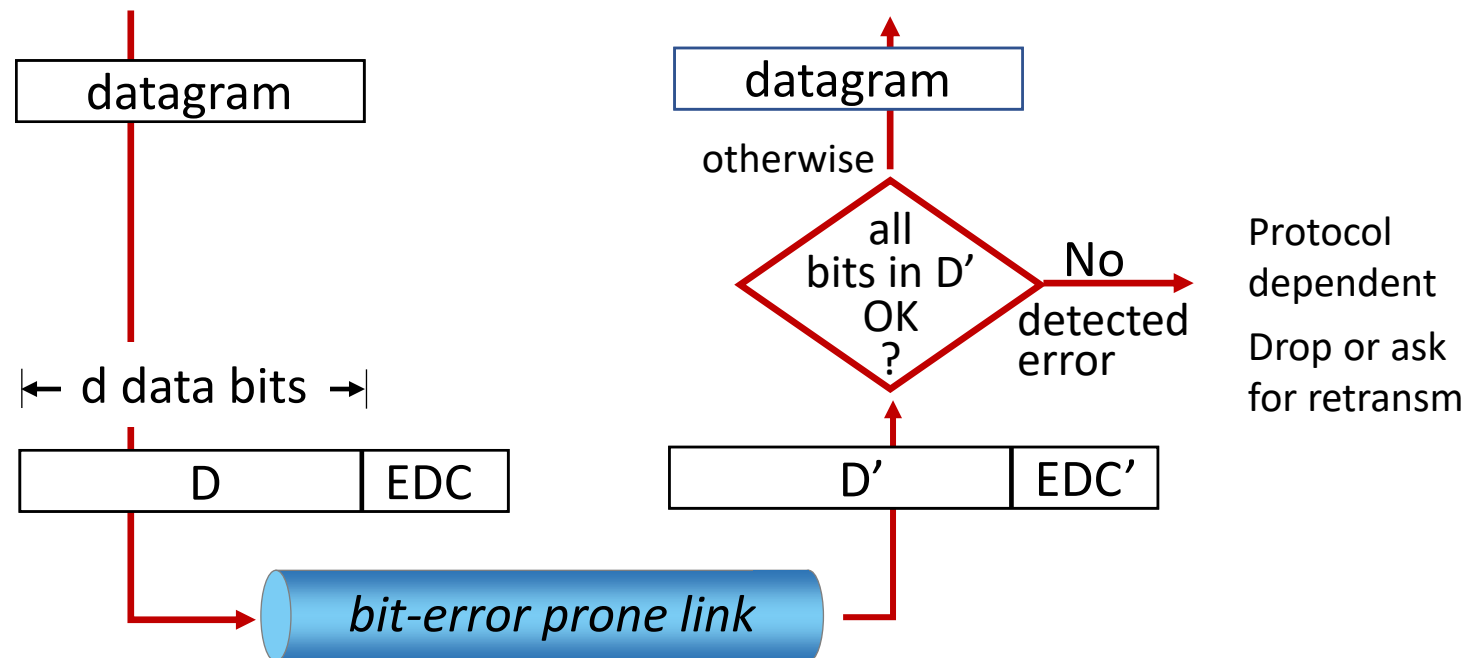
LTE πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης (link layer)



Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων

Κώδικες ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων (υπάρχουν κώδικες μόνο για ανίχνευση ή για ανίχνευση και διόρθωση /ονομάζεται Forward Error Correction - FEC)
Είσοδος D: τα δεδομένα που προστατεύονται από τον έλεγχο σφαλμάτων (ενδέχεται να περιλαμβάνουν πεδία της κεφαλίδας του πλαισίου)

EDC: error detection code bits – επιπλέον bits (πλεονασμός - redundancy)



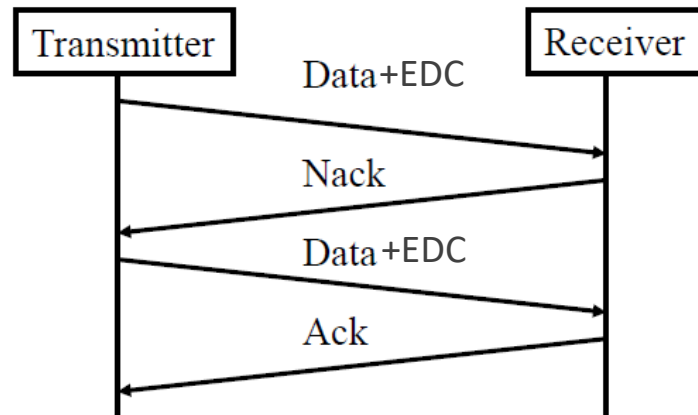
Η ανίχνευση σφαλμάτων δεν είναι 100% αξιόπιστη!

- το πρωτόκολλο μπορεί να «χάσει» μερικά σφάλματα (σπάνια)
- μεγαλύτερο πεδίο EDC οδηγεί σε καλύτερη ανίχνευση και διόρθωση

Αναμεταδόσεις Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ)

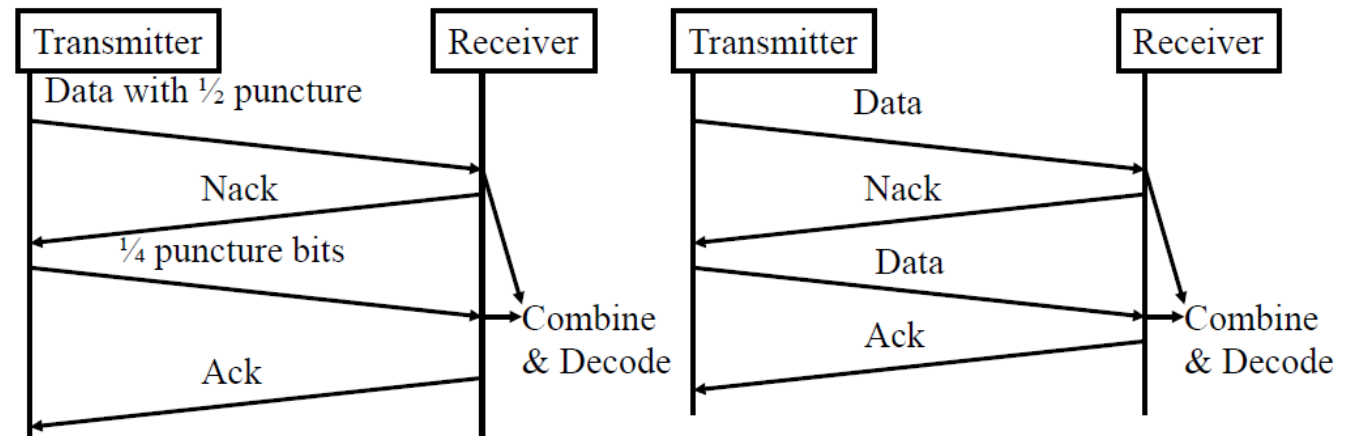
ARQ

- Μηχανισμός επαναμετάδοσης εάν ληφθεί με σφάλμα (στη συγκεκριμένη περίπτωση στην ασύρματη ζεύξη)
- Η πηγή στέλνει επιπλέον error detection code (EDC) bits για έλεγχο λαθών (π.χ. wifi + cyclic redundancy check - CRC)
- Σε περίπτωση λάθους τα προηγούμενα (εσφαλμένα) δεδομένα απορρίπτονται και ζητείται από την πηγή να επαναμεταδώσει

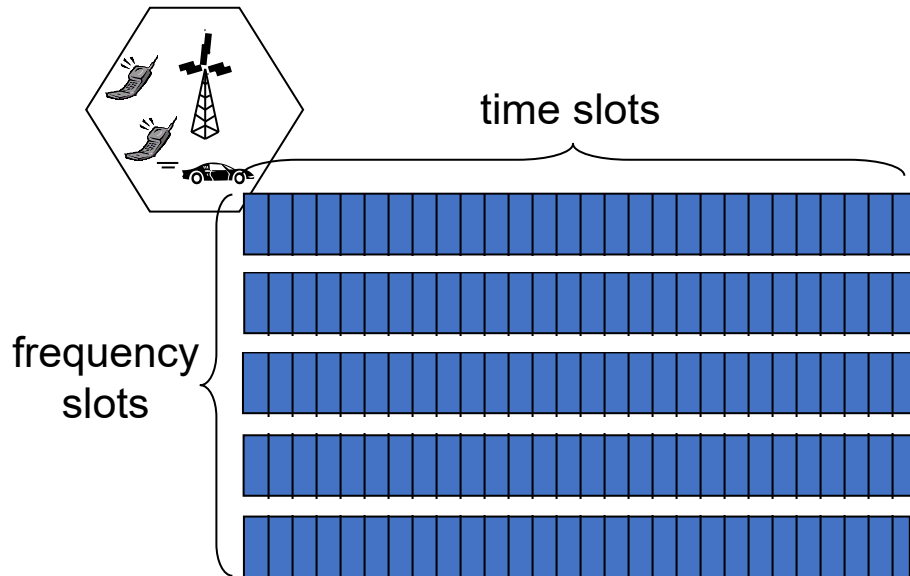
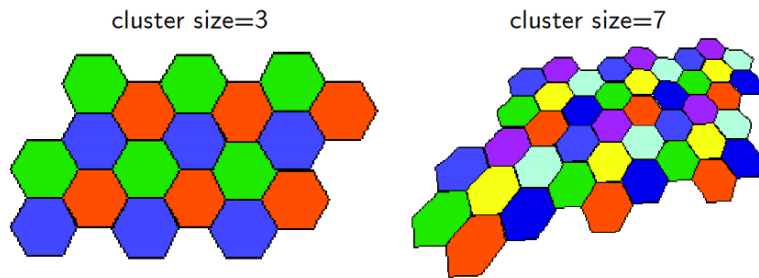


HARQ

- PHY (FEC) & MAC layers work together → Hybrid
- Forward Error Correction (FEC): επιπλέον bits για έλεγχο και διόρθωση
- Incremental Redundancy or Type II HARQ
 - Η πηγή στέλνει μέρος των FEC bits ('puncturing')
 - Αν γίνει σφάλμα η πηγή στέλνει επιπλέον FEC bits (χωρίς δεδομένα), ώσπου να γίνει σωστή παραλαβή
- Chase Combining or Type I HARQ
 - Η πηγή ξαναστέλνει τα δεδομένα και ο δέκτης τα συνδυάζει (με τα προηγούμενα)



LTE RAN: ανάθεση χωρητικότητας



- **Κυψέλη:** έχει συγκεκριμένο 'κανάλι' / μέρος φάσματος
 - Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στις κυψέλες
- **Downlink (DL):** OFDM - ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM) + TDM
 - "ορθογώνια": ελάχιστη παρεμβολή μεταξύ υποκαναλιών (subcarriers)
- **Uplink (UL):** SC-FDMA (παρόμοιο με OFDM) + TDM
- Διάκριση UL/DL: διαφορετικές συχνότητες UL/ DL (frequency division duplex - FDD) ή διαφορετικός χρόνος μετάδοσης (time division duplex - TDD)
- Επιλογή διαμόρφωσης (mod. format) με βάση το SNR
- Τα παραπάνω ορίζονται από 3GPP – πρότυπα, ο αλγόριθμος ανάθεσης δεν είναι τυποποιημένος – vendor specific

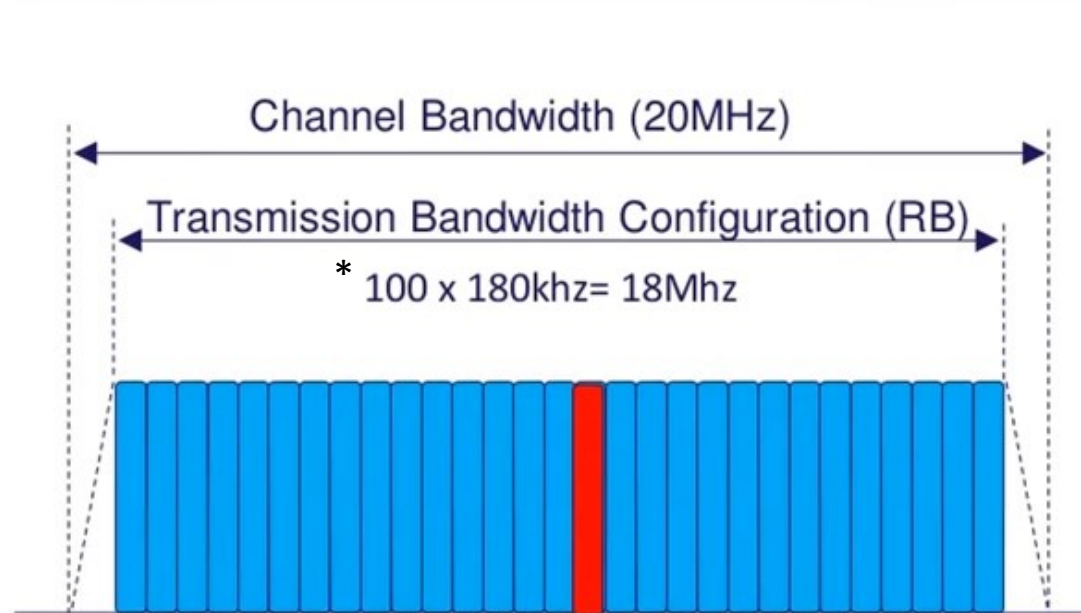
LTE φάσμα καναλιού

Το φάσμα του καναλιού χωρίζεται σε υποκανάλια (subcarriers)

Resource Block (RB): μονάδα (unit) ανάθεσης πόρων (υποκαναλιών φάσματος και χρονοθυρίδων) στα κινητά

Εδώ βλέπουμε μόνο το φάσμα

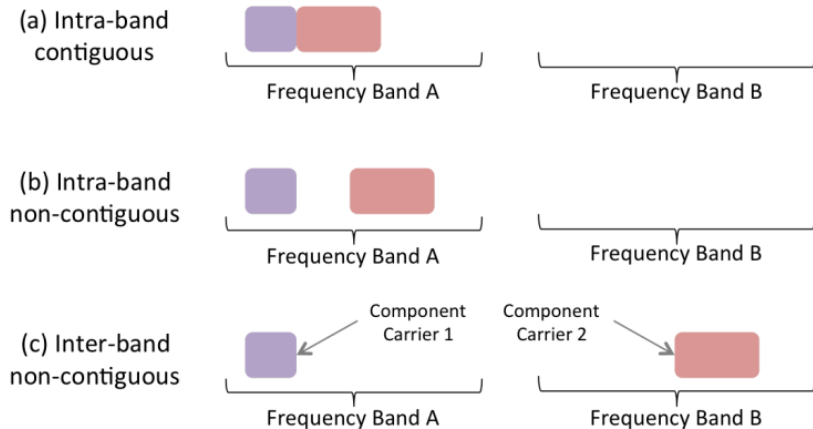
Channel Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Transmission Bandwidth Config. (RB)	6	15	25	50	75	100*
Number of Subcarriers	72	180	300	600	900	1200
Occupied Bandwidth (MHz)	1.08	2.7	4.5	9.0	13.5	18.0



* 100 Resource Blocks (RB), each RB has 12 subcarriers, each subcarrier is 15 KHz, so each RB has 180 KHz

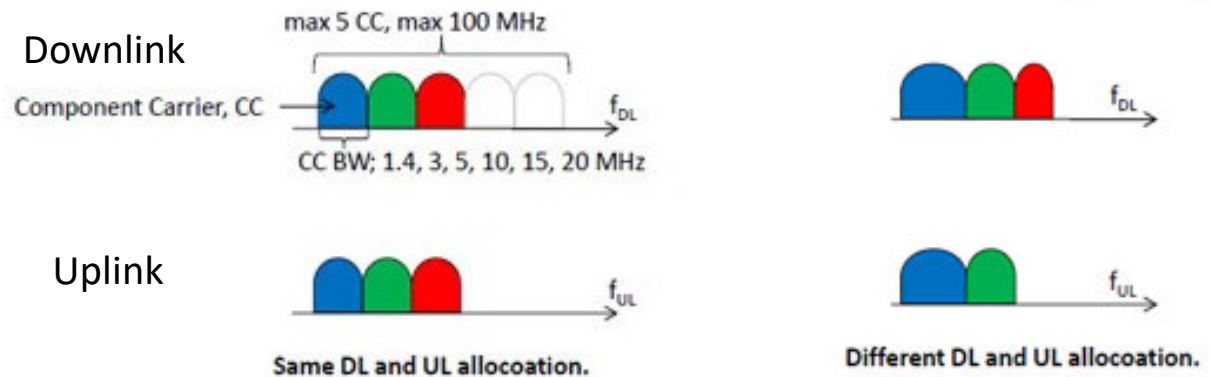
Carrier Aggregation (CA)

LTE Carrier Aggregation Examples



- CA introduced in LTE Advanced (3GPP Rel 10) with 5 Carrier Components (CC)
 - Max BW (assuming CC of 20 MHz) = 100 MHz
- LTE Advanced – PRO supports 32 CCs

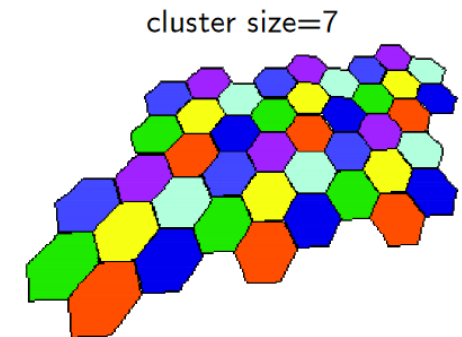
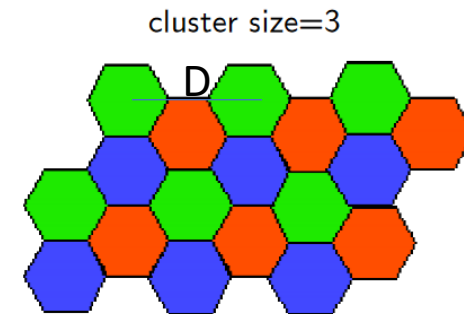
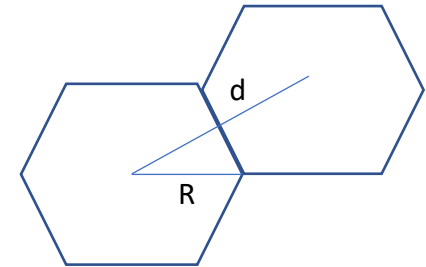
Can have different CA for Uplink (UL) and Downlink (DL)



Κυψέλες - επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων καναλιού ~ space division multiplexing (SDM)

- D = (interference / reuse) distance between centers of cells that use the same channel
- R = radius of a cell
- d = distance between centers of adjacent cells ($d = R\sqrt{3}$)
- N = number of cells in repetitious pattern (**cluster size**)
 - Number of frequency channels (each cell in pattern uses a unique channel)
- Hexagonal cell pattern, for different values of N
 - $N = I^2 + J^2 + (I \times J)$, $I, J = 0, 1, 2, 3, \dots$
 - Possible values of N are 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, ...
- Interference/reuse distance $D = R \sqrt{3N} = d \sqrt{N}$

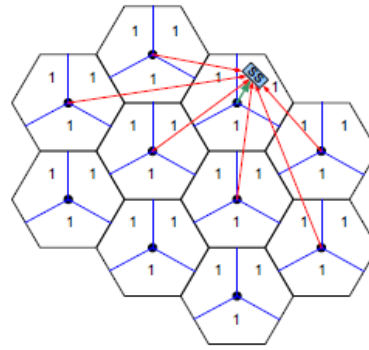


Κυψέλες με τμήματα

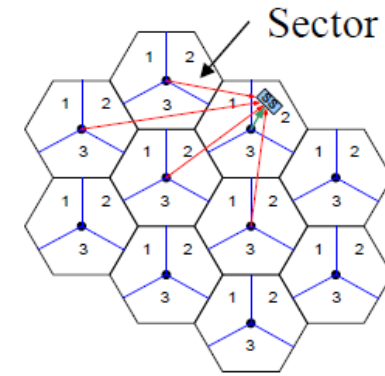
Χρησιμοποιούνται στην πράξη

- $N \times S \times K$ frequency reuse pattern
- N = Number of cells per cluster
- S = Number of sectors in a cell
- K = Number of frequency allocations per cell

