



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΤΜΗΜΑ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



Προηγμένες Αρχιτεκτονικές Δικτύων (M132)

Δίκτυα πρόσβασης – Κινητά Δίκτυα

Διδάσκων:

Κωνσταντίνος Χριστοδουλόπουλος

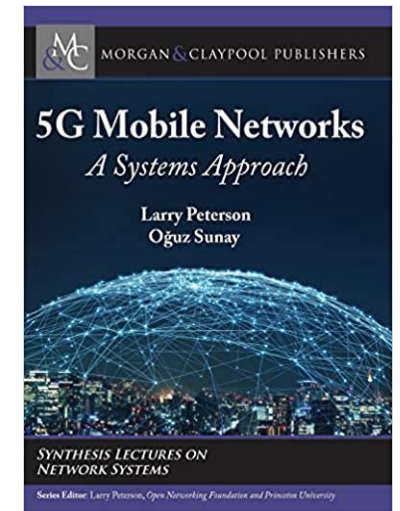
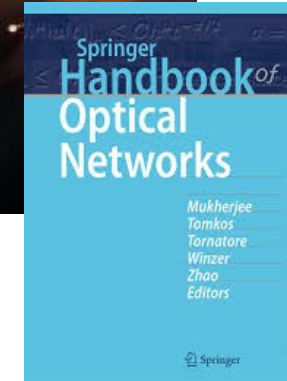
kchristodou@di.uoa.gr

<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, 2022, by Kurose & Ross, Addison-Wesley, 8^η Έκδοση, Ελληνική Μετάφραση: Εκδόσεις : Μ. Γκιούρδας
- 2) Optical Networks: A Practical Perspective, 3rd Edition, 2008, by R. Ramaswami, K. Sivarajan, G. Sasaki, The Morgan Kaufmann Series
- 3) Handbook of Optical Networks, Editors: Mukherjee, Tomkos, Tornatore, Winzer, Zhao, Springer 2020
- 4) 5G Mobile Networks: A Systems Approach, Larry Peterson, Oguz Sunay, and Bruce Davie, MC publishers, (online version: Private 5G: A Systems Approach, 2022)

Κινητά Δίκτυα

■ Εισαγωγή

- Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
- Γενιές κυψελοειδών δικτύων