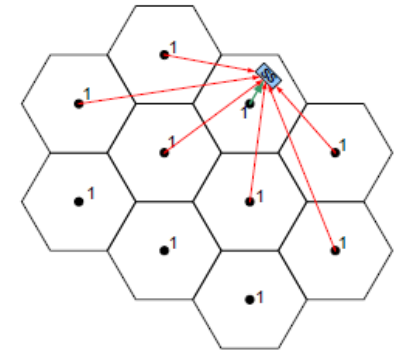
1x3x1



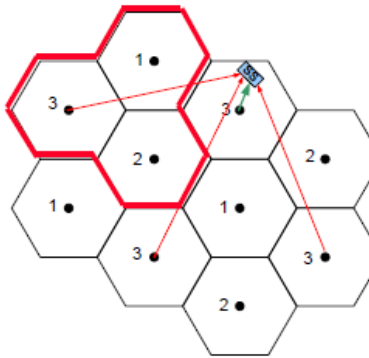
1x3x3



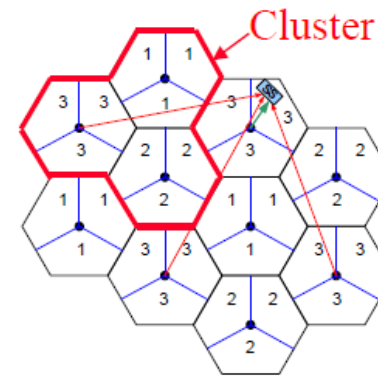
1x1x1



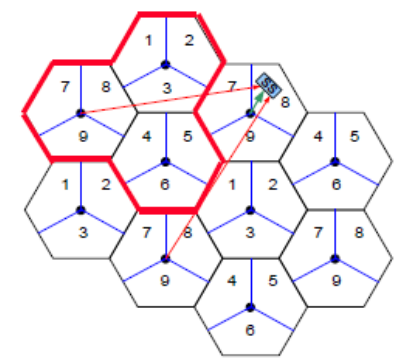
3x1x1



3x3x1

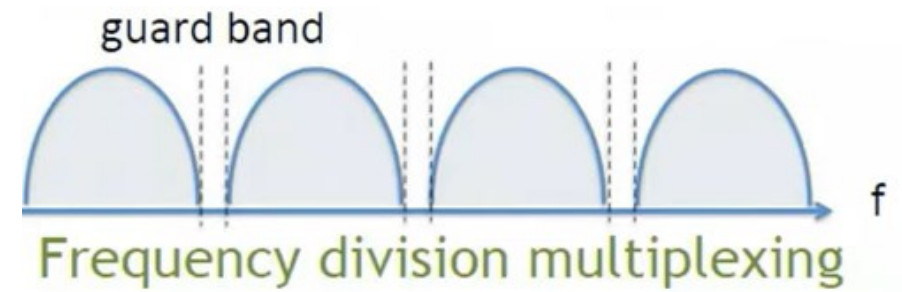


3x3x3

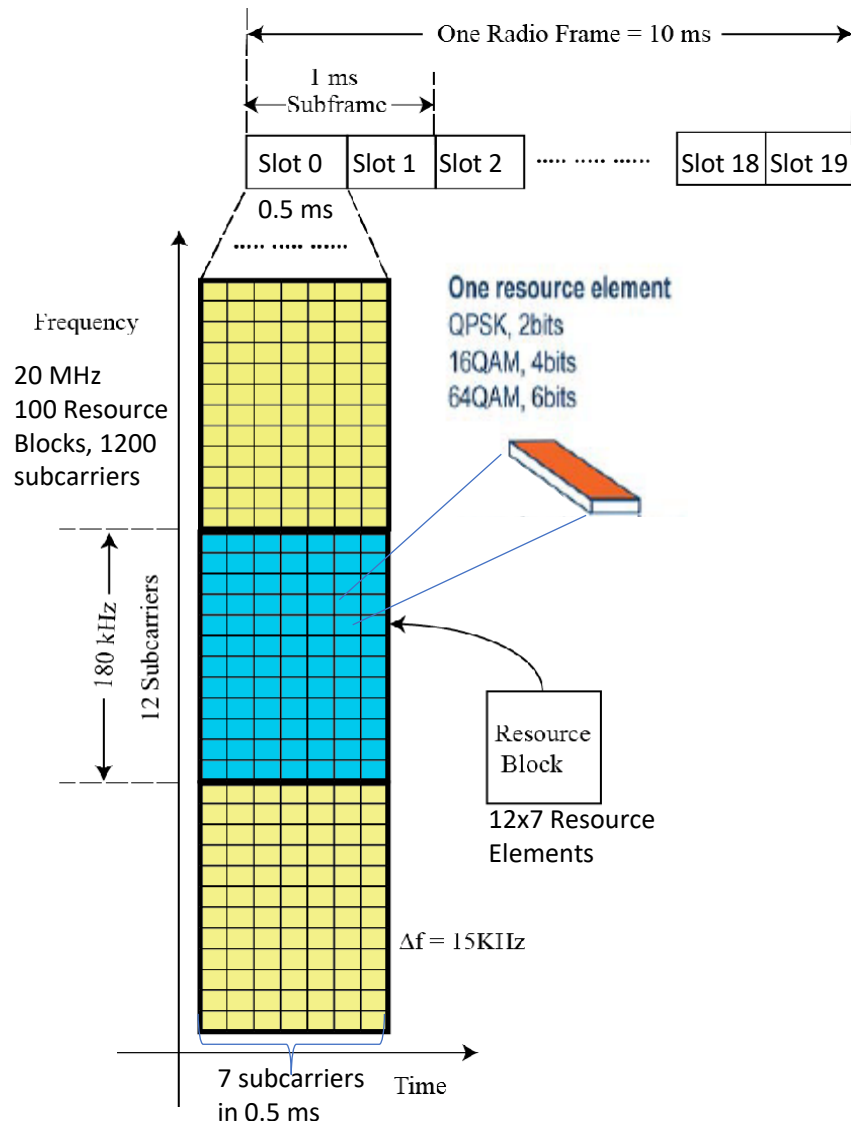


FDM vs OFDM

- FDM χρειάζεται προστατευτικές ζώνες συχνότητας (frequency guardband) μεταξύ των υποκαναλιών
- OFDM: ορθογώνια υποκανάλια (στην κορυφή ενός υποκαναλιού όλα τα άλλα συνεισφέρουν 0)
 - Μείωση του φάσματος, ανθεκτικότητα έναντι της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών, εύκολη εκτίμηση καναλιών και εξισορρόπηση παρεμβολών
- 4G (&5G): downlink=OFDM, uplink=SC-FDMA
 - OFDM: χρειάζεται ισχυρό ενισχυτή (έχει μεγάλο λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ/ peak-to-average power ratio), εύκολο στον σταθμός βάσης όπου η ισχύς είναι άφθονη
 - SC-FDMA: συνδυάζει low peak to average ratio που έχουν τα single-carrier systems με τα οφέλη του OFDM, αλλά έχει λίγο μικρότερη αποδοτικότητα από το OFDM

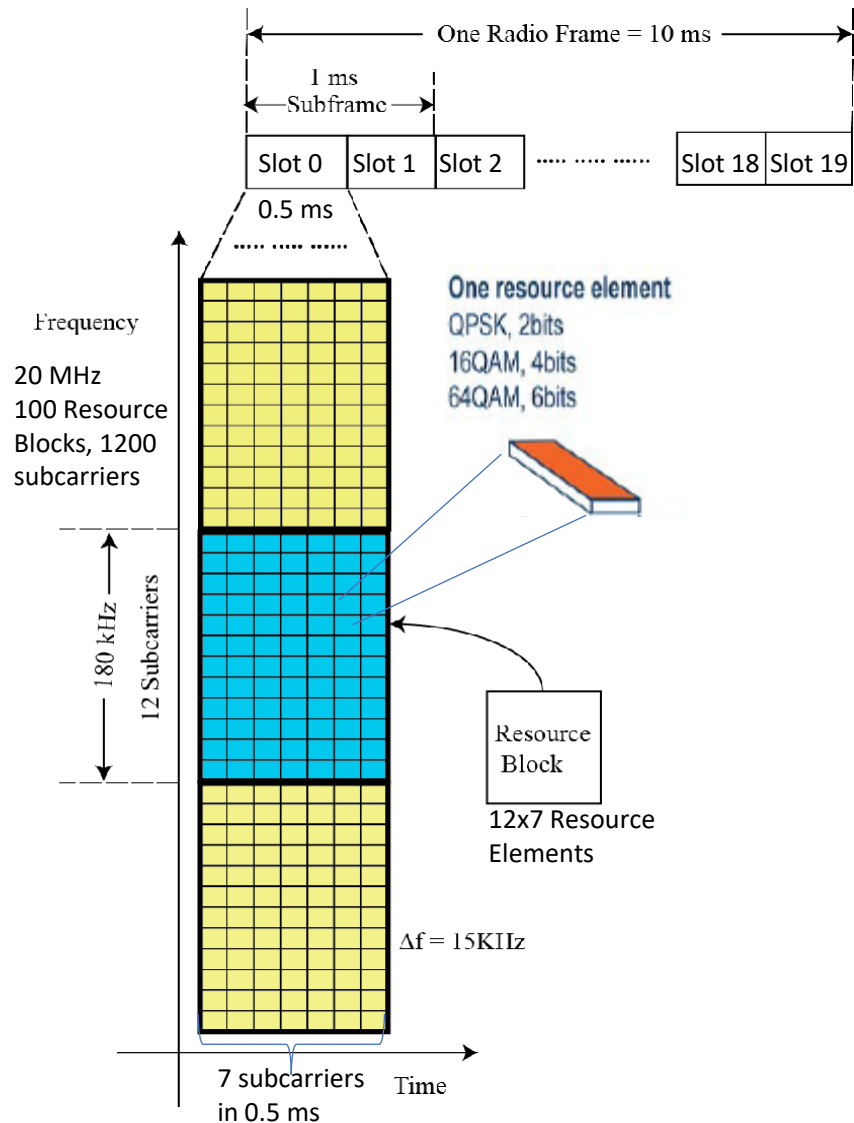


LTE ανάθεση χωρητικότητας – Freq & Time



- Το φάσμα του καναλιού (π.χ. 20 MHz) διαμοιράζεται σε υποκανάλια (subcarriers) 15 KHz
 - $(20\text{ MHz} - \text{edge guardband})/15\text{ KHz} = 1200\text{ subcarriers}$
 - 12 υποκανάλια αποτελούν μια ομάδα = 180 KHz
- Χρόνος: Radio frame=10 ms, subframe= 1ms, slot=0.5 ms
- Αλλάζουμε το 'σύμβολο' ενός subcarrier 7 φορές κάθε slot
 - Σαν να έχουμε 7 subslots και στο καθένα στέλνουμε διαφορετικά δεδομένα
- Resource Element (RE): 1 subcarrier για 1/7 slot
- Διαμόρφωση: Στο LTE κάθε RE μπορεί να έχει σήμα: QPSK (2 bits), 16QAM (4 bits), 64QAM (6 bits)
 - Βάση εκτίμησης της ποιότητας του καναλιού UE-BS
- Βασική μονάδα ανάθεσης: Resource Block (RB)
Resource Block (RB): 12 subcarriers x 1 slot = 12 x 7 RE
Χωρητικότητα 1 RB: $12 \times 7 \times 6\text{bits}(64\text{QAM})/0.5\text{ ms} = 1\text{ Mb/s}$

LTE ανάθεση χωρητικότητας - Freq & Time

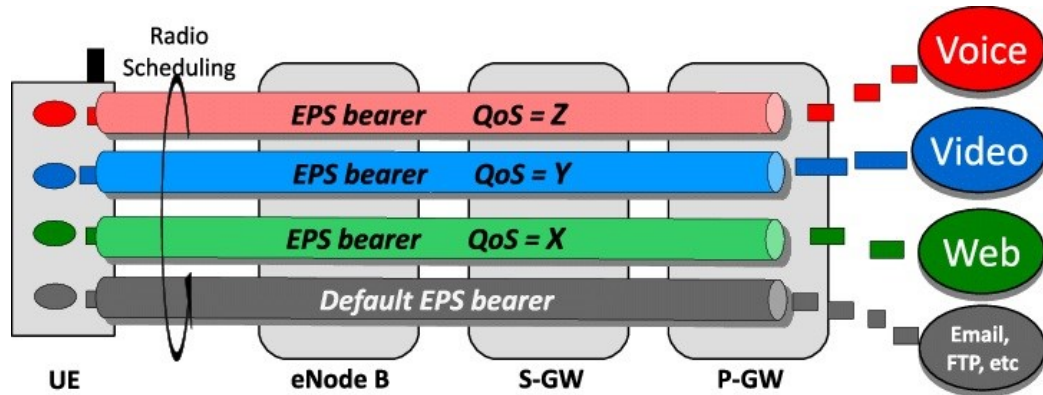


- Resource Block (RB) = 1 Mb/s
- Για 20 MHz φάσμα καναλιού: 100 RB
Συνολική χωρητικότητα για 20 MHz: 100 Mb/s
- Κάποια RB είναι δεσμευμένα για έλεγχο (uplink RB allocation, Synchronization, Cell Search, Channel State Information (CSI) Reporting, uplink Random Access, paging, broadcast, handover)
- Αύξηση χωρητικότητας με MIMO, higher QAM, carrier aggregation (multiple channels)
 - LTE advanced: 256QAM, carrier aggregation (up to 5 channels), 8x8 MIMO (4x4 in LTE)
- Αλγόριθμος ανάθεσης – τρέχει στο Base Station - not in the standard – “secret sauce” of vendor

LTE ανάθεση χωρητικότητας – Uplink (UL)

- SC-FDMA (παρόμοιο με το OFDM που χρησιμοποιείται στο downlink)
 - Pros: controls peak-to-average power ratio of signal (crucial for battery life)
 - Cons: slightly less efficient (needs time guardbands)
- BS scheduler αναθέτει uplink (UL) RBs στα UEs (διάφορες παραλλαγές): semi-persistent scheduling, UE ενημερώνει για τα δεδομένα που έχει με Buffer Status Reports (BFS), UE ζητάει RBs (Scheduling Request - SR)
 - Scheduling Request το UE χρησιμοποιεί τα Physical Uplink Control Channel -PUCCH (συγκεκριμένα RBs/UL frame) για να ζητήσει RB
 - Αν δεν έχει PUCCH τότε χρησιμοποιεί το Random Access Channel (RACH)
 - Random access: πιθανές συγκρούσεις, αν δεν υπάρχει σύγκρουση το BS στέλνει ACK, διαφορετικά το UE πάει σε random backoff
 - Το RACH χρησιμοποιείται και όταν το κινητό ξεκινάει ή όταν έχει παραμείνει ανενεργό για πολύ χρόνο
- BS μεταφέρει στα Physical Downlink Control Channels (PDCCHs) (συγκεκριμένα RBs/DL frame) την πληροφορία ανάθεσης UL RBs στα UEs
- Τα UEs χρειάζεται συγχρονισμό για να μεταδώσουν UL
 - Μαζί με την ανάθεση RBs το BS παρέχει και το timing advance- TA (έχοντας μετρήσει την καθυστέρηση UE-BS)
 - The BS μετράει τον RTT/TA χρόνο στην αρχικοποίηση RACH, μετά συνεχίζει να μετράει περιοδικά το RTT / TA

4G Quality of Service (QoS) Classes



- Evolved Packet System (EPS) bearer: η λογική σύνδεση μεταξύ του User Equipment (UE) και του Evolved Packet Core (EPC)
- Κάθε UE μπορεί να έχει πολλά EPS bearers
- Το 4G υλοποιεί διάφορες κλάσεις ποιότητας υπηρεσία (QoS Class Identifier - QCI) και κάθε EPS bearer ανήκει σε μια κλάση

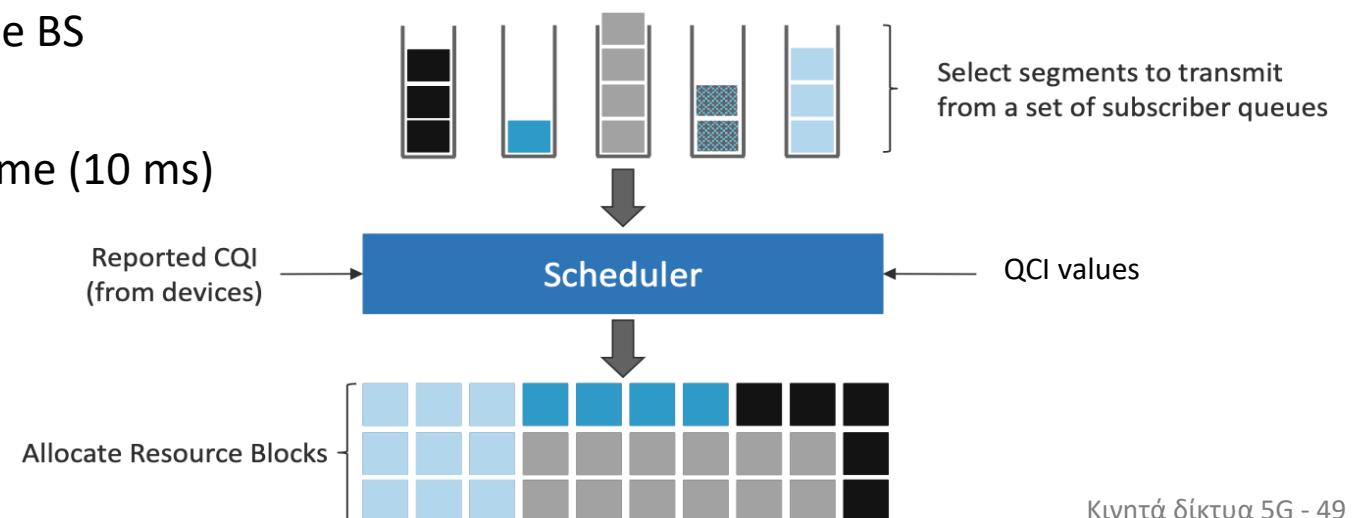
(3GPP -23.203 Table 6.1.7: Standardized QCI characteristics : Release 8)

QCI	Resource Type	Priority	Packet Delay Budget (NOTE 1)	Packet Error Loss Rate (NOTE 2)	Example Services	
1 (NOTE 3)	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Conversational Voice	
2 (NOTE 3)		4	150 ms	10^{-3}	Conversational Video (Live Streaming)	
3 (NOTE 3)		3	50 ms	10^{-3}	Real Time Gaming	
4 (NOTE 3)		5	300 ms	10^{-6}	Non-Conversational Video (Buffered Streaming)	
5 (NOTE 3)	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	IMS Signalling	
6 (NOTE 4)		6	300 ms	10^{-6}	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)	
7 (NOTE 3)		7	100 ms	10^{-3}	Voice, Video (Live Streaming) Interactive Gaming	
8 (NOTE 5)		8	9	300 ms	10^{-6}	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
9 (NOTE 6)						

GBR = Guaranteed Bit Rate

RAN Scheduler

- Allocation of RBs (RB: frequency block and timeslot) to bearers for DL and UL (DL is easier, focus on UL)
- Input: Channel Quality Indicator (CQI) + QoS Class Identifier (QCI) + (estimated) UE queue size
 - Channel Quality Indicator (CQI)
 - UL: BS measures the SNR (DL: UE sends a CQI report to BS periodically e.g., msec, with observed SNR)
 - The BS uses this to select modulation format
 - QoS Class Identifier (QCI): each flow (EPS bearer) has a QCI value (maps to specific QoS requirements)
 - Traffic demand estimation varies according to vendor and specific network deployment
 - Buffer Status Reports: UEs periodically informs BS about its buffer size
 - UEs can send explicit requests to the BS
- Scheduling algorithm: vendor specific
- Output: allocated RBs, e.g. for next Radio Frame (10 ms)



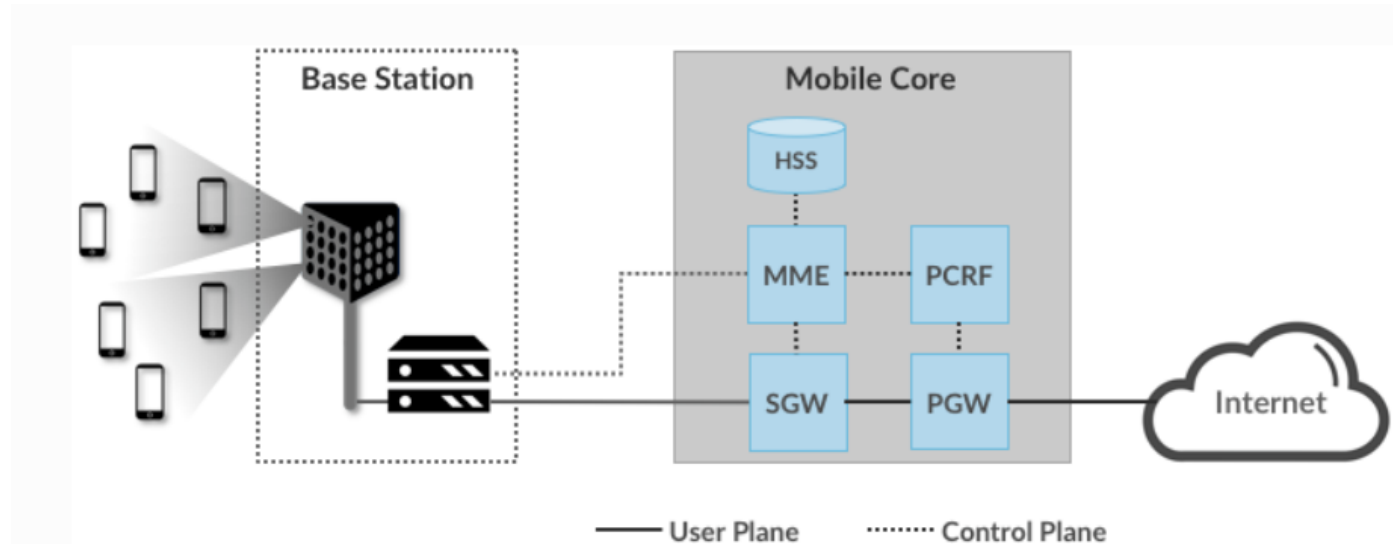
Κινητά Δίκτυα

- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing



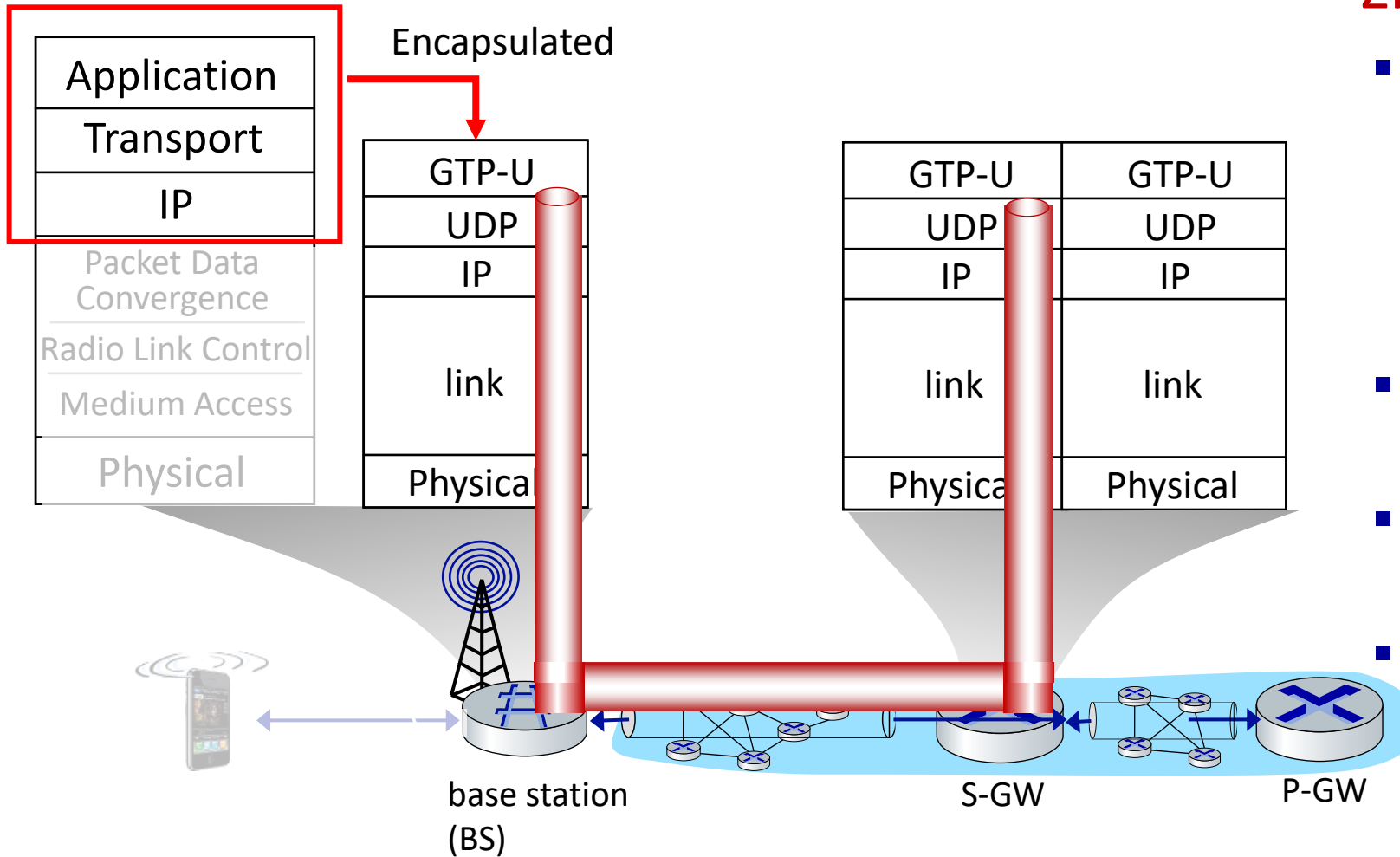
Evolved Packet Core



Διαχωρισμός
control plane - data plane

- MME (Mobility Management Entity -MME):
 - Καταγράφει και διαχειρίζεται την κινητικότητα, παρακολουθεί τοποθεσία, εκτελεί σελιδοποίηση, μεταπομπές και περιαγωγή
 - Υποστηρίζει λειτουργίες επιπέδου ελέγχου για διαχείριση συνεδριών στον πυρήνα, ρύθμιση data plane
- HSS (Home Subscriber Server): Βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για τους συνδρομητές και υπηρεσίες
- PCRF (Policy & Charging Rules Function): Εφαρμόζει πολιτικές QoS και καταγράφει δεδομένα χρέωσης των συνδρομητών
- SGW (Serving Gateway): Προωθεί πακέτα IP από και προς το RAN. Αποτελεί την άγκυρα (σταθερό σημείο) σε μεταπομπή
- PGW (Packet Gateway): δρομολογητής-πύλη του EPC, συνδέει το δίκτυο κινητής με Διαδίκτυο, δίνει IP διευθύνσεις, NAT, firewall

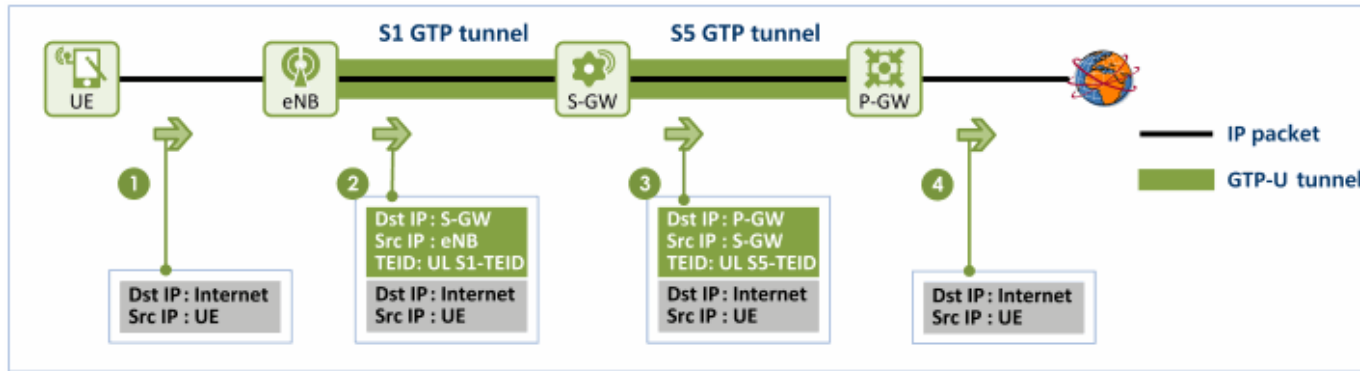
LTE επίπεδο δεδομένων: packet core



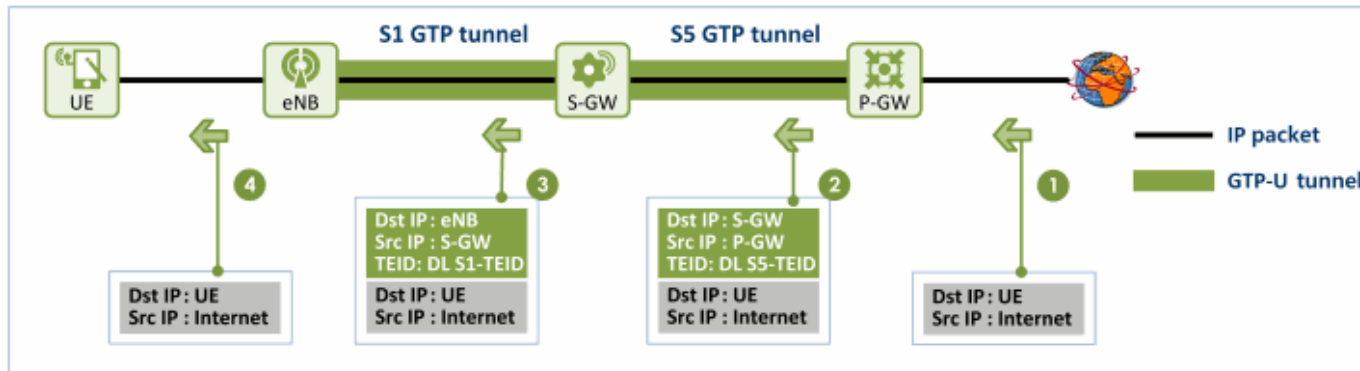
Σήραγγες (tunnels):

- BS: ενθυλακώνει το datagram του κινητού με χρήση **G**PRS (General Packet Radio Service) **T**unneling **P**rotocol (GTP) μέσα σε UDP και το αποστέλλει στο S-GW
- Σήραγγα BS → S-GW: IP source addr: BS, IP dest addr: S-GW
- Το S-GW προωθεί με σήραγγα τα datagrams στο P-GW
- **Εύκολη υποστήριξη κινητικότητας:** μόνο το τελικό σημείο της σήραγγας (BS) αλλάζει όταν μετακινείται το κινητό

LTE packet core: ενθυλάκωση



(a) from the UE to the Internet

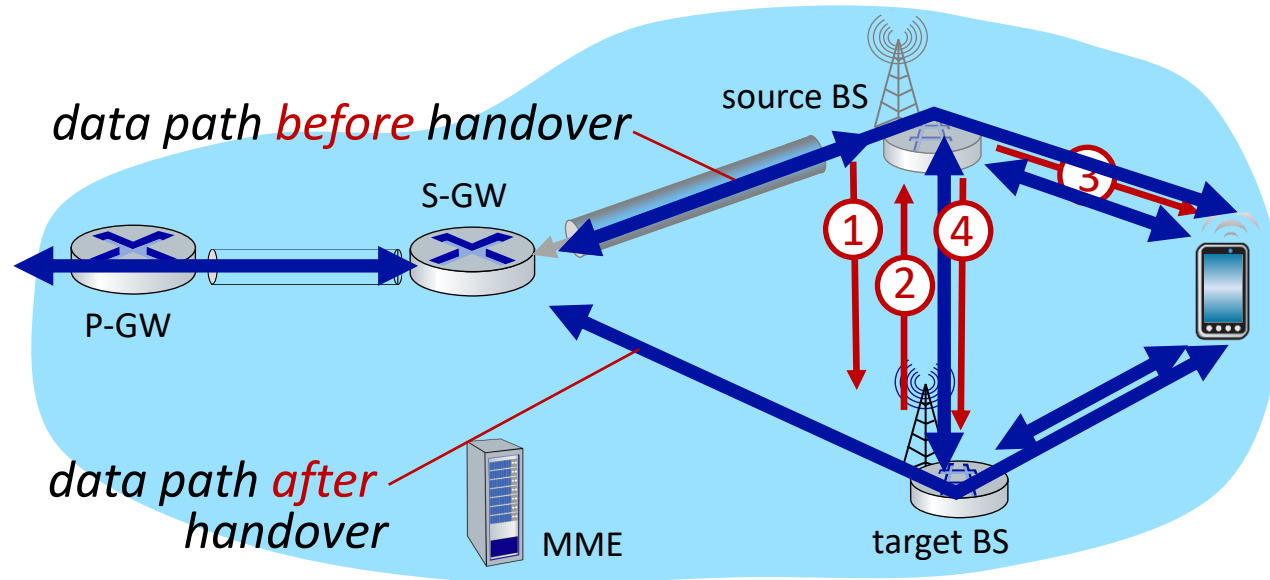


(b) from the Internet to the UE

Σήραγγες (tunnels):

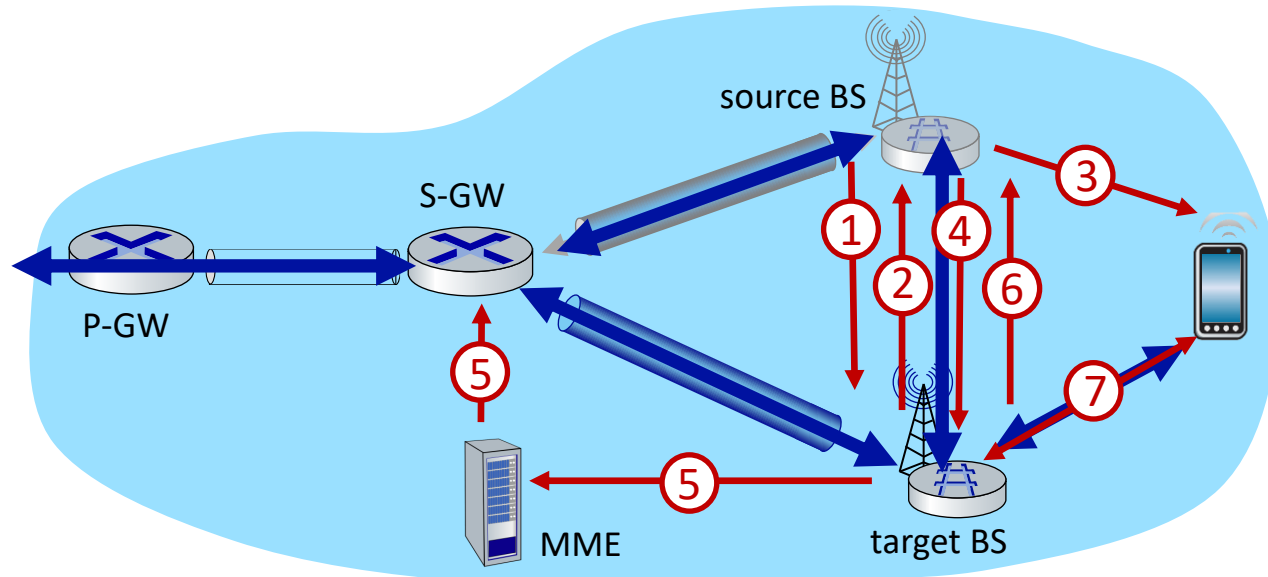
- Tunnel Endpoint ID (TEID) εκχωρείται σε κάθε User Equipment (UE)
- Το TEID χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση UE σε σήραγγα GTP (αντί για IP διευθύνσεις) στο eNB
 - Αντίστοιχα και στα S-GW, P-GW
- Το TEID είναι μονής κατεύθυνσης και διαφορετικά για την επικοινωνία eNB με S-GW και S-GW με P-GW
Αρα: για την επικοινωνία UE με το Διαδίκτυο και Διαδίκτυο με το UE χρειάζονται συνολικά 4 TEIDs

Μεταπομπή (Handover) μεταξύ BSs του κυψελωτού δικτύου



- 1 Το παλιό (source) BS ελέγχει την ποιότητα σήματος (SNR), συνομιλεί με άλλα BSs και επιλέγει το νέο (target) BS, στέλνει μήνυμα αίτησης HO στο νέο BS
- 2 Το νέο (target) BS εκχωρεί χρονοθυρίδες/subcarriers, ανταποκρίνεται με HO ACK
- 3 Το παλιό BS πληροφορεί το κινητό για το νέο BS
 - Το κινητό μπορεί τώρα να στείλει μέσω του νέου BS - η μεταπομπή φαίνεται ολοκληρωμένη στο κινητό
- 4 Το παλιό BS σταματά να στέλνει datagrams στο κινητό, αντ' αυτού τα προωθεί στο νέο BS (που τα προωθεί στο κινητό μέσω του ασύρματου καναλιού)

Μεταπομπή (Handover) μεταξύ BSs του κυψελωτού δικτύου

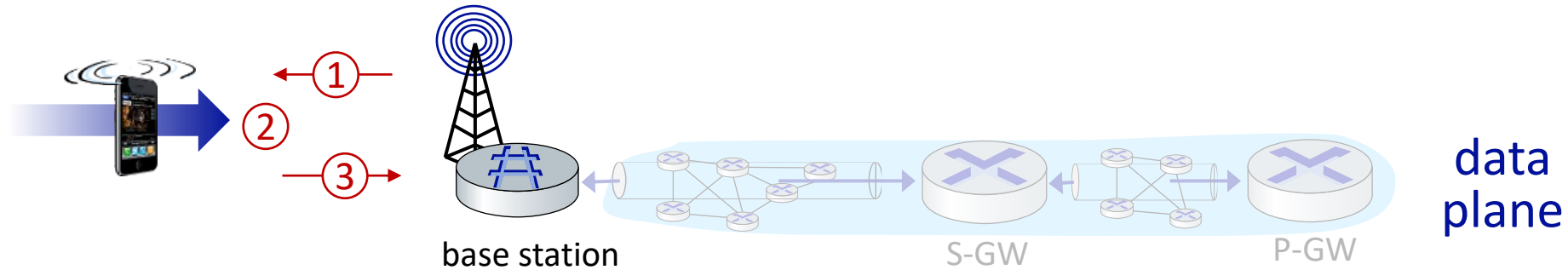


- ⑤ Το νέο (target) BS ενημερώνει το MME ότι είναι το νέο BS για το κινητό
- Το MME δίνει εντολή στο S-GW να αλλάξει το τελικό σημείο της σήραγγας στο νέο BS

- ⑥ Το νέο BS επικοινωνεί με το παλιό BS: η παράδοση ολοκληρώθηκε, το παλιό BS μπορεί να απελευθερώσει πόρους
- ⑦ Τα datagrams του κινητού ρέουν τώρα μέσω της νέας σήραγγας από τον νέο BS στο S-GW

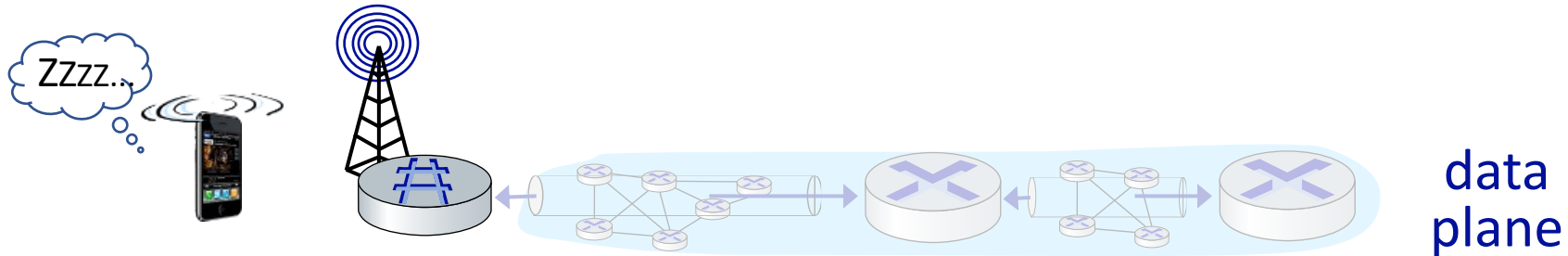
Σήραγγα (tunnel): τα κινητά έχουν 'επίπεδες' IP διευθύνσεις (όχι ιεραρχικές με βάση το BS), η προώθηση πακέτων μεταξύ των δρομολογητών δεν χρησιμοποιεί την IP διεύθυνση του κινητού αλλά γίνεται με τη σήραγγα (ενθυλάκωση και χρήση S-GW και BS IP addresses)

LTE επίπεδο δεδομένων: συσχέτιση με BS



- ① Το BS εκπέμπει πρωτεύον σήμα συγχρονισμού κάθε 5 ms σε όλες τις συχνότητες
 - BS από διαφορετικούς παρόχους κινητών δικτύων εκπέμπουν σήματα συγχρονισμού
- ② Το κινητό βρίσκει ένα πρωτεύον σήμα συγχρονισμού και, στη συνέχεια, εντοπίζει το 2ο σήμα συγχρονισμού σε αυτή τη συχνότητα
 - το κινητό στη συνέχεια βρίσκει πληροφορίες που μεταδίδονται από το BS: εύρος ζώνης καναλιού, διαμορφώσεις, πληροφορίες παρόχου
 - το κινητό μπορεί να λάβει πληροφορίες από πολλά BS, πολλά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας
- ③ Το κινητό επιλέγει με ποιο BS θα συσχετιστεί (π.χ. προτίμηση για οικιακό πάροχο)
- ④ Βήματα για έλεγχο ταυτότητας, δημιουργία κατάστασης, ρύθμιση επιπ. δεδομένων

LTE κινητά: κατάσταση αναμονής (ύπνου)



Το κινητό μπορεί να πάει σε κατάσταση αναμονής/ύπνου (sleeping mode) για εξοικονόμηση μπαταρίας (όπως στο WiFi και στο Bluetooth)

- **ελαφρύς ύπνος:** 100 msec αδράνειας
 - ξυπνάει περιοδικά (100 msec) για να ελέγξει για downlink μεταδόσεις
- **βαθύς ύπνος:** 5-10 δευτερόλεπτα αδράνειας
 - Το κινητό μπορεί να αλλάξει κυψέλη κατά τη διάρκεια του βαθύ ύπνου – πρέπει να αποκατασταθεί η συσχέτιση

Κινητά Δίκτυα

- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing



Το 5G είναι εδώ !

- **Στόχος:** 10x αύξηση μέγιστου ρυθμού μετάδοσης bit, 10x μείωση του καθυστέρησης, 100x αύξηση της εξυπηρετούμενης κίνησης ανά τ.μ. από το 4G
- **5G NR (new radio)**
 - Δύο περιοχές συχνοτήτων: FR1 (450 MHz–6 GHz) και FR2 (24 GHz–52 GHz)
 - FR2 συχνότητες κυμάτων χιλιοστού (mmWave): νέες ζώνες (δεν υπήρχαν σε 4G, 3G) υψηλότεροι ρυθμοί, μικρές αποστάσεις, pico-cells: διάμετροι κυψελών 10-100 m, οπότε απαιτείται μαζική & πυκνή ανάπτυξη νέων σταθμών βάσης
 - mMIMO & beamforming: πολλαπλές και κατευθυντικές κεραίες
- **Cloudification** (Cloud-RAN, modular control plane)
 - ‘Σπάσιμο’ του basestation σε RU-DU-CU, centralization & commodity PC hardware
 - ‘Σπάσιμο’ του ελέγχου σε micro-services, Network Functions Virtualization (NFV)

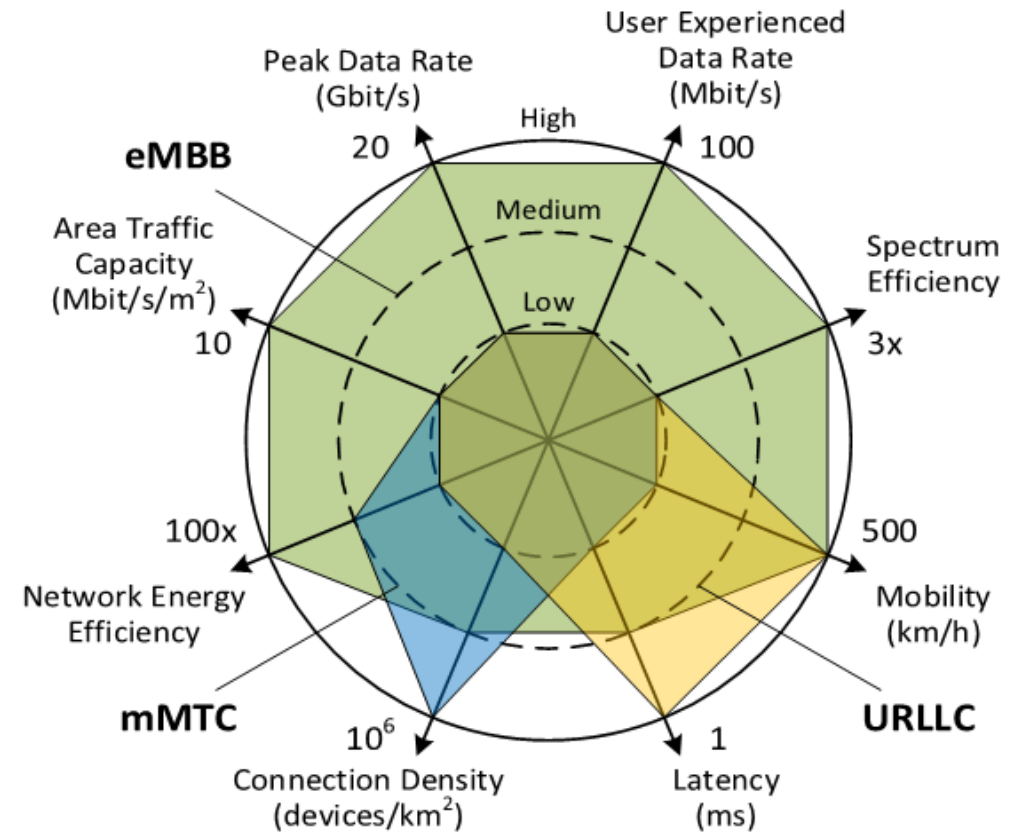
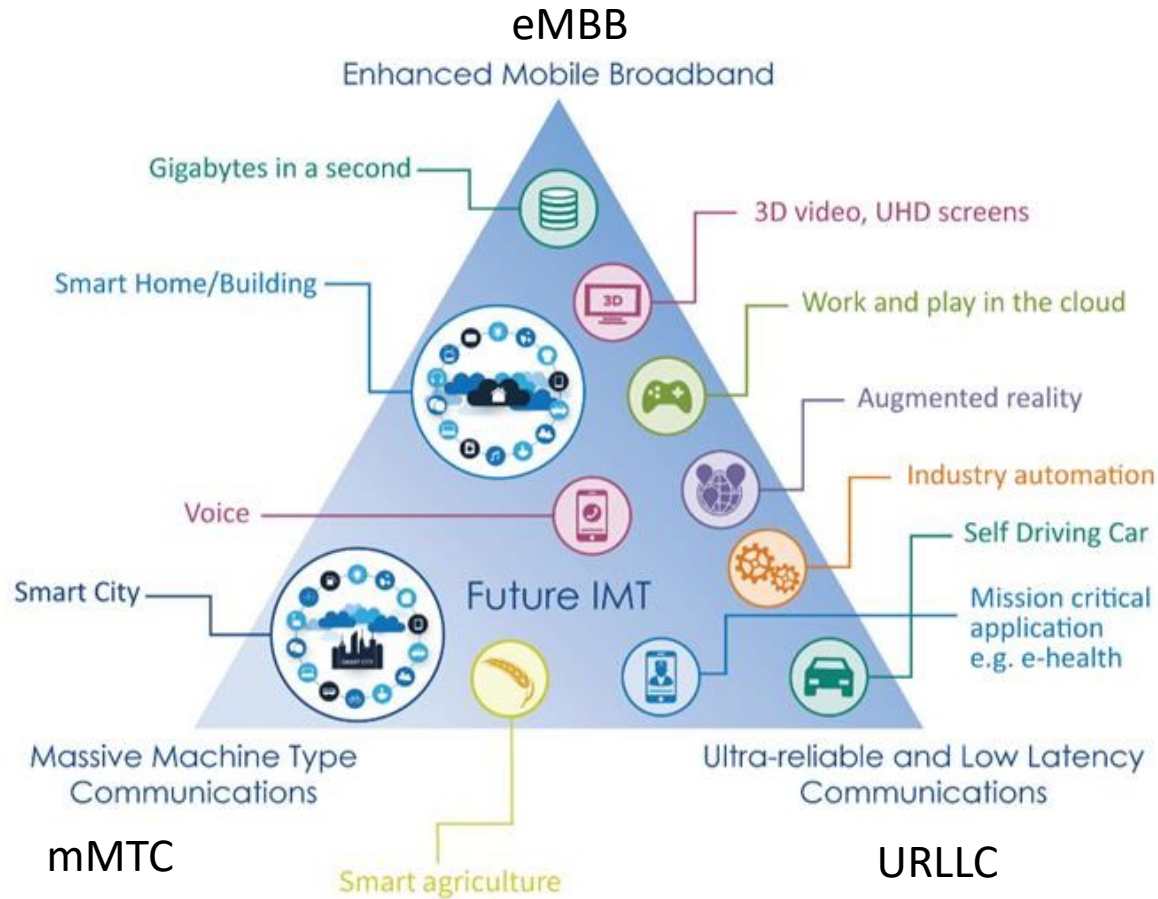
Το όραμα του 5G