■ Ραδιοφάσμα

■ 4G LTE

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

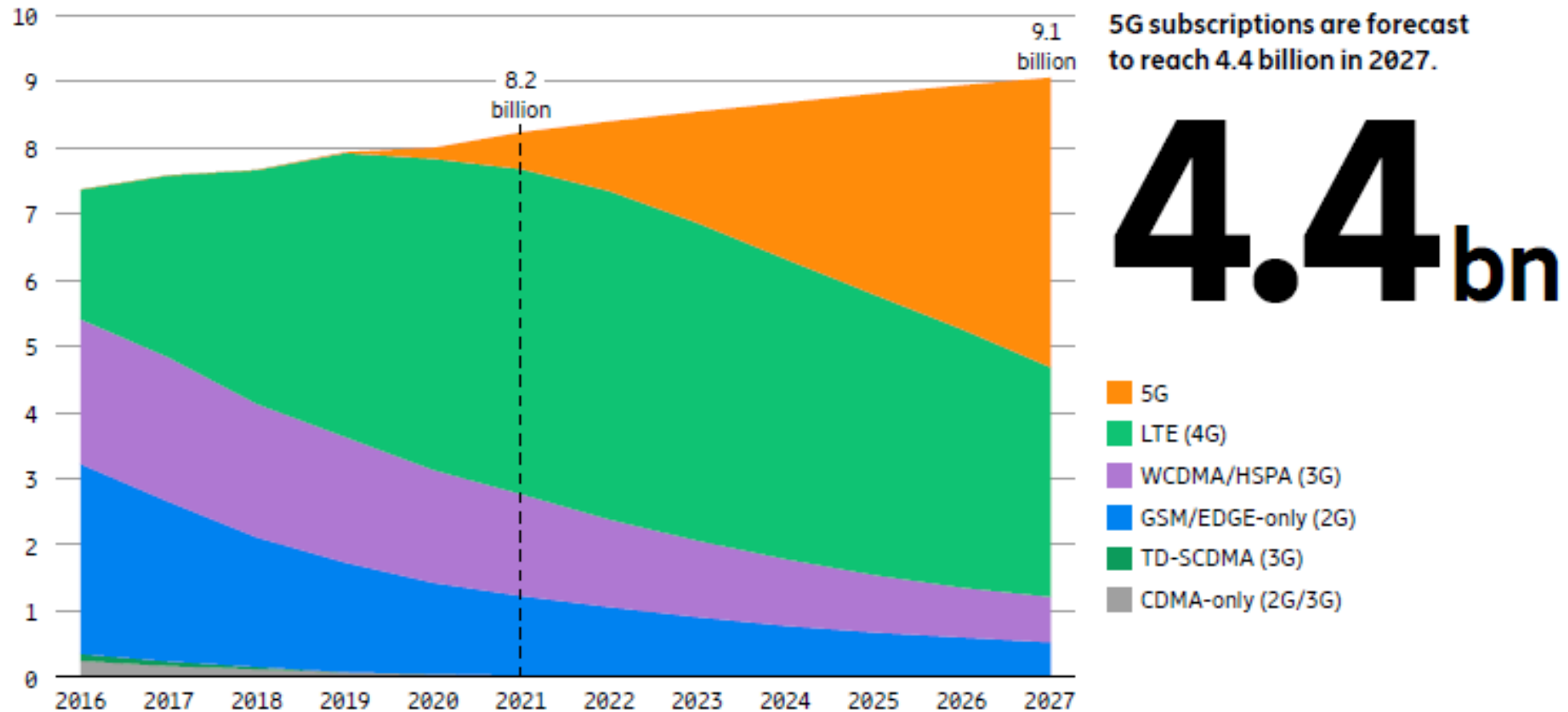
■ 5G

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



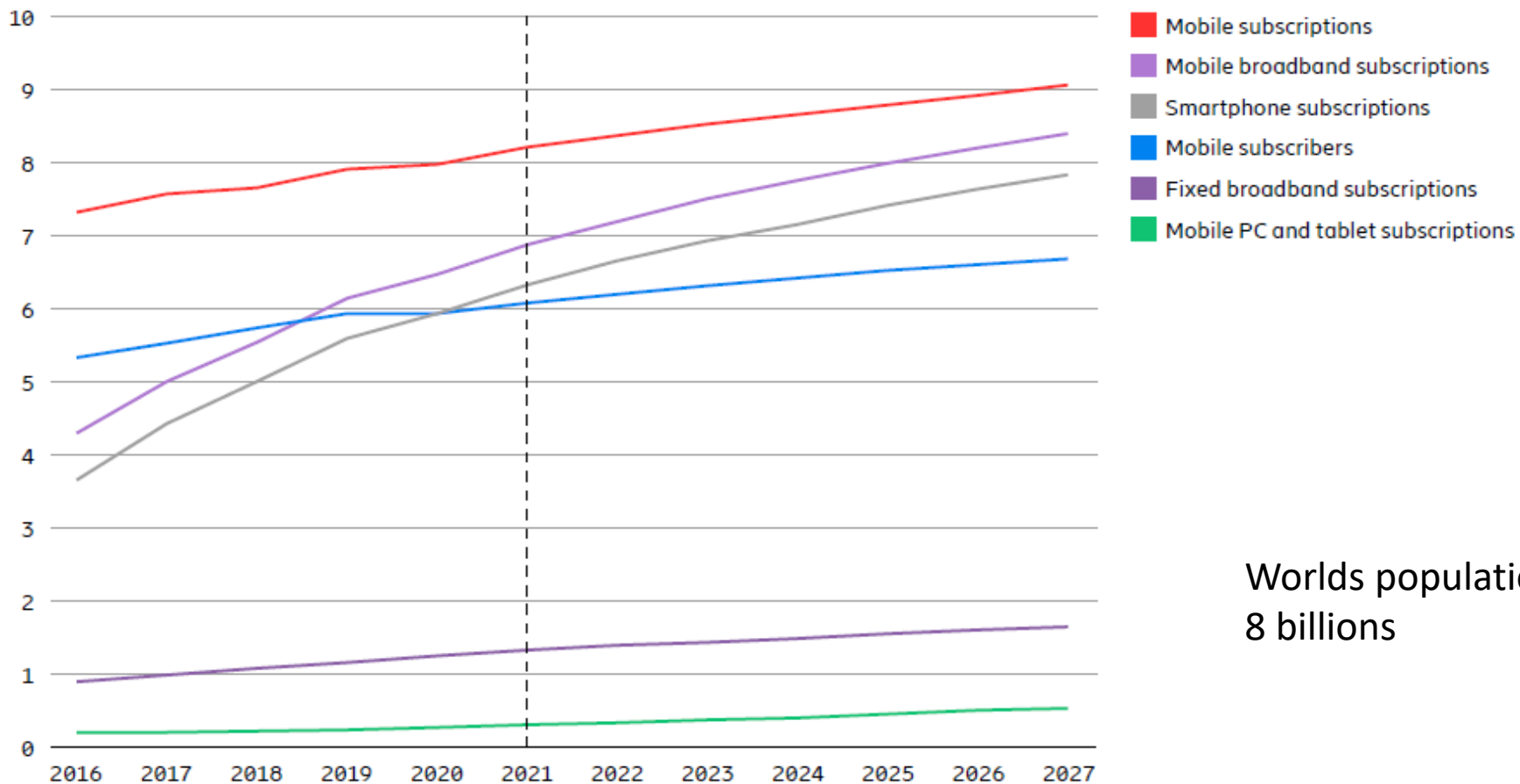
Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