Capability	LTE, 4G	5G	Improvement
Peak Data Rate (Gbps)	1	20	20x
User Experienced Data Rate (Mbps)	10	100-1000	10-100x
Spectrum Efficiency	Baseline	2x/3x/5x	2x-5x
Mobility (km/h)	350	500	1.4x
Latency (ms)	10	1	10x
Connection Density (#/km ²)	10 ⁵	10 ⁶	10x
Network Energy Efficiency	Baseline	100x	100x
Area Traffic Capacity (Mbps/m ²)	0.1	10	100x

the International Telecommunication Union (ITU) provides the vision and the requirements (International Mobile Telecommunications-IMT-2020)

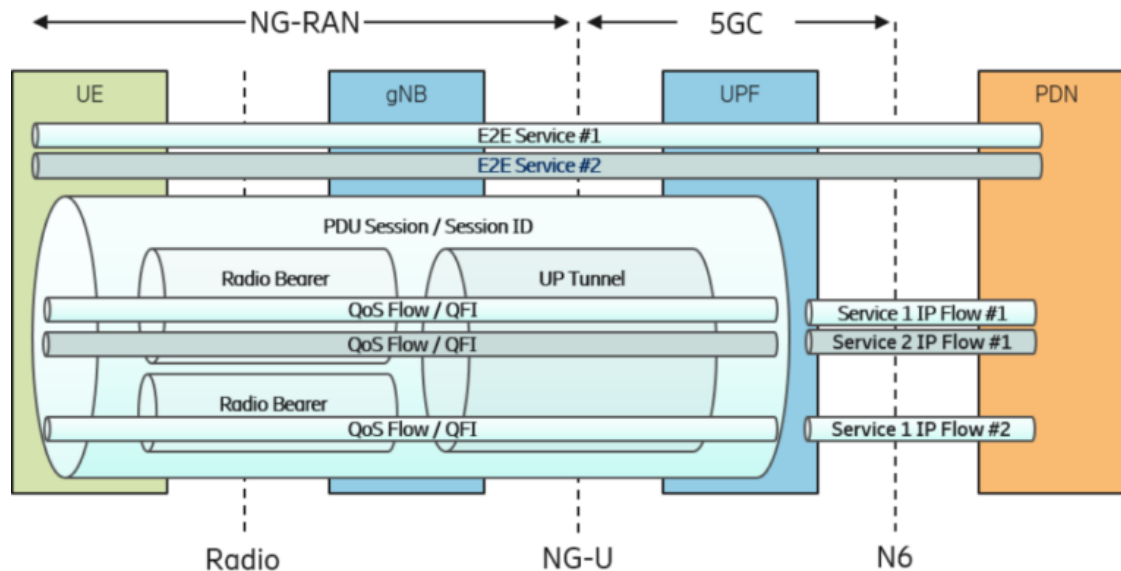
3GPP translates that to specifications

Εφαρμογές και απαιτήσεις



QoS in 5G

- Protocol Data Unit (PDU) session: αντιπροσωπεύει μια λογική σύνδεση μεταξύ ενός User Equipment (UE) και του κορμού 5G (5GC) και φέρει ροές δεδομένων με συγκεκριμένες απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS)
- Στο 5G ένα UE μπορεί να έχει μία ή περισσότερες PDU sessions, η καθένα έναν ή περισσότερους Radio bearer, ο καθένας μία ή περισσότερες ροές QoS
 - κάθε ροή QoS σχετίζεται με μια παράμετρο 5QI (επέκταση των QCI στο 4G LTE, πιο πολλές κλάσεις), η οποία καθορίζει το προφίλ /απαιτήσεις QoS
- Στο 4G το QoS είναι ανά EPS bearer, στο 5G είναι ανά ροή QoS



5QI (5G QoS indicator)
extends 4G QCI (QoS class indicator)

5QI Value	Resource Type	Default Priority Level	Packet Delay Budget (NOTE 3)	Packet Error Rate	Default Maximum Data Burst Volume (NOTE 2)	Default Averaging Window	Example Services
1	GBR (NOTE 1)	20	100 ms (NOTE 11, NOTE 13)	10 ⁻²	N/A	2000 ms	Conversational Voice
2		40	150 ms (NOTE 11, NOTE 13)	10 ⁻³	N/A	2000 ms	Conversational Video (Live Streaming)
3		30	50 ms (NOTE 11, NOTE 13)	10 ⁻³	N/A	2000 ms	Real Time Gaming, V2X messages (see TS 23.287 [121]). Electricity distribution – medium voltage, Process automation monitoring
...	
5	Non-GBR (NOTE 1)	10	100 ms (NOTE 10, NOTE 13)	10 ⁻⁶	N/A	N/A	IMS Signalling
6		60	300 ms (NOTE 10, NOTE 13)	10 ⁻⁶	N/A	N/A	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		70	100 ms (NOTE 10, NOTE 13)	10 ⁻³	N/A	N/A	Voice, Video (Live Streaming) Interactive Gaming
...	
82	Delay-critical GBR	19	10 ms (NOTE 4)	10 ⁻⁴	255 bytes	2000 ms	Discrete Automation (see TS 22.261 [2])
83		22	10 ms (NOTE 4)	10 ⁻⁴	1354 bytes (NOTE 3)	2000 ms	Discrete Automation (see TS 22.261 [2]); V2X messages (UE - RSU Platooning, Advanced Driving: Cooperative Lane Change with low LoA. See TS 22.186 [111], TS 23.287 [121])
84		24	30 ms (NOTE 6)	10 ⁻⁵	1354 bytes (NOTE 3)	2000 ms	Intelligent transport systems (see TS 22.261 [2])
...	

Κινητά Δίκτυα

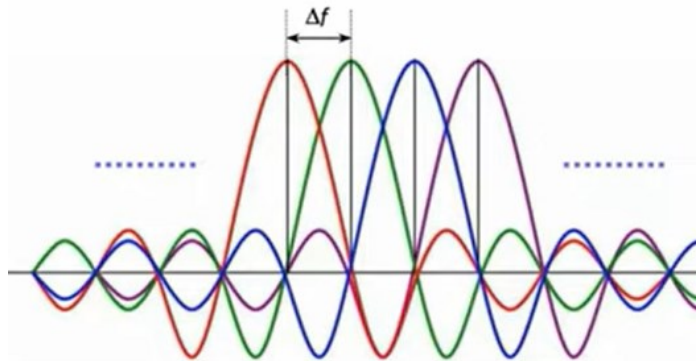
- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing

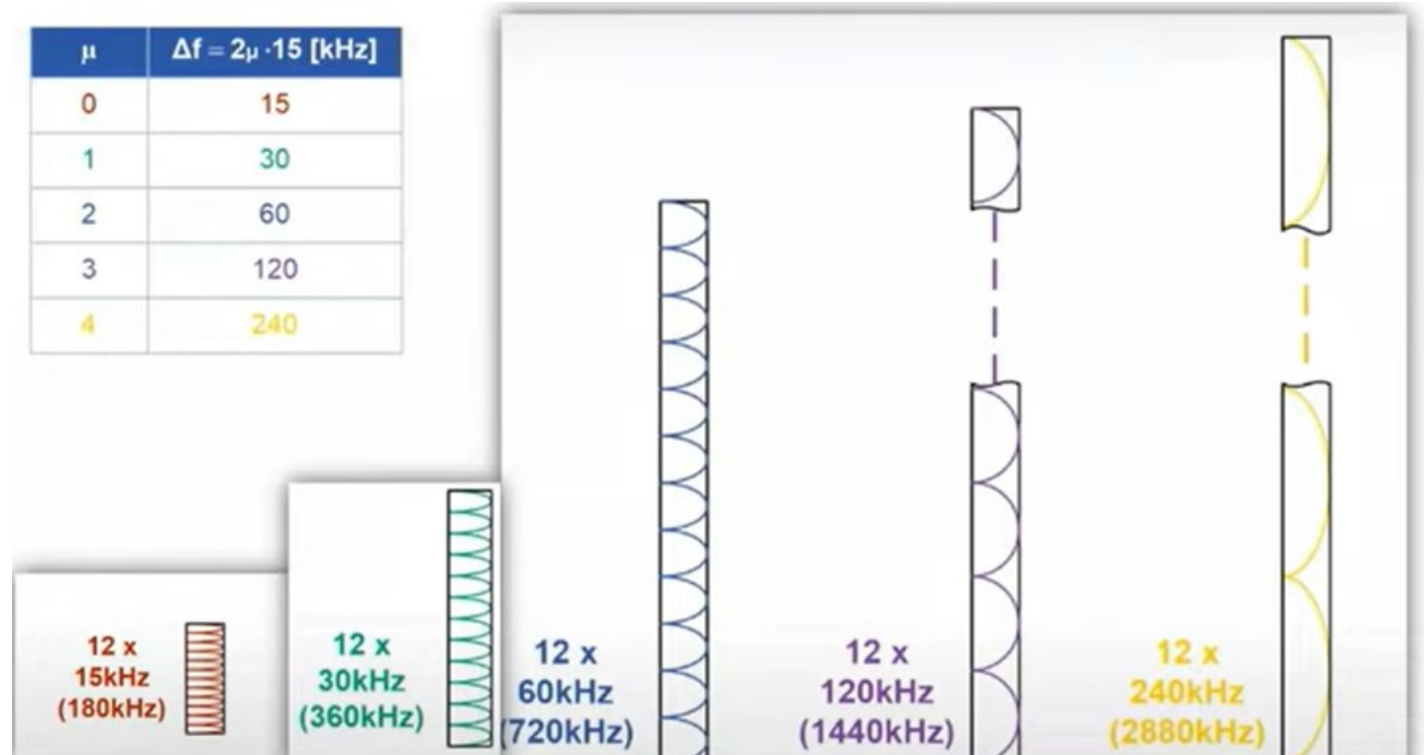


5G (NR) New Radio Numerology

- **Numerology** = parameter μ defining the OFDM waveforms (subcarrier spacing)
- Subcarrier spacing: $\Delta f = 2^\mu \times 15$ KHz (4G LTE: was always 15 KHz – $\mu=0$)
- Resource Block= 12 subcarriers (4G: same, but in 4G 12 subcarriers = 180 kHz, in 5G it differs depending on μ)

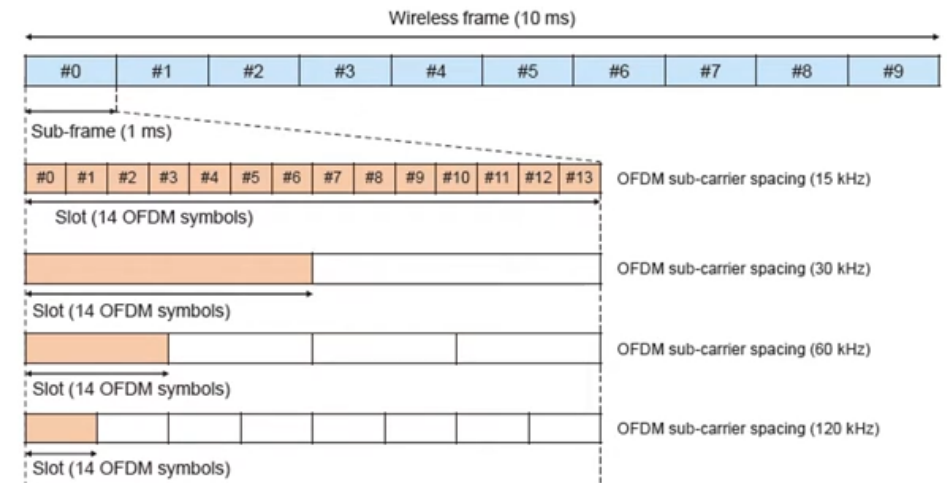


μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15$ [kHz]
0	15
1	30
2	60
3	120
4	240

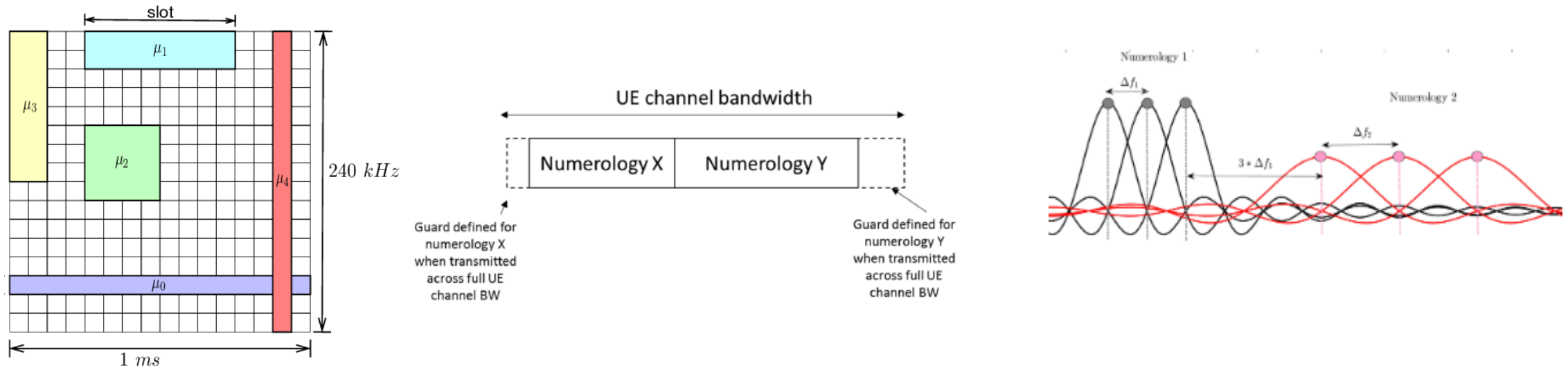


5G NR (New Radio) Radio Frame

- Το 5G NR πλαίσιο (frame) είναι 10 ms (ίδιο με 4G) και χωρίζεται σε 10 υποπλαίσια (subframes) το καθένα με διάρκεια 1 ms (ίδιο με 4G)
- Τα υποπλαίσια χωρίζονται σε slots, κάθε slot έχει 14 OFDM symbols, η διάρκεια ενός slot ορίζεται από το numerology / sub-carrier spacing μ (4G: 1 subframe = 2 slots, 14 OFDM symbols in 2 slots)
 - Slot (=Subframe) duration = $1 / 2^\mu$ ms
 - $\mu = 0$ (spacing 15 KHz): slot duration = 1 ms (LTE)
 - $\mu = 1$ (spacing 30 KHz): slot duration = 0.5 ms
 - $\mu = 2$ (spacing 60 KHz): slot duration = 0.25 ms
 - $\mu = 3$ (spacing 120 KHz): slot duration = 0.125 ms
 - 14 symbol/slot, symbol duration = slot duration/14
- RB = 12 subcarriers (spectrum = $12 \times 2^\mu \times 15$ KHz) x slot duration (= $1 / 2^\mu$ ms) → τα RB έχουν πάντα ίδιο spectrum x time εμβαδόν (=capacity)



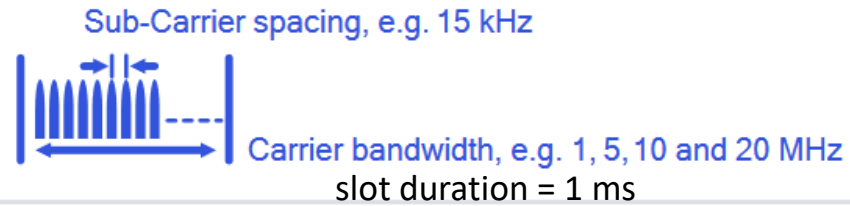
Flexible numerology



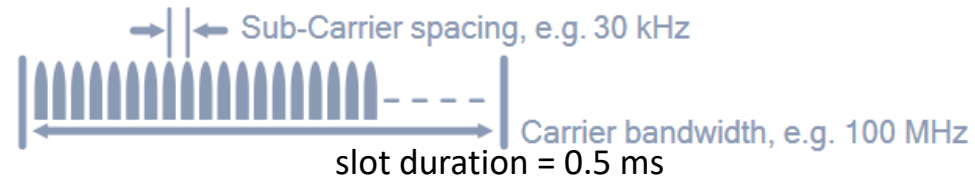
- Μέρος του φάσματος/υποσύνολο των OFDM υποκαναλιών (subcarriers) στο ίδιο κανάλι μπορεί να χρησιμοποιεί ένα numerology/subcarrier spacing και άλλο μέρος διαφορετικό
- Υπάρχει πρόβλημα παρεμβολών μεταξύ OFDM subcarriers που χρησιμοποιούν διαφορετικά numerologies
 - Το 3GPP ορίζει guardband στις άκρες του καναλιού ανάλογο με το χρησιμοποιούμενο numerology της συγκεκριμένης άκρης (το διπλανό κανάλι μπορεί να ανήκει σε άλλο πάροχο)
 - Το 3GPP δεν ορίζει guardband μέσα στο κανάλι μεταξύ των μερών με διαφορετικό numerology, η χρήση guardband είναι vendor/operator specific

Συνδυασμός καναλιών / numerology

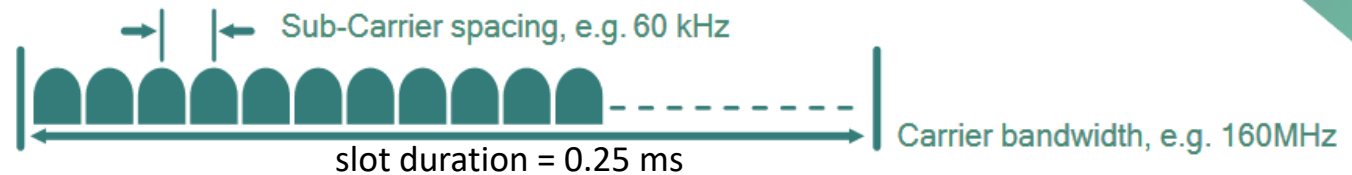
Outdoor macro coverage
e.g., FDD 700 MHz



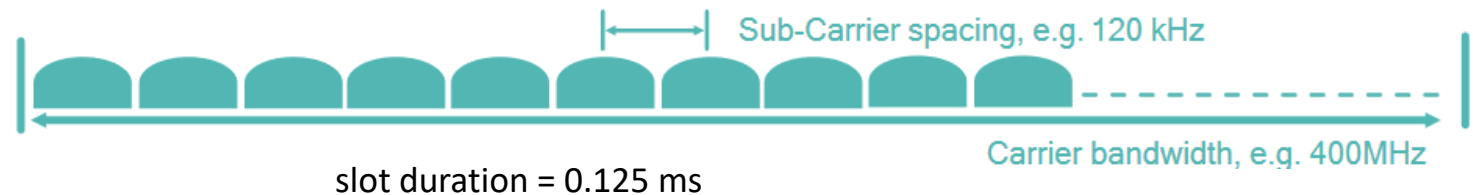
Outdoor macro and small cell
e.g., TDD 3-5 GHz



Indoor wideband
e.g., unlicensed 6 GHz



mmWave
e.g., TDD 28 GHz



2ⁿ scaling of Sub-Carrier Spacing (SCS)

Maximum Channel Bandwidth FR1

- 4G: κανάλι εύρους ζώνης των 1.4, 3, 5, 10, 15 και 20 MHz, carrier aggregation (CA) 5 κανάλια μέχρι 100 MHz, ($\mu=0$: 15 KHz subcarrier spacing)
- 5G: δύο περιοχές συχνοτήτων: FR1 (450 MHz–6 GHz) και FR2 (24 GHz–52 GHz)
 - FR1: 5-100 MHz ζώνη, $\mu=0-2$ (15 – 60 KHz subcarrier spacing), κανάλι 5,10,15..., 100 MHz
 - FR2: 5-100 MHz ζώνη, $\mu=2-3$ (60-120 KHz subcarrier spacing), κανάλι 50,100,200, 400 MHz

5.3.2 Maximum transmission bandwidth configuration

The maximum transmission bandwidth configuration N_{RB} for each UE channel bandwidth and subcarrier spacing is specified in Table 5.3.2-1.

Table 5.3.2-1: Maximum transmission bandwidth configuration N_{RB}

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	35 MHz	40 MHz	45 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106	133	160	188	216	242	270	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	92	106	119	133	162	189	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	44	51	58	65	79	93	107	121	135

5.3.3 Minimum guardband and transmission bandwidth configuration

The minimum guardband for each UE channel bandwidth and SCS is specified in Table 5.3.3-1.

Table 5.3.3-1: Minimum guardband for each UE channel bandwidth and SCS (kHz)

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	35 MHz	40 MHz	45 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
15	242.5	312.5	382.5	452.5	522.5	592.5	672.5	752.5	832.5	912.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	505	665	825	985	1145	1305	1465	1625	1785	1945	2250	2550	2850	3150	3450
60	N/A	1010	1310	1610	1910	2210	2510	2810	3110	3410	3900	4300	4700	5100	5500

NOTE: The minimum guardbands have been calculated using the following equation: $(BW_{channel} \times 1000 \text{ (kHz)} - N_{RB} \times SCS \times 12) / 2 - SCS/2$, where N_{RB} are from Table 5.3.2-1.

Maximum Channel Bandwidth FR2

- 4G: κανάλι εύρους ζώνης των 1.4, 3, 5, 10, 15 και 20 MHz, carrier aggregation (CA) 5 κανάλια μέχρι 100 MHz, ($\mu=0$: 15 KHz subcarrier spacing)
- 5G: δύο περιοχές συχνοτήτων: FR1 (450 MHz–6 GHz) και FR2 (24 GHz–52 GHz)
 - FR1: 5-100 MHz ζώνη, $\mu=0-2$ (15 – 60 KHz subcarrier spacing), κανάλι 5,10,15..., 100 MHz
 - FR2: 5-100 MHz ζώνη, $\mu=2-3$ (60-120 KHz subcarrier spacing), κανάλι 50,100,200, 400 MHz

Table 5.3.2-1: Maximum transmission bandwidth configuration N_{RB}

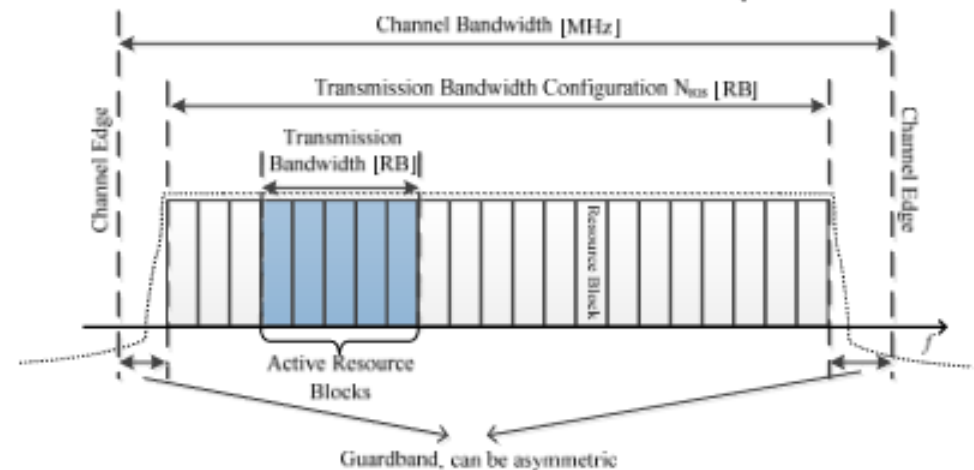
SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
60	66	132	264	N.A
120	32	66	132	264

Table 5.3.3-1: Minimum guardband for each UE channel bandwidth and SCS (kHz)

SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
60	1210	2450	4930	N. A
120	1900	2420	4900	9860

Εύρος ζώνης εκπομπής/λήψης κινητού

- Το UE εκπέμπει/λαμβάνει σε ένα μέρος του φάσματος (bandwidth part - BWP) ενός καναλιού New Radio στην uplink και downlink κατεύθυνση
- Η τοποθέτηση του εύρους ζώνης εκπομπής/ λήψης του UE μέσα στο κανάλι είναι ευέλικτη
- Carrier Aggregation: το κάθε UE υποστηρίζει εκπομπή/λήψη σε διαφορετικές περιοχές του ίδιου καναλιού ή σε διαφορετικά κανάλια
- Ο UE δεν χρειάζεται να γνωρίζει το συνολικό εύρος ζώνης του καναλιού του BS ή πώς το BS κατανέμει το εύρος ζώνης σε διαφορετικούς UE



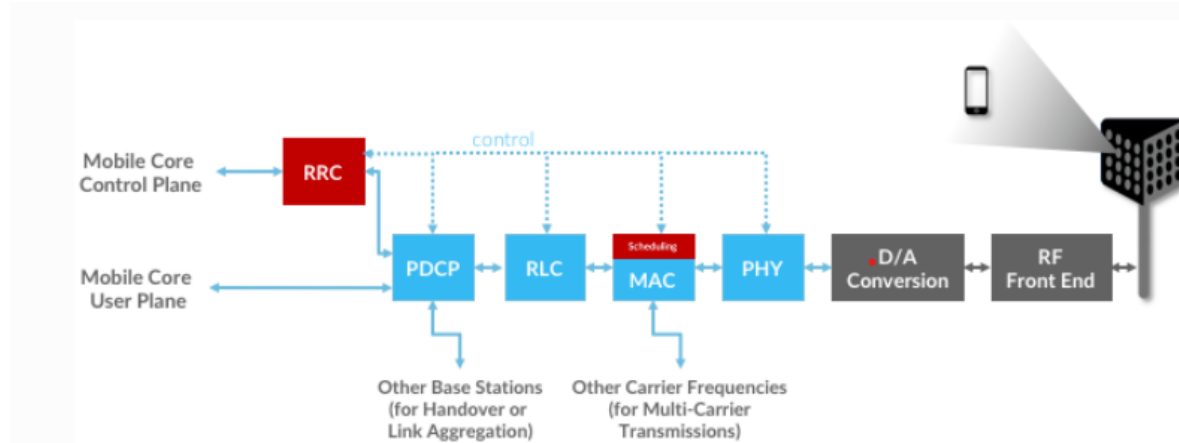
Κινητά Δίκτυα

- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - **Cloud-RAN**
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing



RAN - Στοιίβα πρωτοκόλλων



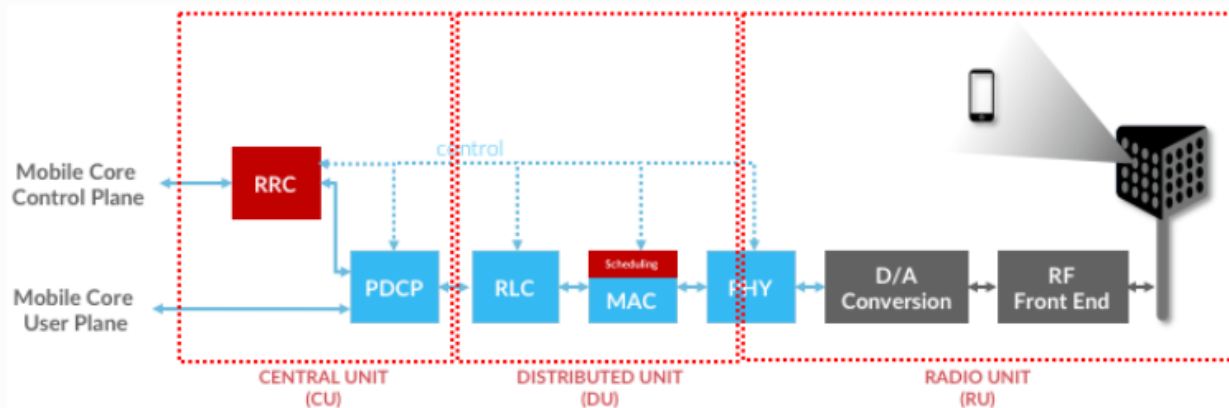
Στοιίβα πρωτοκόλλων του Basestation παρουσιασμένη οριζόντια σαν μια «αλυσίδα» επεξεργασίας πακέτων

- gNB – next generation Node Bearer – the Basestation in 5G
- RRC (Radio Resource Control): ρύθμιση του User Plane (επίπεδο χρήστη-δεδομένων), διεπαφή με core control
 - Επίπεδο ελέγχου (δεν επεξεργάζεται πακέτα User/Data plane)
- PDCP (Packet Data Convergence Protocol): συμπίεση/αποσυμπίεση, κρυπτογράφηση, προστασία ακεραιότητας
- RLC (Radio Link Control): τμηματοποίηση, συναρμολόγηση, αξιόπιστη μεταφορά /επανεκπομπή (Hybrid ARQ)
- MAC (Media Access Control): πρόσβαση στο κοινό μέσο, buffering και ανάθεση πόρων (FDM/TDM) σε πραγματικό χρόνο
- PHY (Physical Layer): κωδικοποίηση και διαμόρφωση

L2- Link Layer

Cloud (or Centralized) RAN (C-RAN)

Η λειτουργικότητα του RAN σπάει και μπορεί να κατανεμηθεί σε διαφορετικές τοποθεσίες (μέχρι το 4G όλες οι λειτουργίες εκτελούνταν στο Base Station)



Διαχωρισμός του RAN

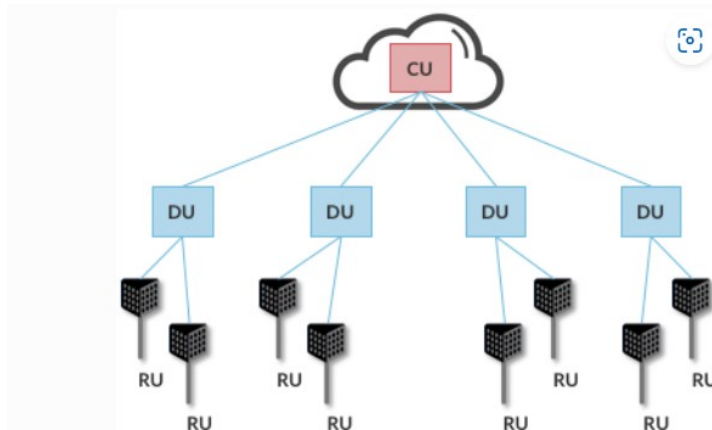
Κεντρική μονάδα (Central Unit - CU)

Κατανεμημένη μονάδα (Distributed Unit - DU)

Ραδιο μονάδα (Radio Unit - RU)

Τα RRC και PDCP αναφέρονται συνήθως ως CU-C (control) και CU-U (user), αντίστοιχα

Split-RAN processing pipeline distributed across a Central Unit (CU), Distributed Unit (DU), and Radio Unit (RU).

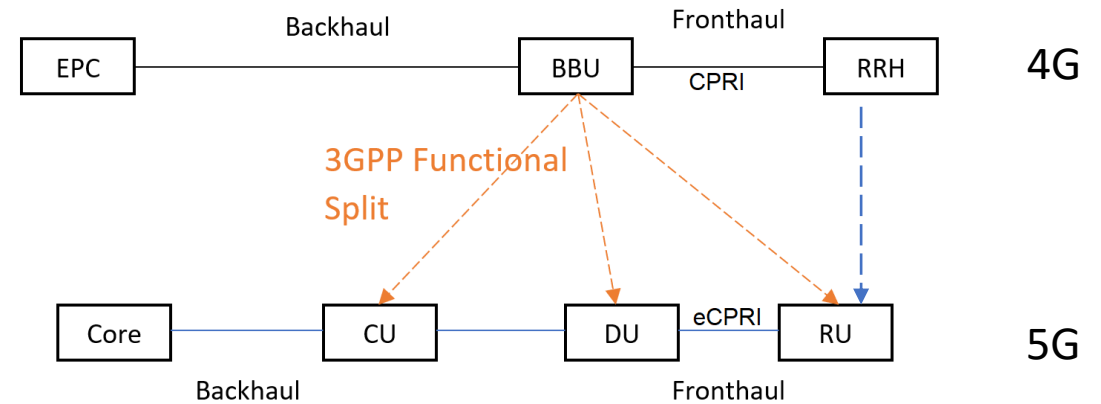


Ονοματολογία συνδεσιμότητας/διεπαφών μεταξύ των μονάδων:

- RU-DU: Fronthaul
- DU-CU: Midhaul
- CU – Mobile Core: Backhaul

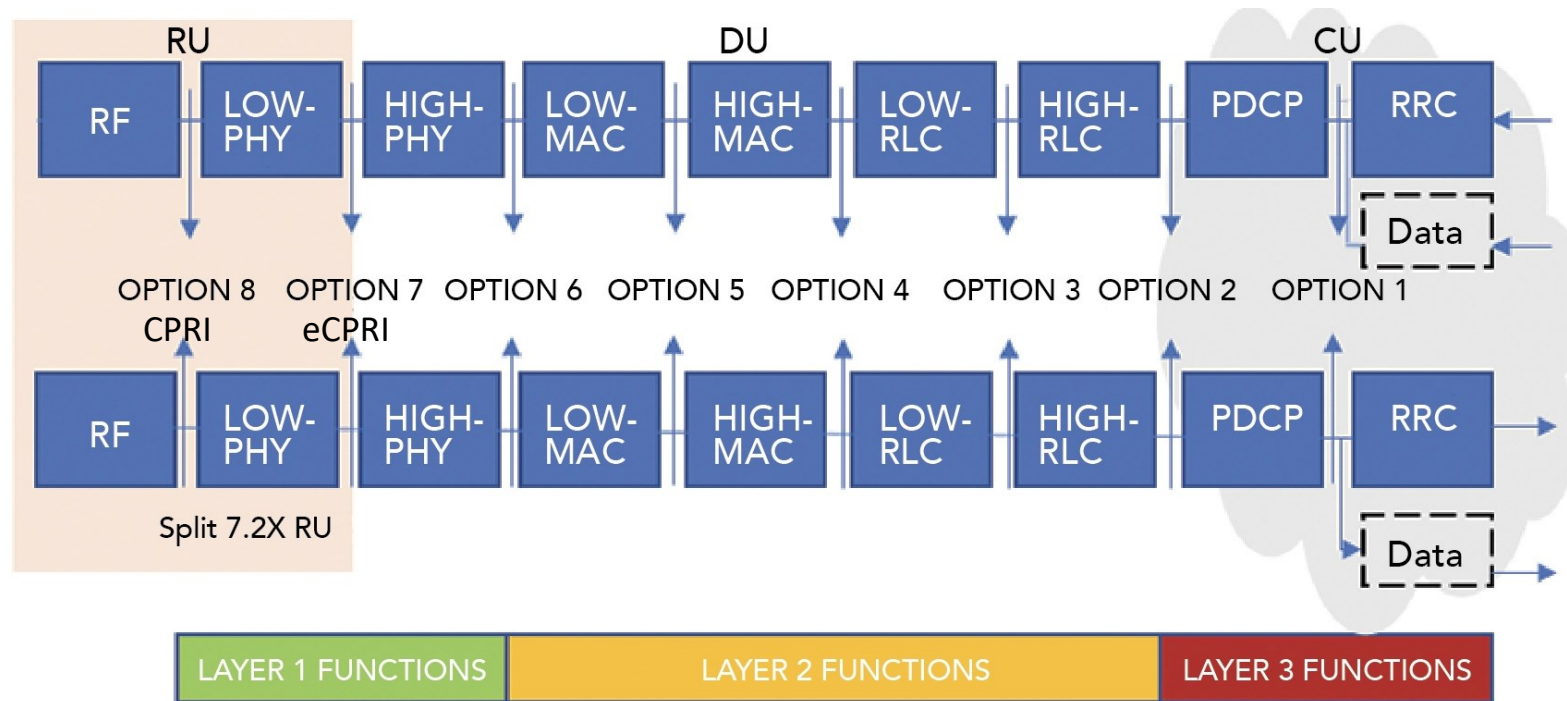
Split-RAN hierarchy, with one CU serving multiple DUs, each of which serves multiple RUs.

C-RAN architecture



- CU: περιλαμβάνει τα RRC, SDAP, και PDCP, high L2 (Data Link layer), είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες ‘μη πραγματικού χρόνου’ (βρόγχος ελέγχου > 100 msec)
- DU: περιλαμβάνει τα RLC και MAC (low L2-Data Link), και μέρος του L1 (high L1-PHY), λειτουργίες ‘πραγματικού χρόνου’ (βρόγχος ελέγχου <10 msec)
- RU: μετάδοση/λήψη των ασύρματων σημάτων από και προς την κεραία, αναλογική/ψηφιακή μετατροπή, χαμηλότερο μέρος του L1 (low PHY), καθώς και λειτουργία του beamforming
 - Ειδικό hardware
- Το CU και το DU είναι software και μπορεί να τρέξουν σε server γενικού σκοπού (COTS)

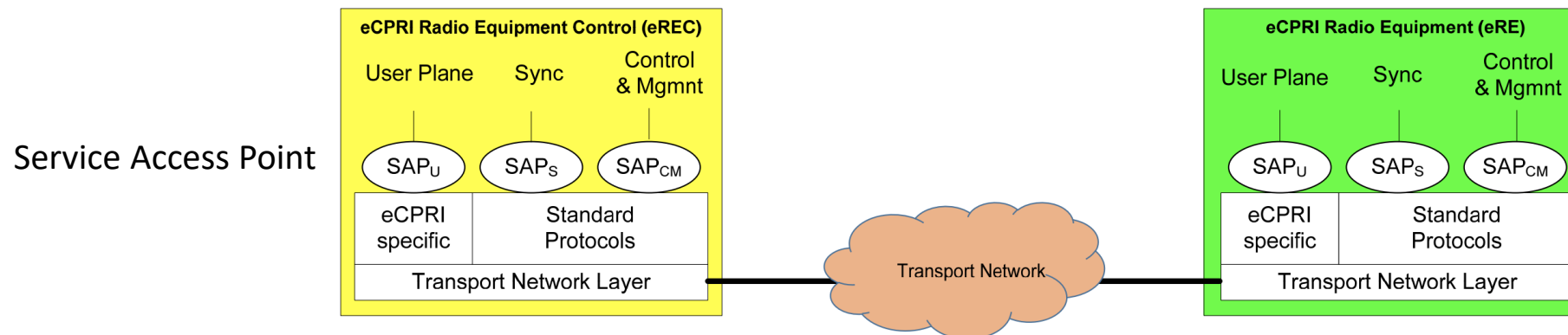
Functional Splits



- Διάφορες επιλογές διαχωρισμού (απεικονίζεται η επικρατέστερη για το RU: 7.2 split)
 - Ενδιαφέρον κυρίως για την επιλογή διαχωρισμού RU-DU: κάθε επιλογή προσφέρει διαφορετικό trade off μεταξύ κεντροποίησης (μείωση κόστους, συνεργασία) και δικτυακών αναγκών (χωρητικότητα, καθυστέρηση) για τη μεταφορά κίνησης μεταξύ των μονάδων RU-DU (fronthaul)
- Πρότυπα από O-RAN
- Οι vendors προτιμούν κυρίως τα RU 7.2X και 7.3 (υποπεριπτώσεις του option 7)

Evolved CPRI για μεταφορά fronthaul κίνησης

- Evolved Common Public Radio Interface (eCPRI): διεπαφή για εξυπηρέτηση fronthaul κίνησης μεταξύ RU-DU, πρότυπο του φόρουμ CPRI
- Αποτελεί εξέλιξη του CPRI (RF-PHY split, μετέφερε radio I/Q data, constant bit rate) για τα καινούργια functional splits (μεταβλητός ρυθμός, βελτίωση αποδοτικότητας)
- Υποστηρίζει i) μεταφορά user data με συγκεκριμένο eCPRI format, και ii) δεδομένων συγχρονισμού (π.χ. PTP ή SyncE) και control & management (π.χ. SNMP) μέσω γνωστών πρωτοκόλλων
- Οποιοσδήποτε τύπος δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά, εφόσον πληροί τις απαιτήσεις (αυστηρές: υψηλή χωρητικότητα τάξης Gbps και χαμηλή καθυστέρηση τάξης 100 μs)



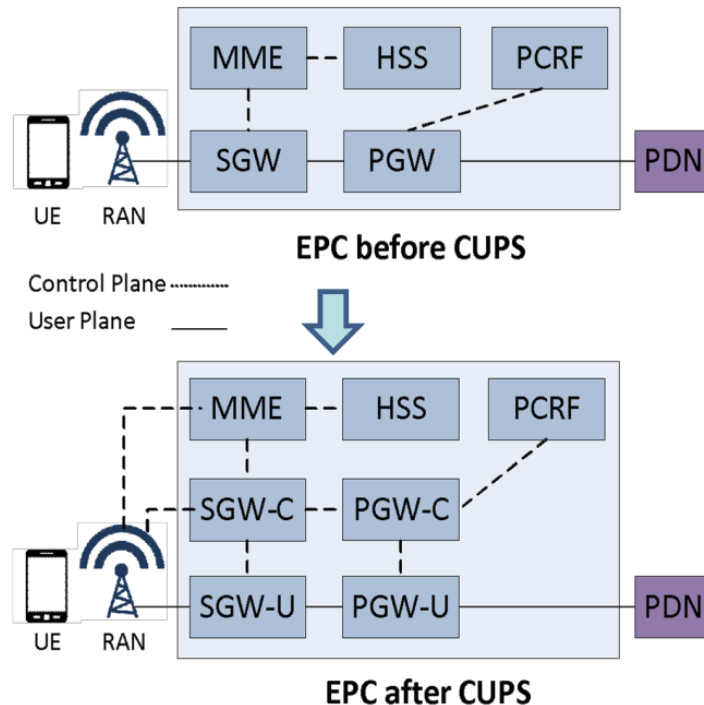
Κινητά Δίκτυα

- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - Deployment options, slicing