Figure 1: Mobile subscriptions by technology (billion)



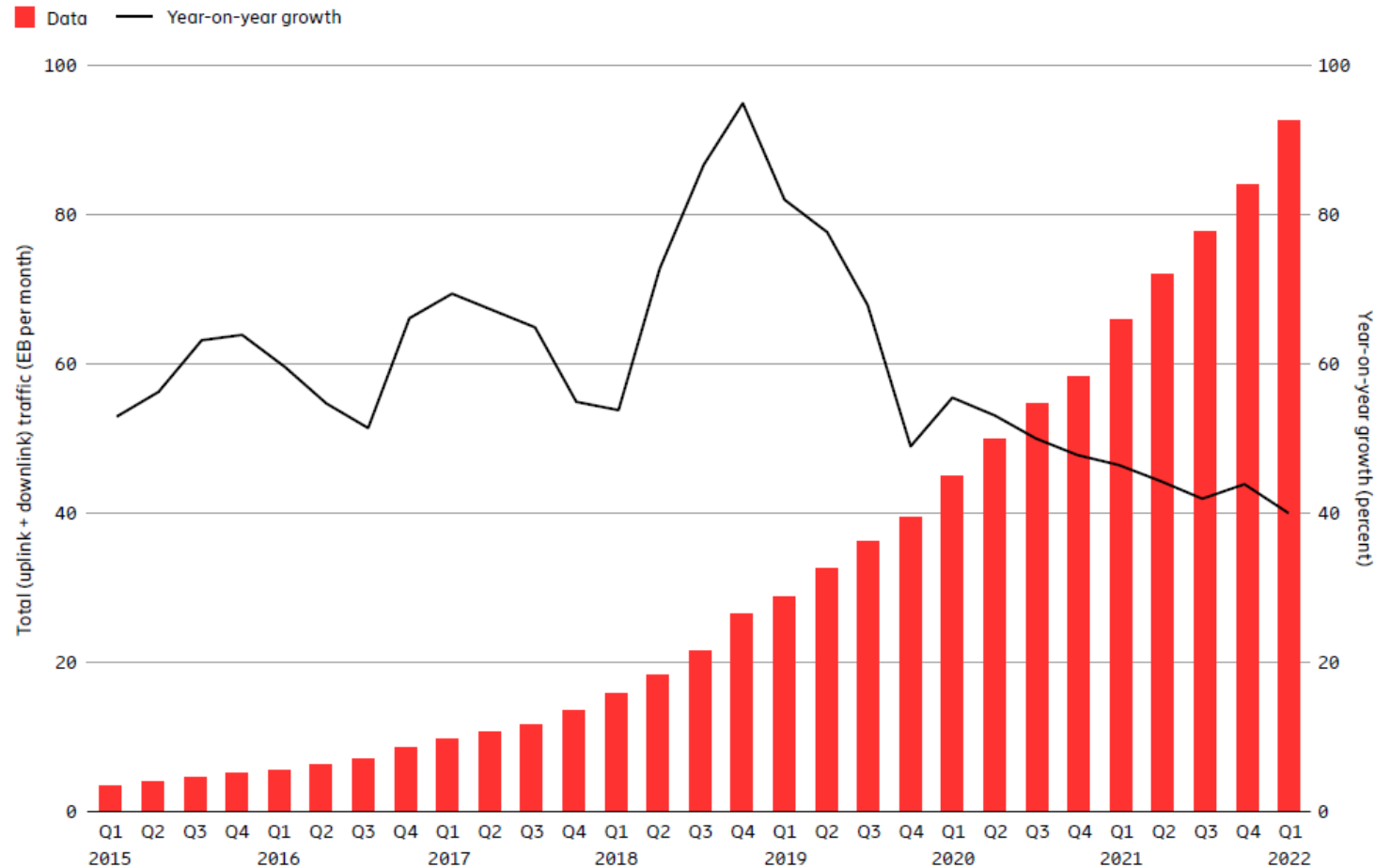
Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