4G EPC Control and User Plane Separation



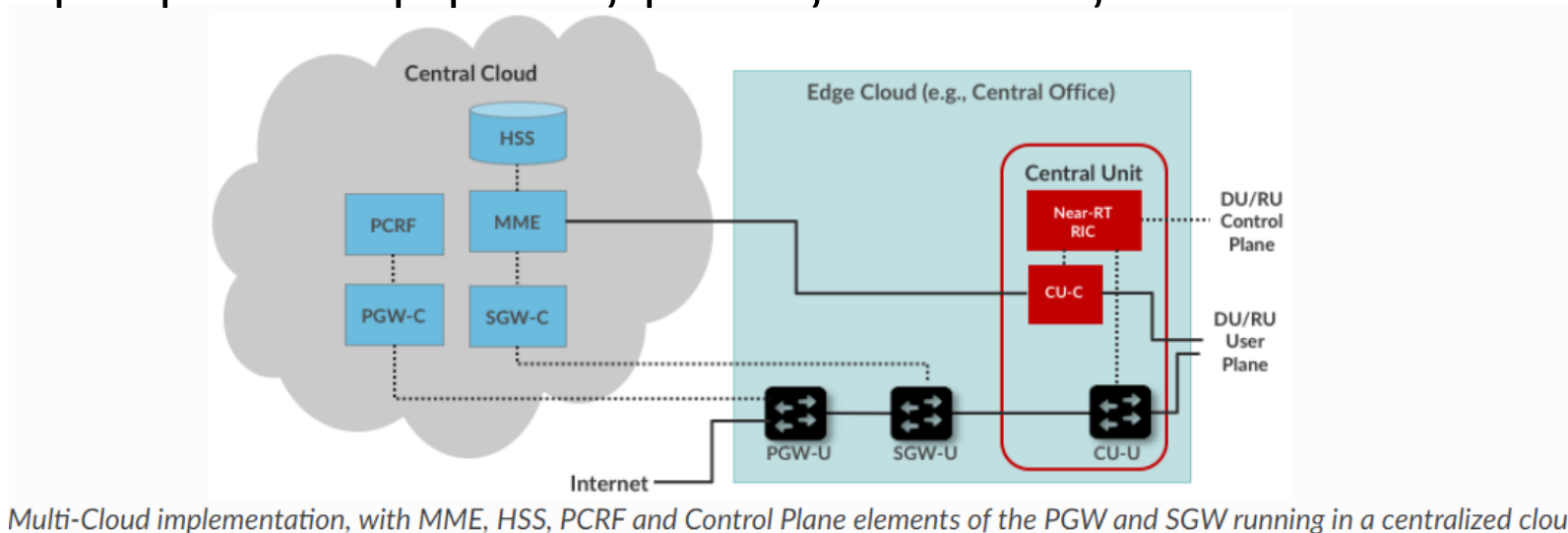
- MME (Mobility Management Entity -MME): Καταγραφή και διαχείριση της κινητικότητας, μεταπομπές, ρύθμιση data plane
- HSS (Home Subscriber Server): Βάση δεδομένων με πληροφορίες συνδρομητών
- PCRF (Policy & Charging Rules Function): Εφαρμόζει πολιτικές QoS και χρέωση
- SGW (Serving Gateway): Προωθεί πακέτα IP από και προς το RAN. Αποτελεί την άγκυρα (σταθερό σημείο) σε μεταπομπές
- PGW (Packet Gateway): δρομολογητής-πύλη του EPC,, δίνει IP διευθύνσεις, NAT, firewall

Control and User Plane Separation (CUPS) στο 4G – (SDN για 4G)

PGW και SGW σπάνε σε **C**ontrol και **U**ser plane

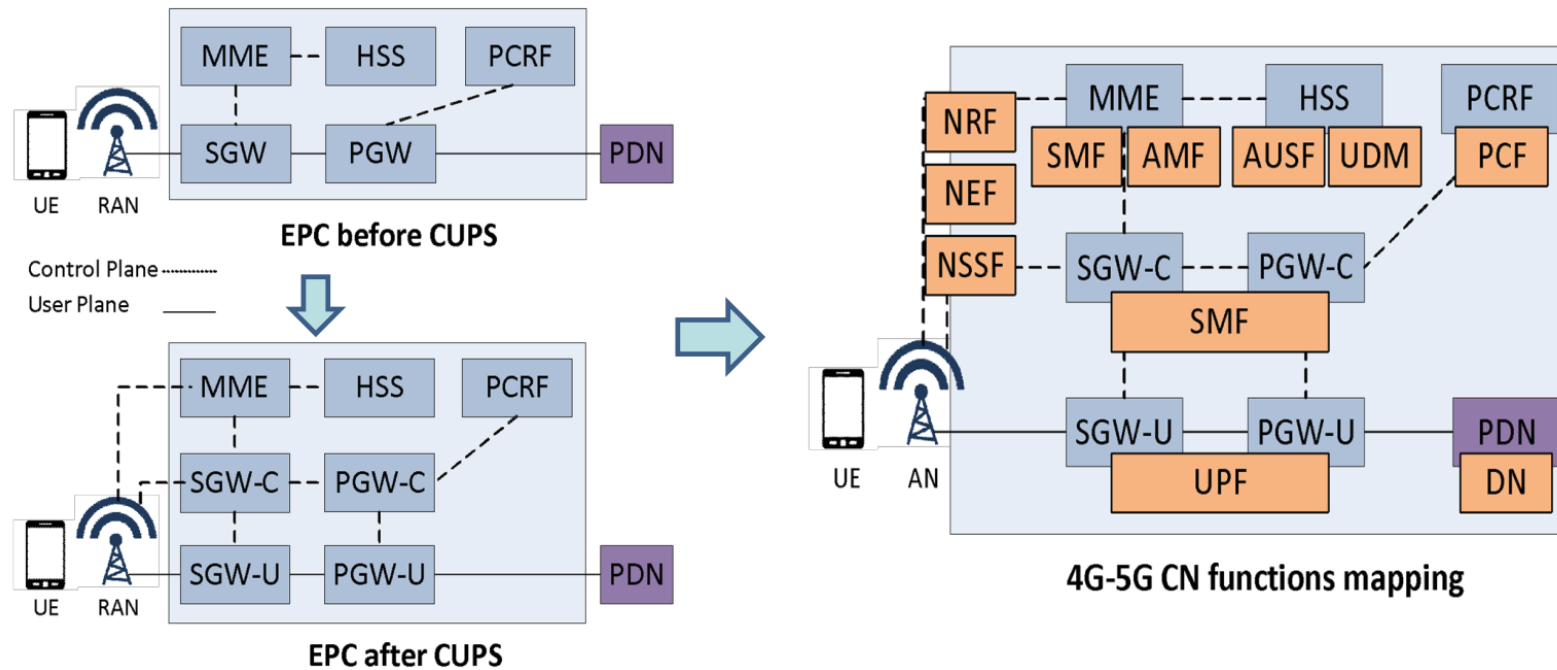
Cloud λειτουργία

Όταν οι λειτουργίες ελέγχου διαχωριστούν από το επίπεδο δεδομένων τότε μπορούμε να τις τοποθετήσουμε σε διαφορετικές φυσικές τοποθεσίες



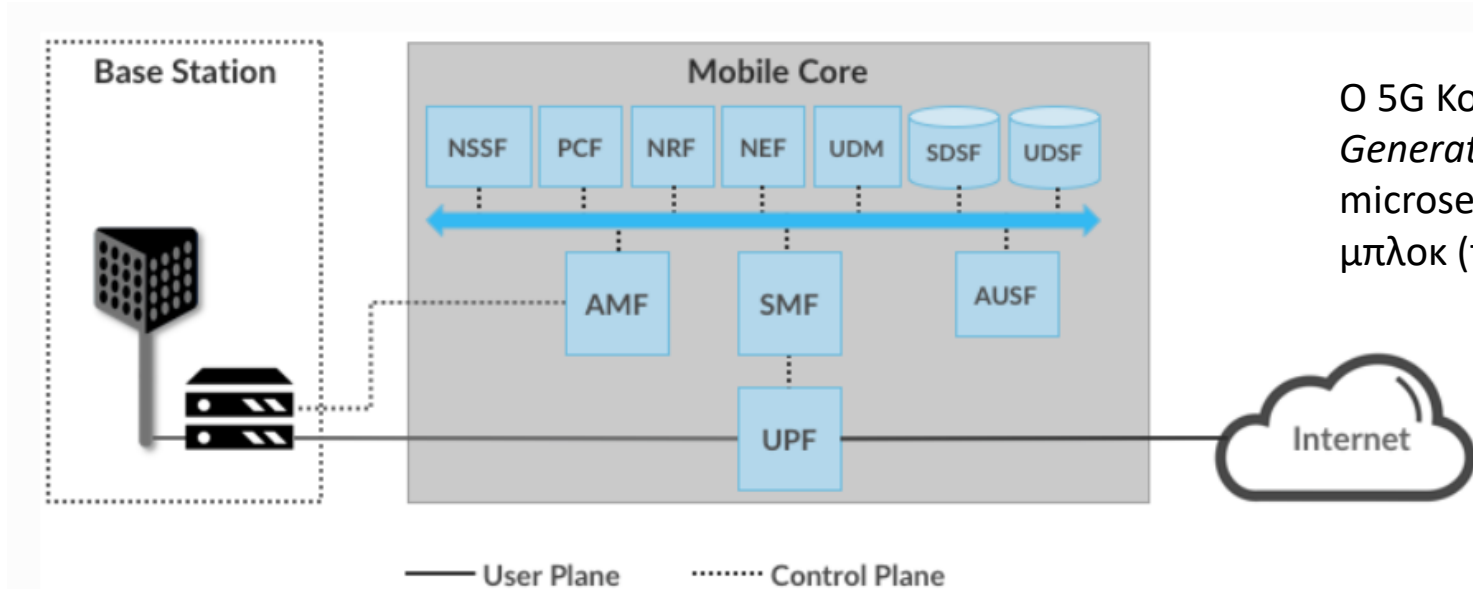
- Δυνατότητα τοποθέτησης των λειτουργικών τμημάτων ελέγχου σε μια μεγάλη υπολογιστική υποδομή με πολλούς πόρους π.χ. Central Cloud
- Ο συγκεντρωτισμός εξοικονομεί κόστος, διευκολύνει την εφαρμογή έξυπνων πολιτικών και τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων από πολλές τοποθεσίες – κόμβους

4G to 5G Core



- SMF (Session Management Function): establishment, modification, and termination of user plane sessions in 5G core
- AMF (Access & Mobility Management Function): managing user authentication, authorization, mobility, and sessions in 5G RAN
- AUSF (Authentication Server Function): Authenticates UEs
- UDM (Unified Data Management): Manages user identity, including generation of authentication credentials and access authorization
- S/UDSF (Structure/Unstructured Data Storage Function): Used to store structured/unstructured data (unstructured ex.: key-value)
- PCF (Policy Control Function): Manages the policy rules for the rest of the Mobile Core CP
- NEF (Network Exposure Function): Exposes selected capabilities to third-party services, and so is similar to an API Server
- NRF (Network Repository Function): Used to discover available services (network functions), similar to a Discovery Service
- NSSF (Network Slice Selection Function): Manages how network slices are selected to serve a given UE

5G core

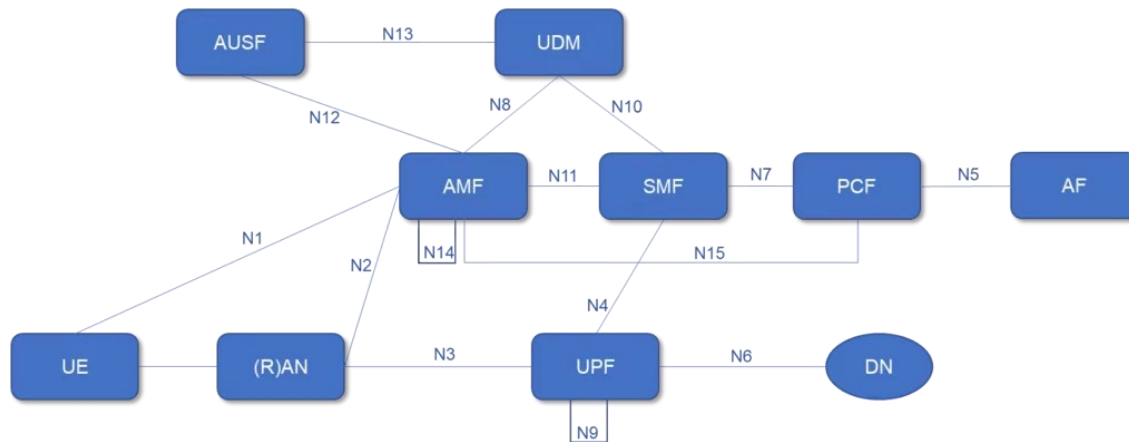


Ο 5G Κορμός Κινητής, τον οποίο το 3GPP καλεί *Next Generation NG-Core*, υιοθετεί μία αρχιτεκτονική με microservice που αποτελείται από λειτουργικά μπλοκ (functional blocks)

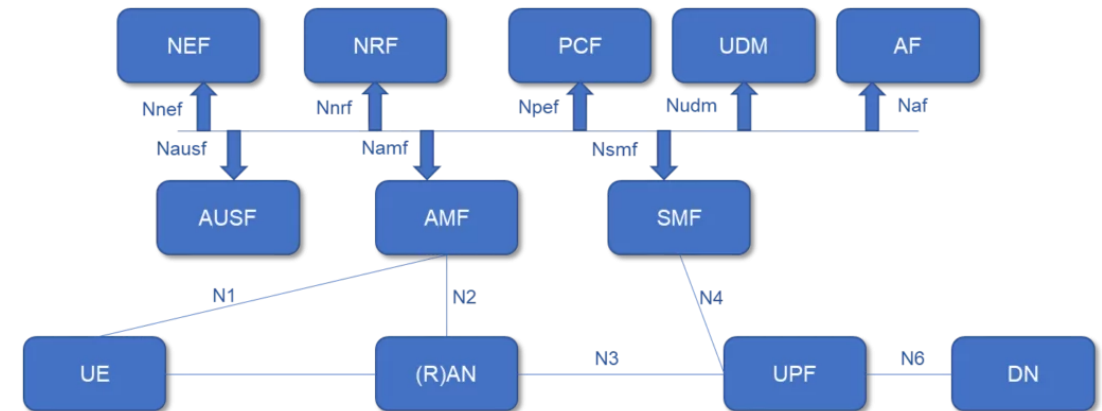
- SMF (Session Management Function): establishment, modification, and termination of user plane sessions in 5G core
- AMF (Access & Mobility Management Function): managing user authentication, authorization, mobility, and sessions in 5G RAN
- AUSF (Authentication Server Function): Authenticates UEs
- UDM (Unified Data Management): Manages user identity, including generation of authentication credentials and access authorization
- S/UDSF (Structure/Unstructured Data Storage Function): Used to store structured/unstructured data (unstructured ex.: key-value)
- PCF (Policy Control Function): Manages the policy rules for the rest of the Mobile Core CP
- NEF (Network Exposure Function): Exposes selected capabilities to third-party services, and so is similar to an API Server
- NRF (Network Repository Function): Used to discover available services (network functions), similar to a Discovery Service
- NSSF (Network Slice Selection Function): Manages how network slices are selected to serve a given UE

Modules vs Services

Reference Point Architecture (RPA)



Service Based Architecture (SBA)

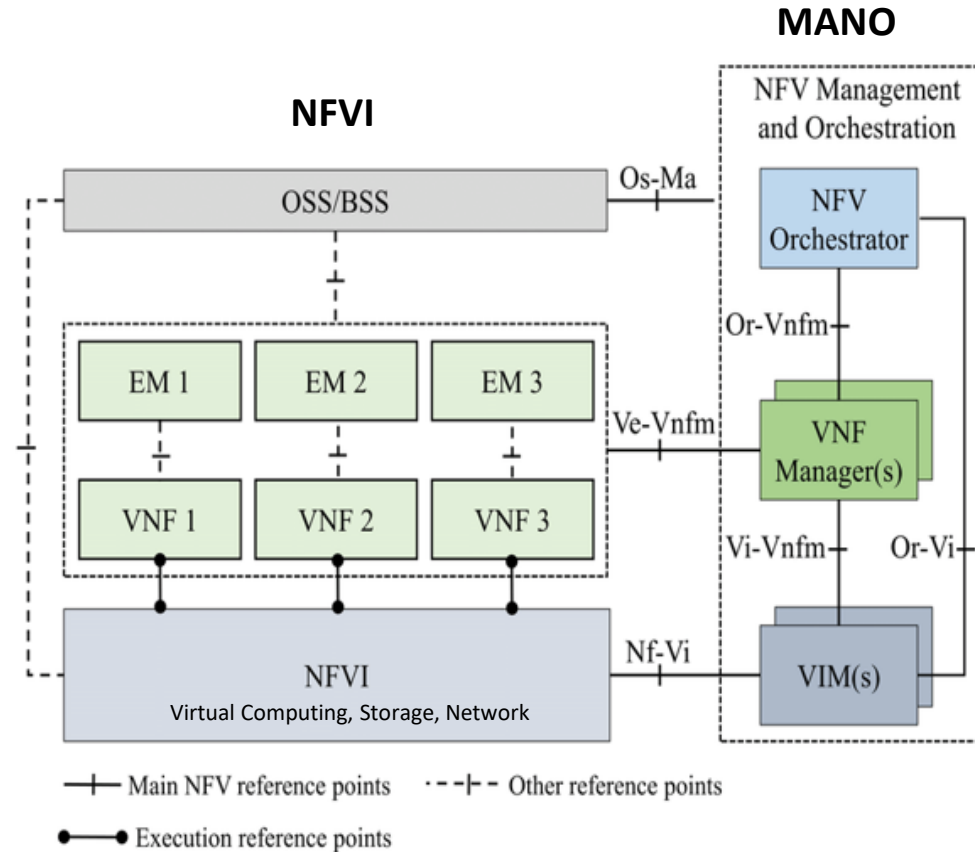


- eMBB, mMTC and URLLC έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από μια μονολιθική αρχιτεκτονική, το 5G Core πρέπει να είναι ευέλικτο και να μπορεί να κλιμακώνεται ανεξάρτητα για τις διαφορετικές εφαρμογές
- Service Based Architecture (SBA) αντικαθιστά τα Network Elements στο Reference Point Architecture (RPA) με Network Functions (NF)
 - Κάθε NF παρέχει υπηρεσίες σε άλλα NF, δεν υπάρχει μόνο ένα network element για όλο το δίκτυο
- Οφέλη SBA
 - Επιτρέπει NFs να εκτελούνται ανεξάρτητα και να αυτοδιαχειρίζονται χωρίς να επηρεάζουν το ένα το άλλο
 - Επιτρέπει τη δημιουργία υπηρεσιών συνθέτοντας και ενορχηστρώνοντας NF
 - Ευκολότερη ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και λειτουργιών, καθώς και δυναμική κλιμάκωση των πόρων τους με βάση τη ζήτηση

NFV and MANO

Network Function Virtualization Infrastructure (NFVI)

- Operation/Business Support System (OSS/BSS)**
 Δημιουργία υπηρεσιών, διαχείριση πελατών, τιμολόγηση
- Element Manager (EM)**
 Διαχειρίζεται και ελέγχει ένα μεμονωμένο VNF, διασφαλίζοντας τη σωστή τους διαμόρφωση, παρακολουθεί και διαχειρίζεται σφάλματα
- Virtual Network Functions (VNF)**
 Λειτουργίες δικτύου που βασίζονται σε λογισμικό και τρέχουν σε commodity HW
- Network Function Virtualization Infrastructure (NFVI)**
 Η υποκείμενη υποδομή HW (compute, storage, network) που είναι εικονοποιημένη για να υποστηρίξει την εκτέλεση VNFs

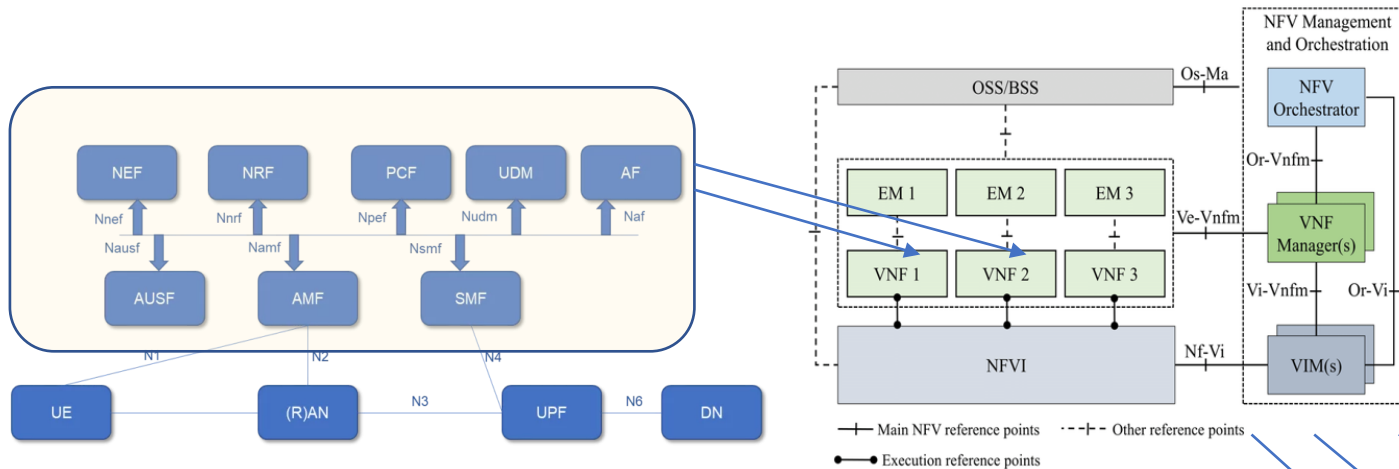


MANO (management & orchestration)

λειτουργίες και διαδικασίες για τη διαχείριση και την ενορχήστρωση εικονικοποιημένων πόρων και υπηρεσιών

- Virtualized Infrastructure Manager (VIM)**
 Διαχειρίζεται τον κύκλο ζωής των εικονικών πόρων σε έναν NFVI: δημιουργεί, διατηρεί και καταστρέφει εικονικές μηχανές (VM) από φυσικούς πόρους σε ένα NFVI
- VNF Manager (VNFM)**
 Διαχειρίζεται τον κύκλο ζωής των VNF: δημιουργεί, διατηρεί και τερματίζει VNFs
- NFV Orchestrator (VNFO)**
 Διαχειρίζεται και ενορχηστρώνει τον κύκλο ζωής των VNFs: ανάπτυξη VNF, κλιμάκωση, παρακολούθηση και δημιουργίας αλυσίδας υπηρεσιών, διασφαλίζοντας αποτελεσματική κατανομή πόρων και συντονισμό στην NFVI

5G in edge and core Cloud

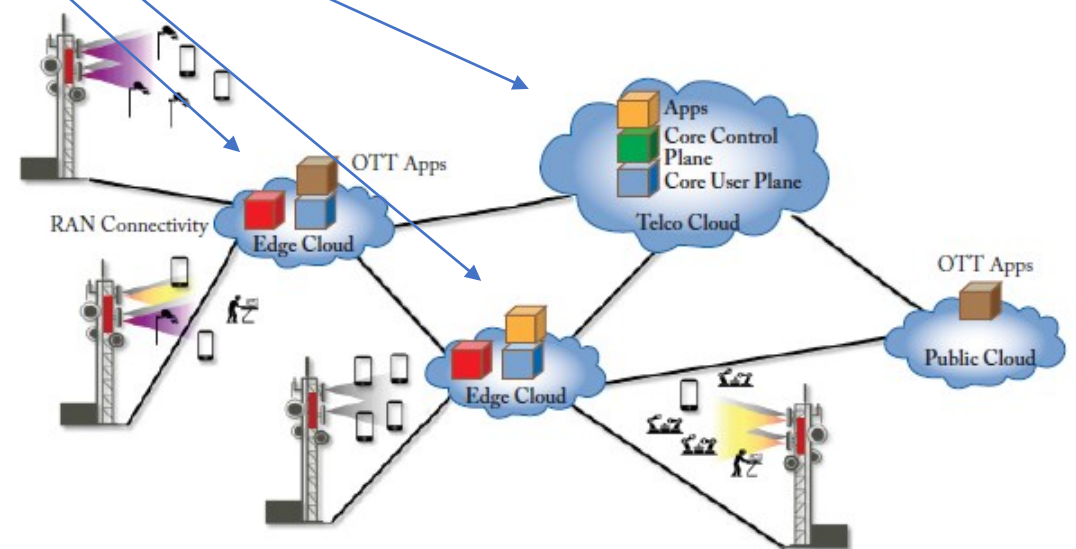


Τα τμήματα/συναρτήσεις ελέγχου του 5G core εκτελούνται ως εικονικές δικτυακές συναρτήσεις (virtual network functions - VNF) σε Cloud υποδομές (commodity HW) χρησιμοποιώντας το MANO για να τις διαχειριστεί και ενορχηστρώσει

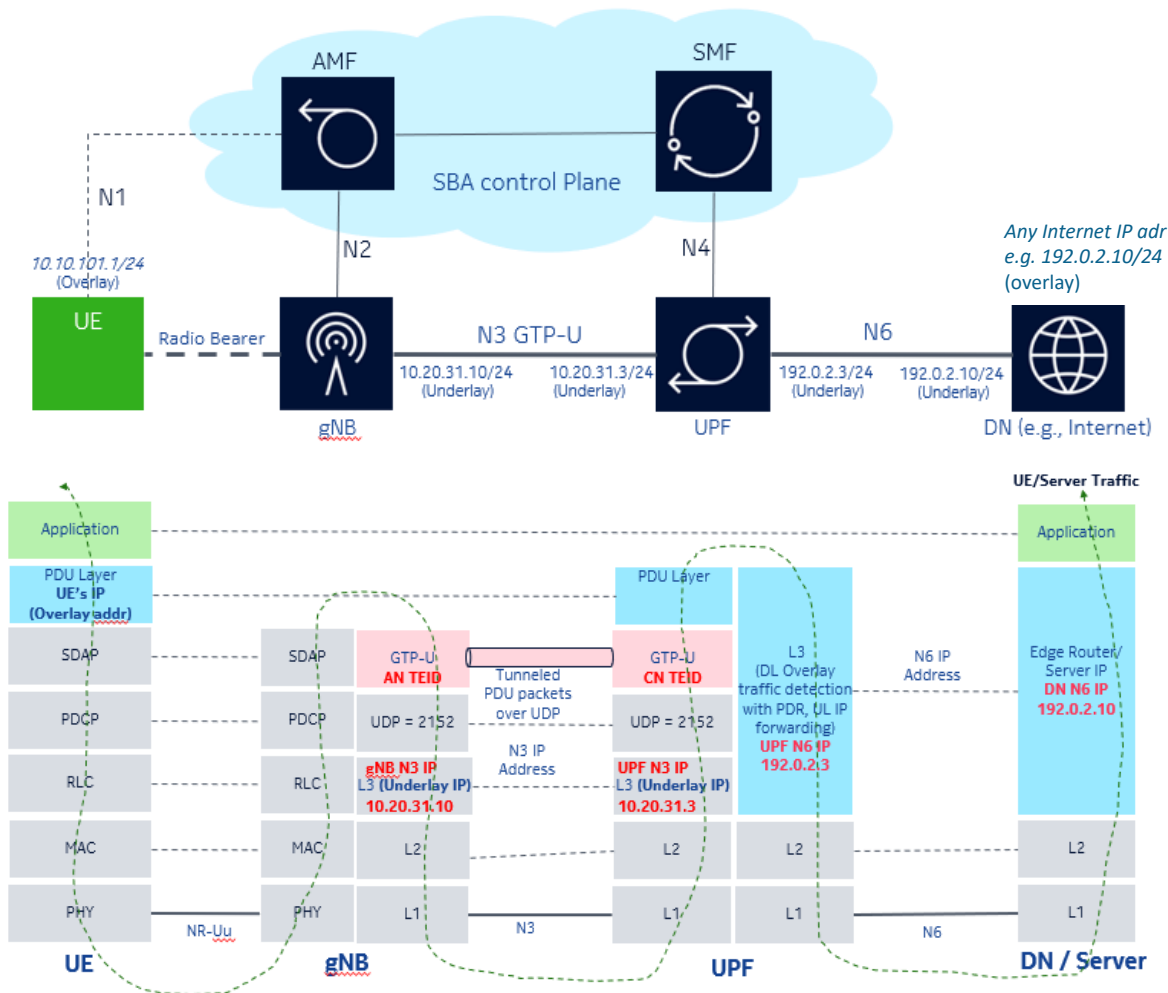
Οι λειτουργίες 5G Core UP και CP και οι (τελικές) εφαρμογές (δεν μπορεί να εκτελεστεί πριν από το 5G Core UP) μπορούν να εκτελούνται σε διαφορετικά σημεία στο Cloud (Edge ή Core Cloud)

Edge Cloud for 5G: MEC - Mobile (or Multi-access) Edge Computing

Ειδικά για περιπτώσεις χρήσης URLLC, είναι σημαντικό να έχουμε το Core UP και την εφαρμογή (server side) κοντά στον πελάτη (User Equipment)



5G User Plane Function



5G UPF Σήραγγες (tunnels):

- Το datagram του κινητού ενθυλακωμένο με χρήση GPRS (General Packet Radio Service) Tunneling Protocol (GTP) και αποστέλλεται μέσα σε UDP datagram στο UPF
- Εύκολη υποστήριξη κινητικότητας για τα UEs που έχουν 'επίπεδες' IP διευθύνσεις (όχι ιεραρχικές με βάση την τοποθεσία / BS)

Access & Mobility Management Function: διαχείριση ελέγχου πρόσβασης, κινητικότητας και συνεδριών

Session Management Function: εγκατάσταση, τροποποίηση και τερματισμός συνεδριών στον πυρήνα του 5G δικτύου

Service Data Application Protocol: αντιστοίχιση πακέτων σε QoS flow ID

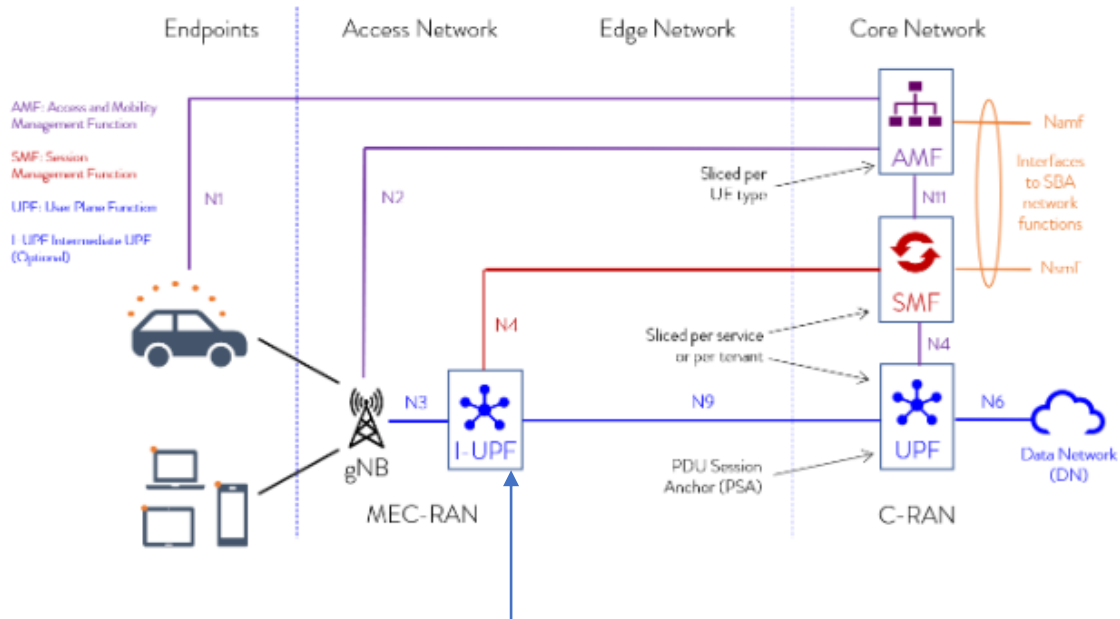
Packet Data Convergence Protocol: συμπύεση κεφαλίδας, κρυπτογράφηση

Radio Link Control: αρίθμηση, τμηματοποίηση/ συναρμολόγηση πακέτων, αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest)

Multiple Access Control: πρόσβαση στο κοινό μέσο, ανάθεση χρονοθυρίδων/ συχνοτήτων

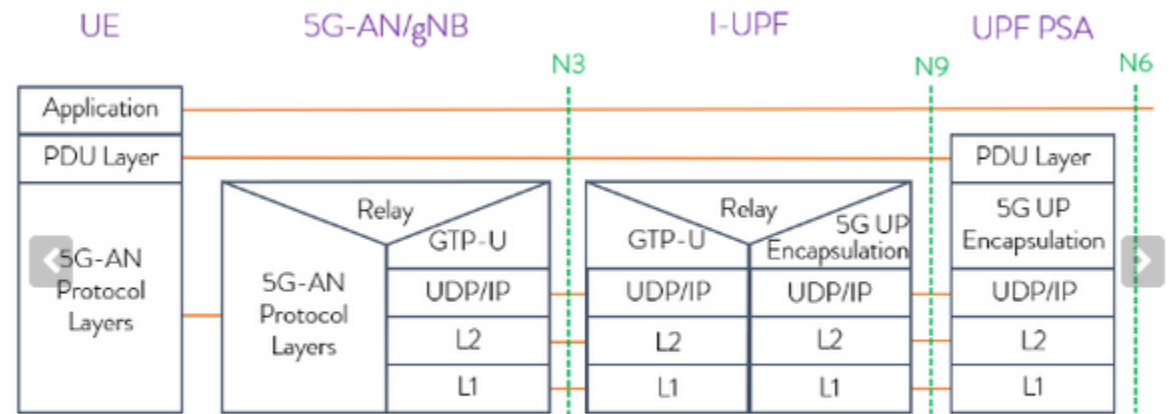
Tunnel Endpoint ID: εκχωρείται σε κάθε User Equipment (UE), χρησιμοποιείται στα gNB και UPF για να αντιστοιχεί σήραγγα GTP σε UE (αντί IP διευθύνσεις)

5G User Plane Function



Intermediate UPF (I-UPF)

Uplink Classifier (UL-CL) (directing flows to specific data networks based on traffic matching filters), in other terms, a branching point



5G User Plane Protocol Stack, employing STP with 5G header extensions

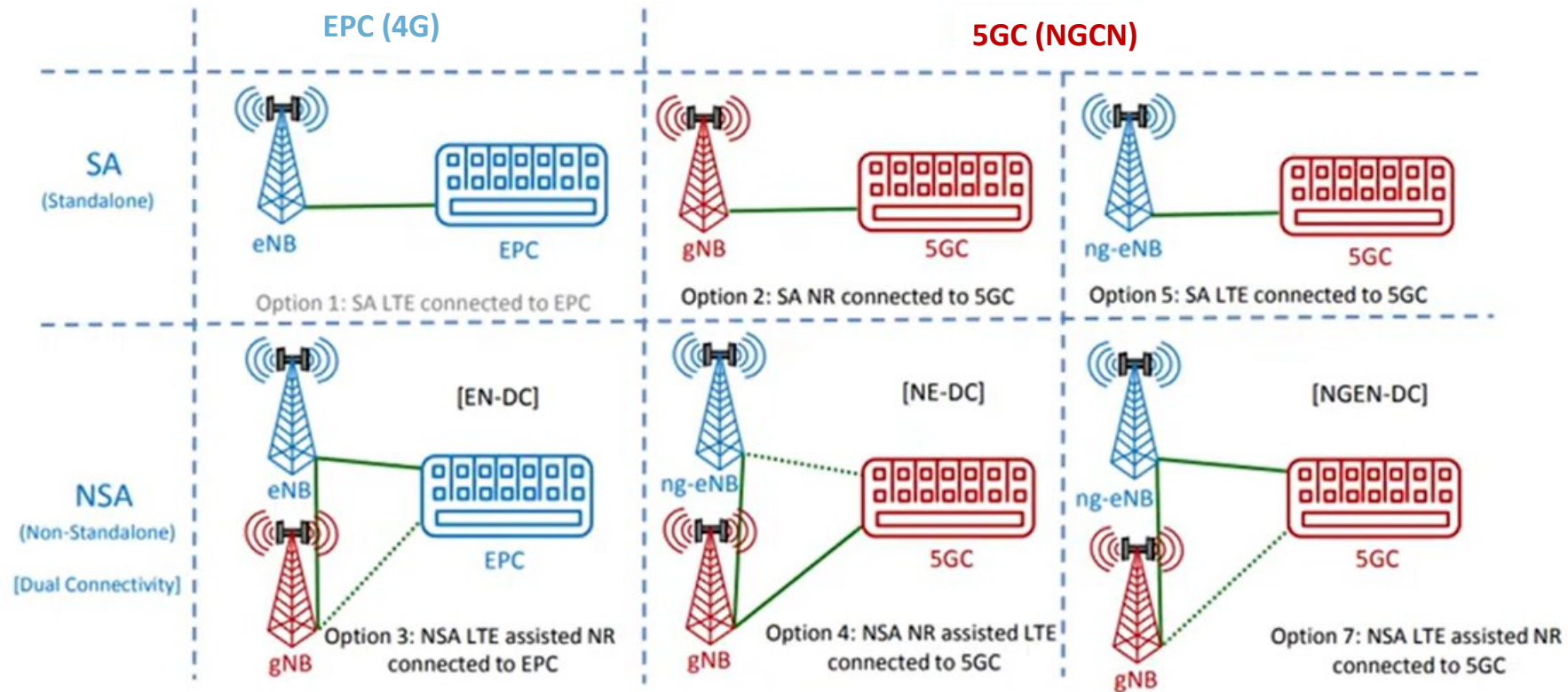
Κινητά Δίκτυα

- Εισαγωγή
 - Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
 - Γενιές κυψελοειδών δικτύων
- Ραδιοφάσμα
- 4G LTE
 - Αρχιτεκτονική
 - Radio Access Network (RAN)
 - Evolved Packet Core (EPC)

- 5G
 - Numerology/Radio frames
 - Cloud-RAN
 - 5G Core
 - **Deployment options, slicing**

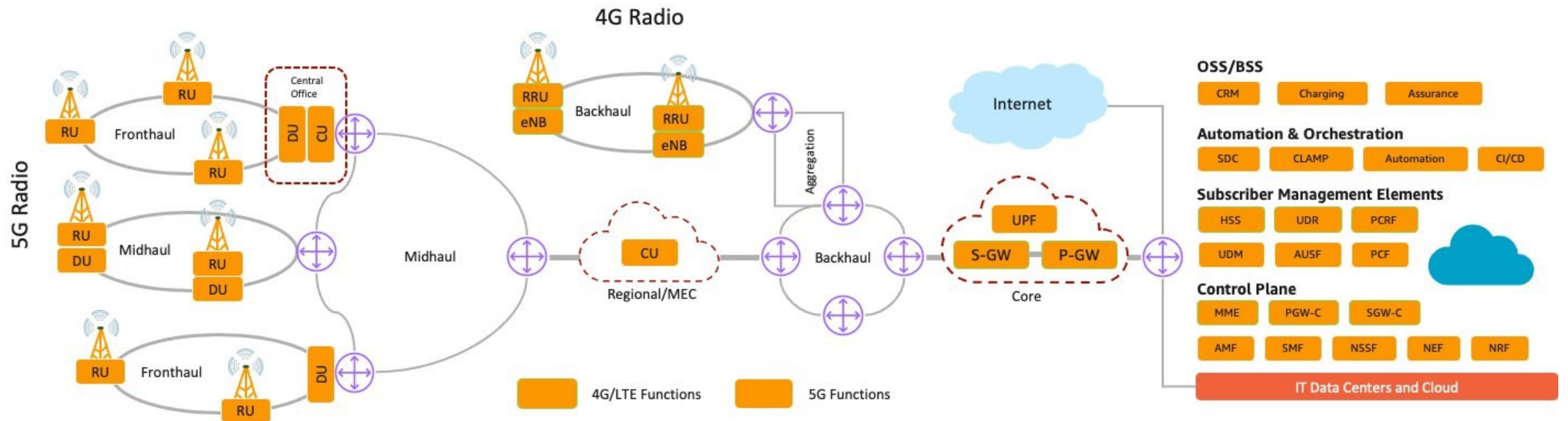


5G deployment options



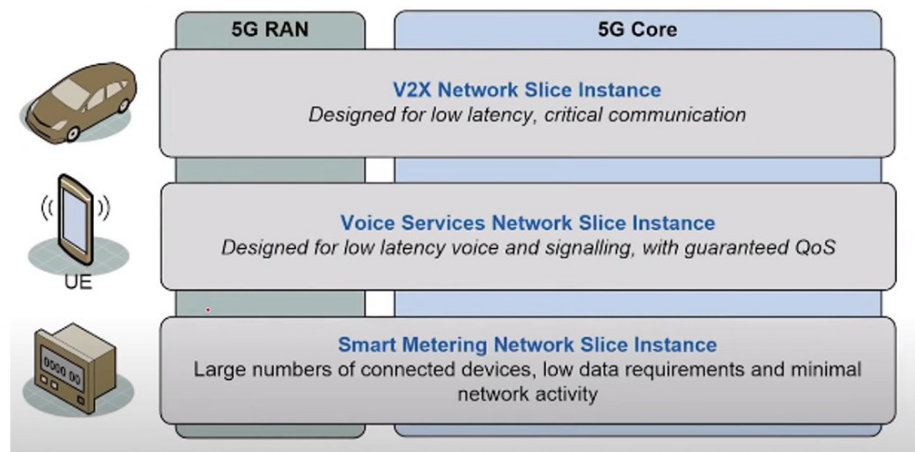
- Δυνατές επιλογές εγκατάστασης/συνύπαρξης 5G και 4G
- Ο κάθε πάροχος (ανάλογα με το προϋπάρχον δίκτυο 4G που έχει και τον ρυθμό εγκατάστασης 5G κεραιών και πυρήνα) επιλέγει μια από αυτές
 - μπορεί να κάνει διαφορετικές επιλογές σε διαφορετικές τοποθεσίες ή/και να αλλάξει επιλογή με την πάροδο του χρόνου

RAN and Core placement scenarios



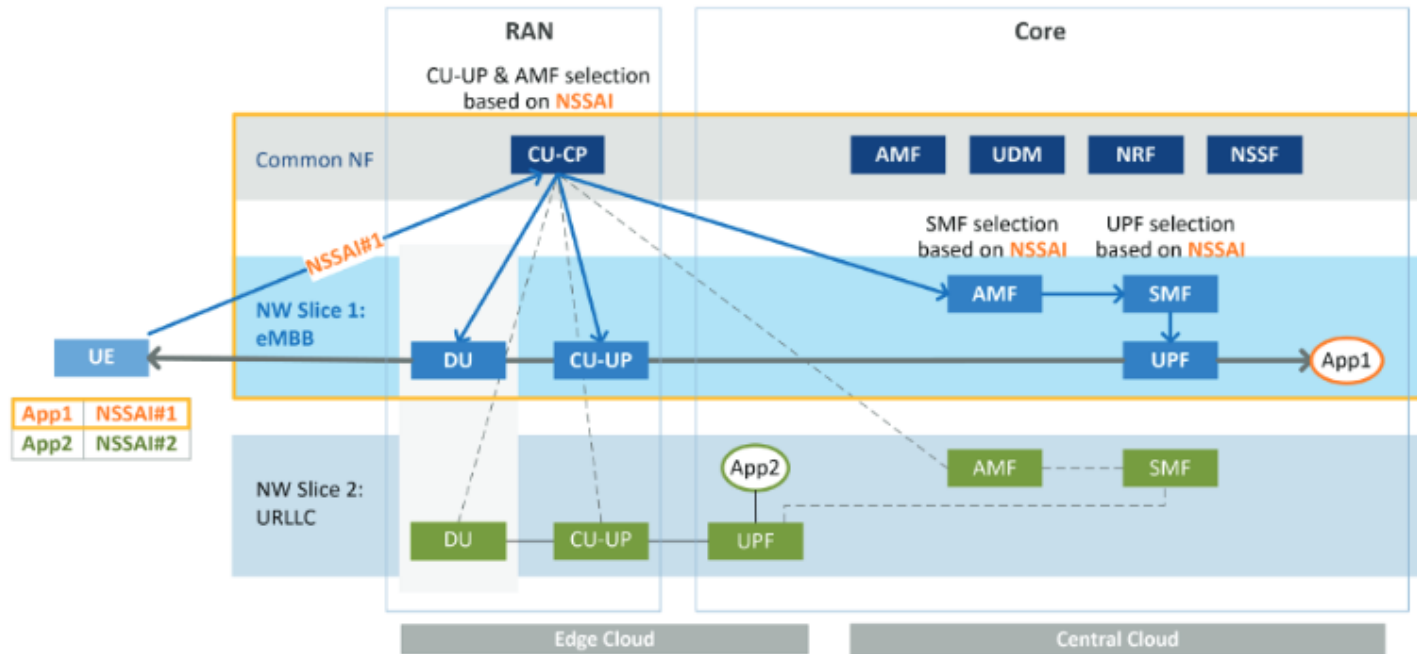
Τμηματοποίηση Δικτύου – Network Slicing

- Η τμηματοποίηση Δικτύου - **Network slicing** είναι βασική για την πραγματοποίηση των υποσχέσεων του 5G και υποστήριξη υπηρεσιών URLLC, eMBB, mMTC
- Το δίκτυο διαιρείται σε πολλαπλά ‘εικονικά δίκτυα’ που καλούνται slices
- Slice: ένα **απομονωμένο από άκρο σε άκρο εικονικό δίκτυο**
- Κάθε slice εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο σενάριο χρήσης (use case) ή ενοικιαστή (tenant), οι απαιτήσεις των slices μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους
 - Για παράδειγμα, ένα slice μπορεί να αφορά αποκλειστικά κίνηση i) αυτόνομη οδήγηση, ένα άλλο ii) τηλεφωνία κλπ, ενώ στο σενάριο πολλαπλών «ενοικιαστών» slices μπορούν να μισθωθούν σε διαφορετικούς διαχειριστές δικτύων



- Ένα UE μπορεί να συμμετέχει σε πολλά slices (μέχρι 8)
- Ένα slice μπορεί να έχει πολλά UE σε ένα ή περισσότερα BSs