Figure 3: Subscriptions and subscribers (billion)



Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

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

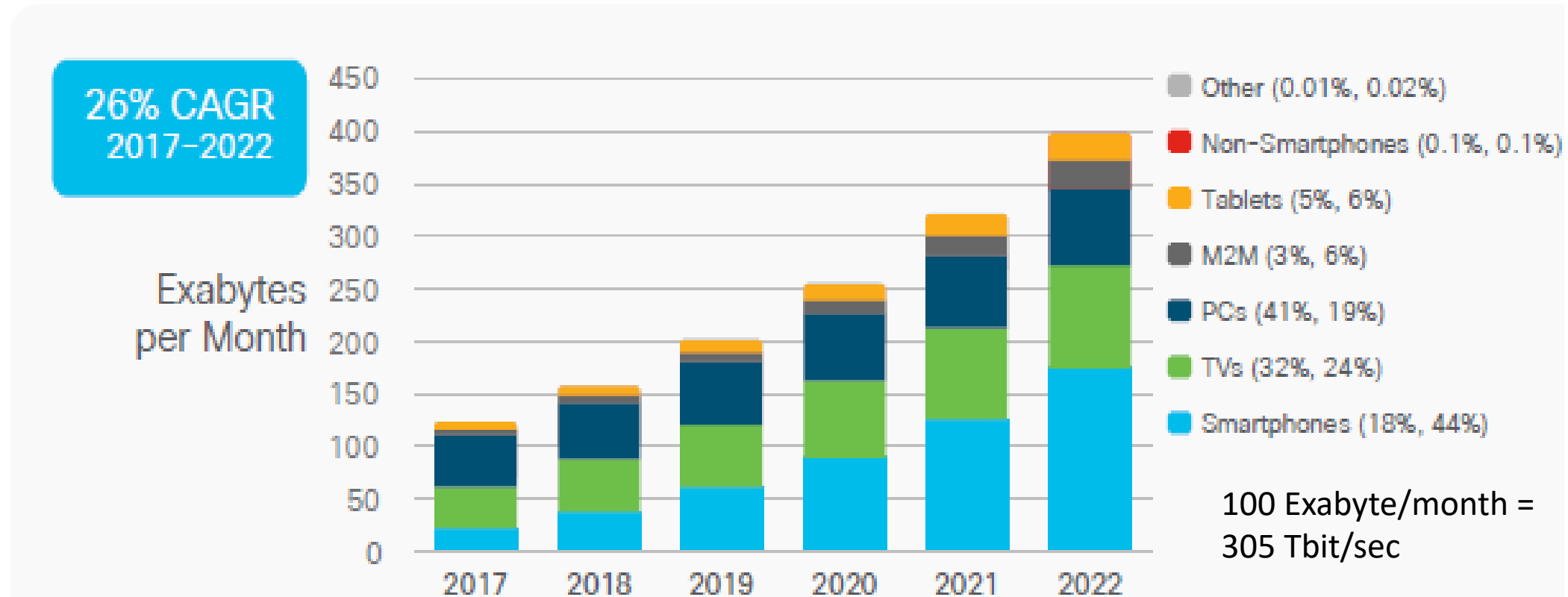


Source: Ericsson traffic measurements (Q1 2022).