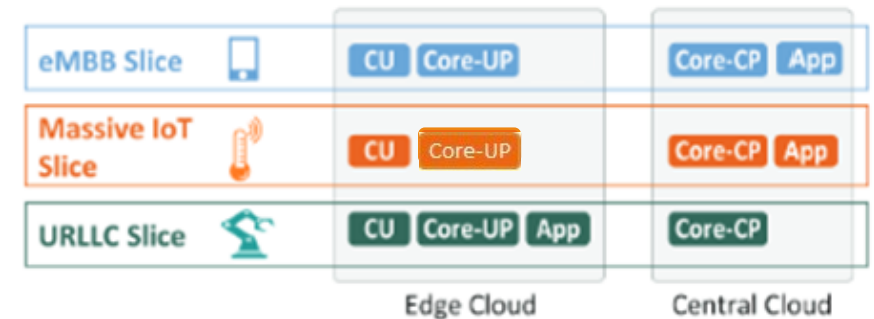
Slicing – under the hood



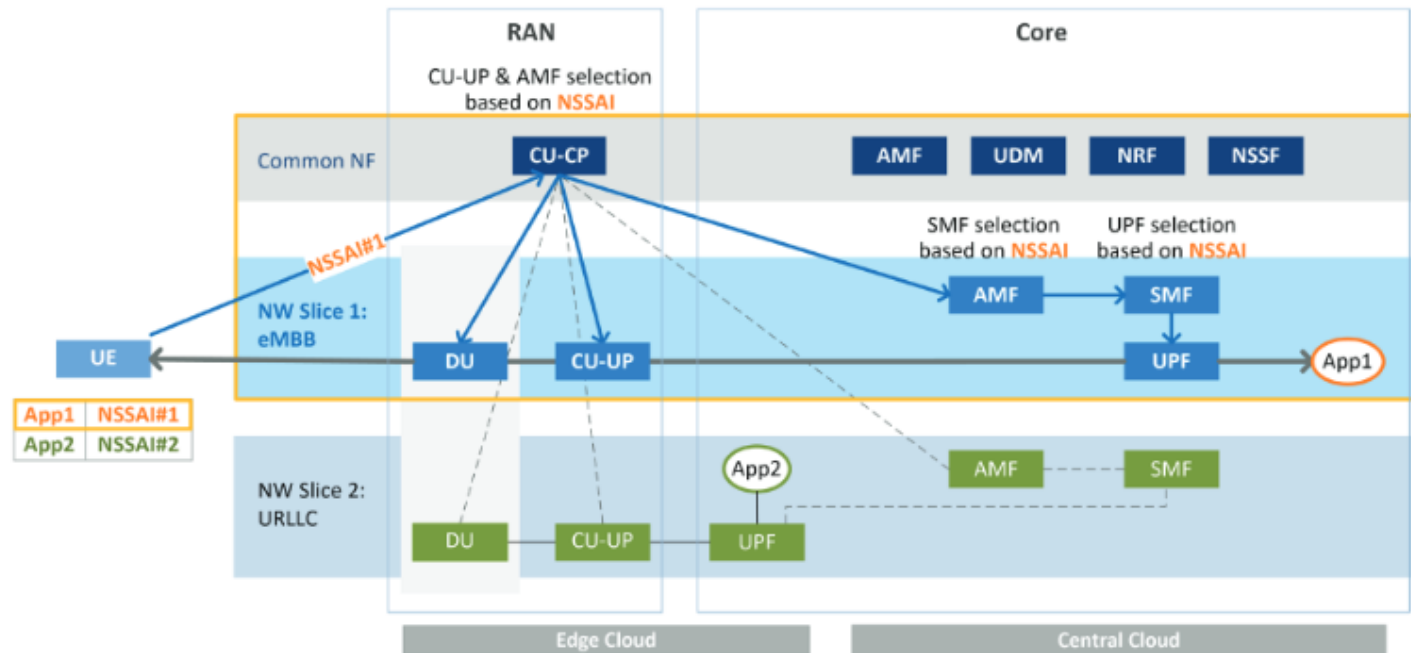
- Κάθε slice μπορεί να έχει το δικό του user plane pipeline
- Τα DU/CU είναι στην ίδια τοποθεσία για όλα τα slices από το ίδιο RU/BS
- Τα τμήματα του core (UPF & control) μπορεί να είναι διαφορετικά για κάθε slice και να εκτελούνται σε διαφορετικό μέρος (Edge or Core Cloud)
- CU-UPF διαφορετικά tunnel / slice

- Για URLLC slices είναι σημαντικό το UPF και app server να είναι σε μικρή απόσταση από τους χρήστες

(1 km propagation \approx 5 μ s latency, 20 km propagation \approx 100 μ s)



Slicing – under the hood

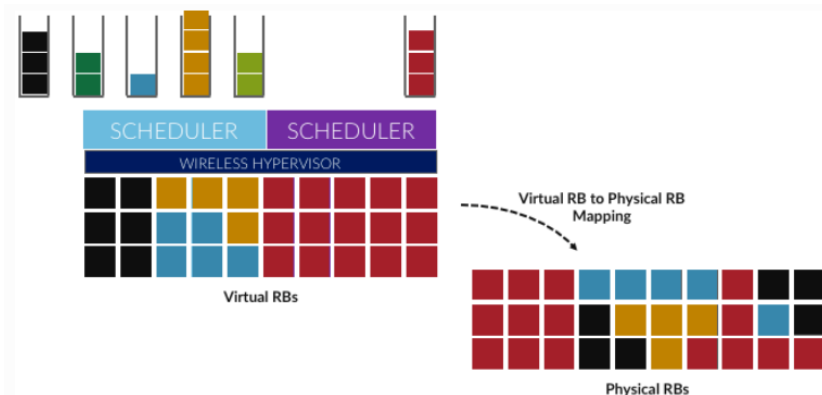


Υλοποίηση

- Στο RAN σχετίζεται με τον χρονοπρογραμματισμό των διαθέσιμων πόρων: στην απόφαση ανάθεση RBs σε UEs
- Στο Core, σχετίζεται με την υλοποίηση διαφορετικών microservices, την κλιμάκωση των στιγμιοτύπων τους και την τοποθέτηση τους στους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους

Slicing στο RAN

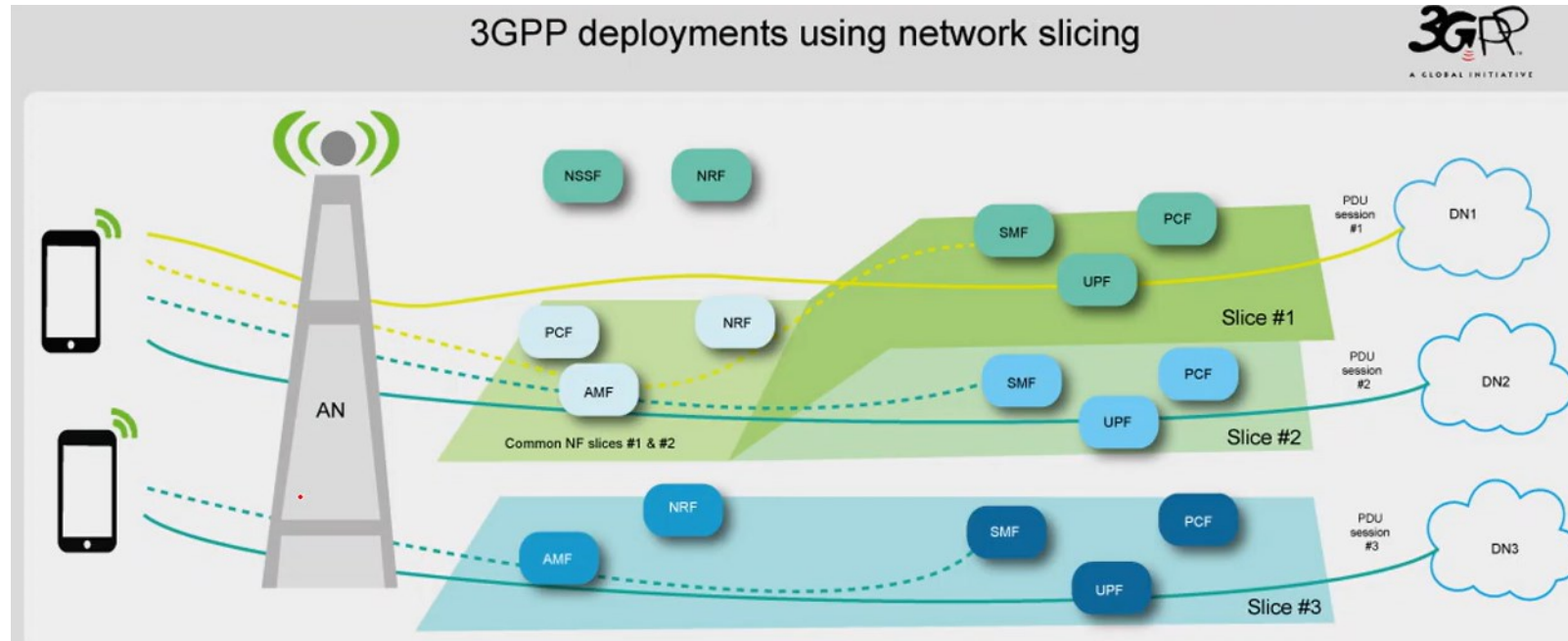
- Ο τεμαχισμός (slicing) μπορεί να γίνει με την πρόσθεση ενός επίπεδο εικονοποίησης μεταξύ του scheduler και των Resource Blocks (RBs) *
 - Το σύνολο των πραγματικών (φυσικών -physical) RB σπάει σε υπο-σύνολα εικονικών (virtual) RB, το καθένα ένα υποσύνολο δίνεται σε ένα slice
 - 2 επίπεδα ανάθεσης: στο πρώτο επίπεδο ο slice scheduler αντιστοιχεί απαιτήσεις κίνησης (του slice του) στα δικά του εικονικά (virtual) RB, στο δεύτερο επίπεδο ο hypervisor αντιστοιχεί τα εικονικά RBs σε φυσικά (physical) RBs
 - Παρόμοια εικονικοποίηση γίνεται και σε υπολογιστικά συστήματα (διαχωρισμός πόρων που διατίθενται σε χρήστη από την απόφαση για το ποιοι φυσικοί πόροι του εκχωρούνται πραγματικά)
- Δεν υπάρχουν πρότυπα (τα παραπάνω είναι μια πιθανή υλοποίηση) – όπως και για τους schedulers – η υλοποίηση επαφίεται στον vendor



Παράδειγμα διαχωρισμού των physical RBs σε 2 υποσύνολα ίσου μεγέθους για 2 slices. Ο scheduler που σχετίζεται με κάθε slice/σύνολο είναι ελεύθερος να εκχωρεί τα δικά του Virtual RB στους χρήστες ανεξάρτητα από τον άλλο. Ο hypervisor συνδυάζει τις αποφάσεις τους.

* Resource Block: Η μικρότερη μονάδα πόρων (χρόνος, φάσμα) που μπορεί να ανατεθεί σε ένα χρήστη

Slicing – 5G core



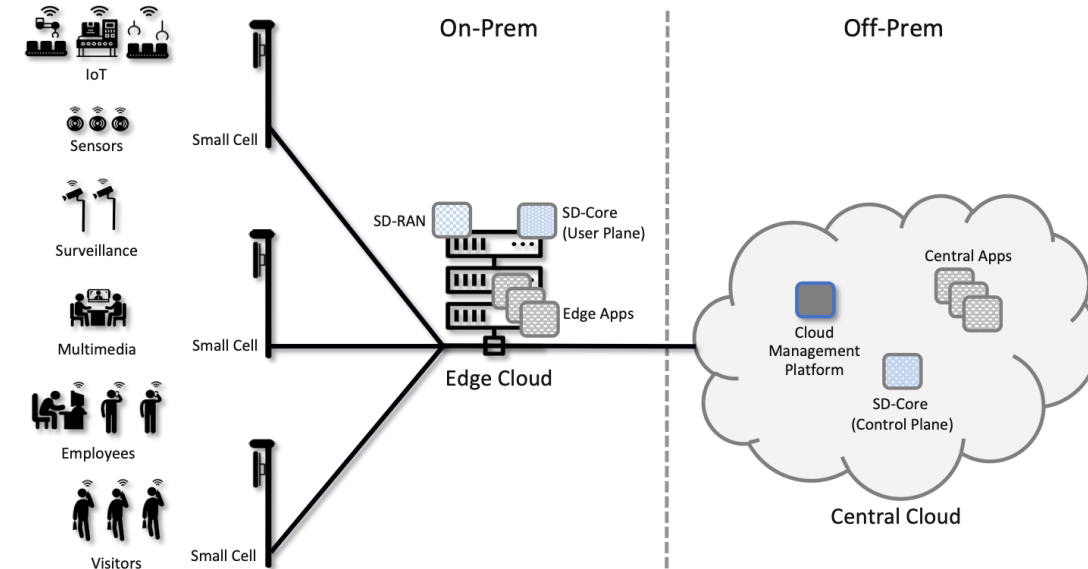
Για την υποστήριξη slicing πέρα από το RAN απαιτείται και slicing του Mobile Core

Το Slicing του Mobile Core μπορεί να περιλαμβάνει

- Υλοποίηση UPF με κατάλληλους μηχανισμούς QoS και κατάλληλη τοποθέτηση τους στις συσκευές
 - π.χ. μεταγωγείς / δρομολογητές: κανόνες προώθησης και εκχώρησης εύρους ζώνης σύμφωνα με τις απαιτήσεις του slice
- Υλοποίηση κατάλληλων control functions / κλιμάκωση / τοποθέτηση τους κατάλληλα στις διαθέσιμες συσκευές
 - Edge cloud: τοποθέτηση και κλιμάκωση των containers που υλοποιούν τα microservice με αρκετό CPU & storage για να υποστηρίξουν τις λειτουργίες του αντίστοιχου slice
- Διαχωρισμός ή/και διαμοιρασμός functions ανάλογα με τα slices

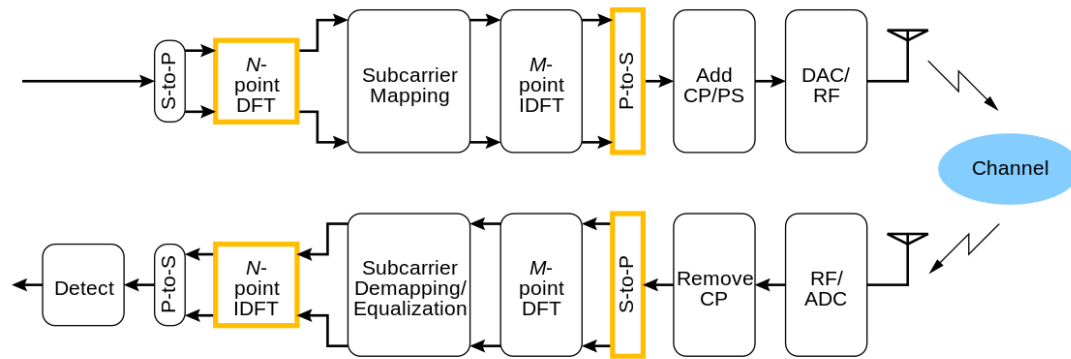
Ιδιωτικά 5G δίκτυα

- Αποκλειστικό δίκτυο 5G για μια επιχείρηση / οργανισμό
 - Factory automation, transport industry, electrical power, AR, etc
- Small cells, όλο το δίκτυο μέσα στην επιχείρηση (on-premises) ή/και σε πολλαπλές τοποθεσίες (multi-location)
 - Τοπικός έλεγχος ή συνδυασμός τοπικού και απομακρυσμένου (Cloud) ελέγχου
 - Τοπικός τερματισμός εφαρμογής ή μίξη τοπικού και απομακρυσμένου (Cloud) τερματισμού
 - Local to satisfy low latency (URLLC) and sensitivity
- Licensed, unlicensed, shared spectrum



Backup

SC-FDMA



* $N < M$

* S-to-P: Serial-to-Parallel

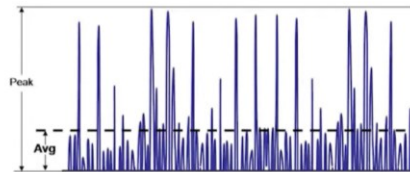
* P-to-S: Parallel-to-Serial

SC-FDMA: +

OFDMA:

Peak to Average Power Ratio - PAPR

- OFDM has inherent robustness to radio-channel delay spread
- ... but also suffers from High peak-to-average power ratio
 - Power-amplifier in-efficiency



PAPR of 10 dB means that for transmitting an average power of 0.2 W, the transmitter should be able to handle power peaks of 2.0 W (10 times higher). The result is a very low efficiency or in other words: **high battery power consumption.**

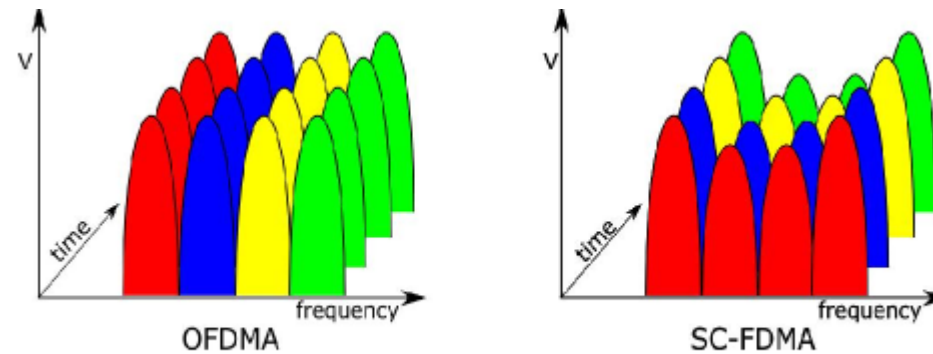
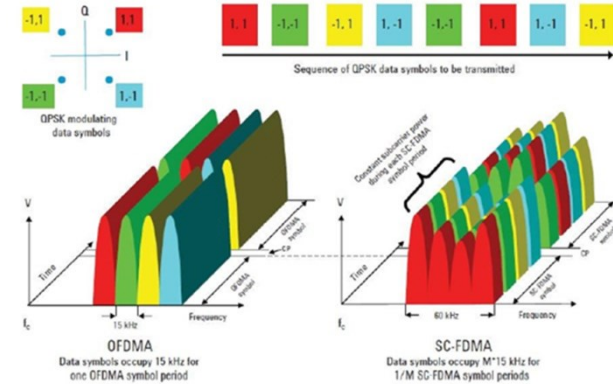
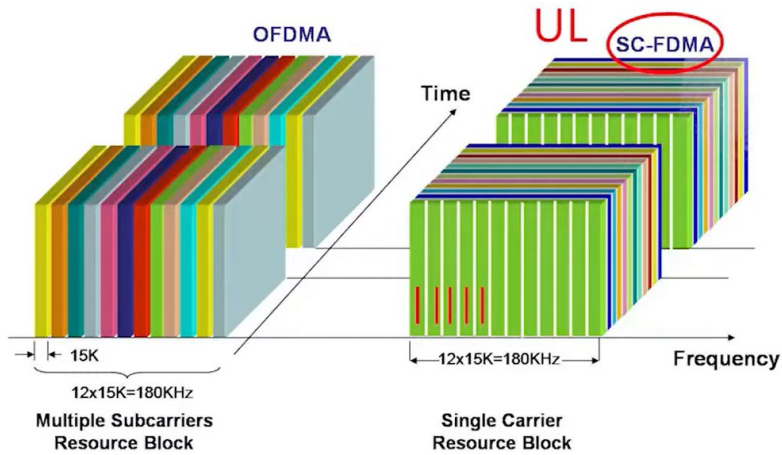


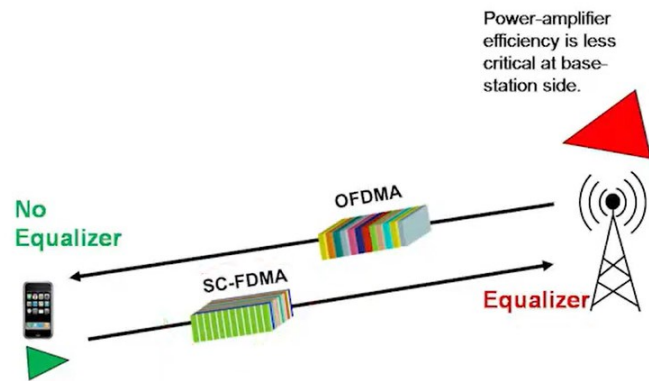
Fig.1. Comparison between OFDMA and SC-FDMA

SC-FDMA vs. OFDMA



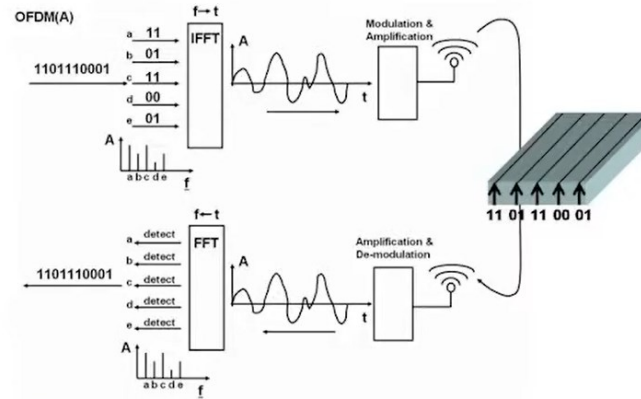
LTE Uplink & SC-FDMA

Downlink OFDMA and Uplink SC-FDMA



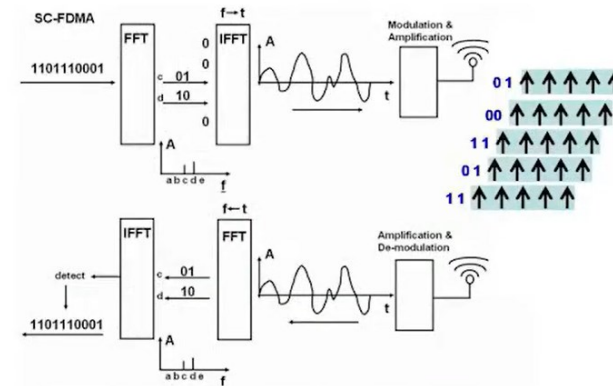
High efficiency power-amplifier is critical in terms of power consumption (battery life) and uplink range

OFDM Generation



- OFDMA transmits a data stream by using several narrow band sub-carriers simultaneously
- In theory, each sub-carrier signal could be generated by a separate transmission chain hardware block.
- Inverse Fast Fourier Transformation (IFFT) is applied (from the frequency domain to time domain).
- This represents the same signal as would have been generated by the separate transmission chains for each sub-carrier when summed up

SC-FDMA Generation



SC-FDMA first runs an FFT over the groups of input bits to spread them over all sub-carriers and then uses the result for the IDFT which creates the time signal.

While SC-FDMA adds additional complexity at both the transmitter and receiver side, the 3GPP standardization body has decided for it to reduce the Peak to Average Power Ratio (PAPR). This is important to lower the power consumption of mobile devices.