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

Ανάπτυξη κινητών επικοινωνιών

Figure 4. Global IP traffic by devices



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

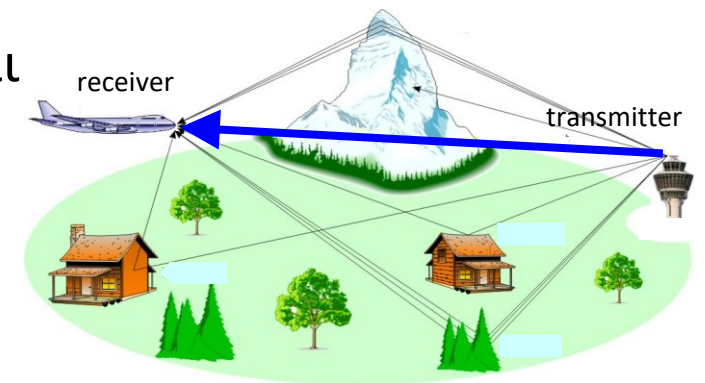
- **Εξασθένηση ισχύς σήματος:** το ραδιοσήμα εξασθενεί καθώς διαδίδεται στον αέρα (τα κύματα διαδίδονται σε 3 διαστάσεις free space path loss FSPL $\sim d^2$, οι υψηλές συχνότητες έχουν μεγάλη εξασθένηση $\sim f^2$) + επιπλέον εξασθένηση από εμπόδια
- **Παρεμβολές από άλλες πηγές:** οι συχνότητες μοιράζονται 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”

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

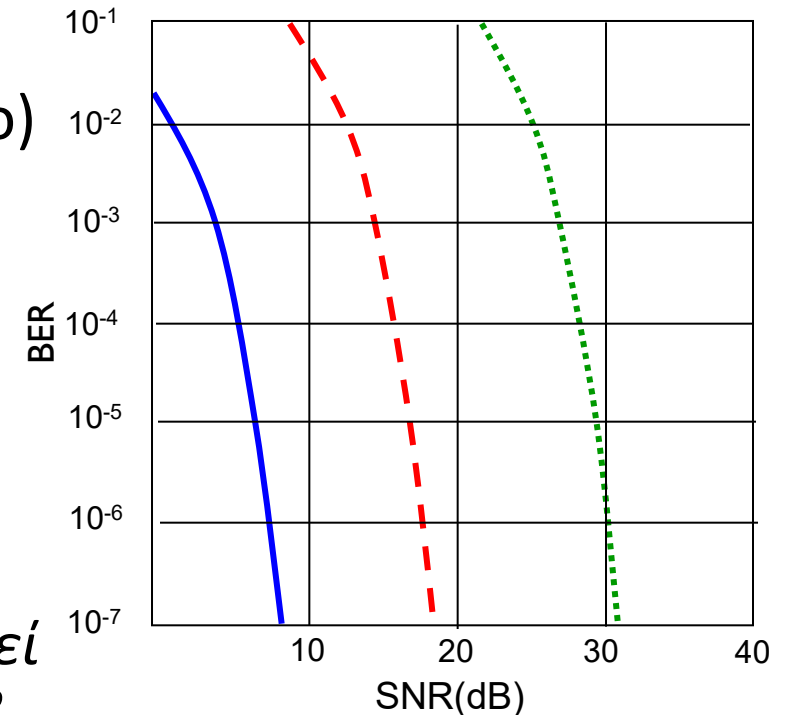
$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{GHz}) + 92.45$$

π.χ. 10 km, 3 GHz: 122 dB



Χαρακτηριστικά ασύρματης ζεύξης (2)

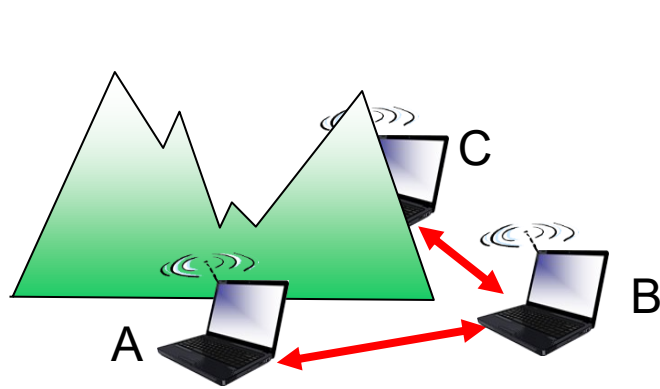
- Αποδεκτή επικοινωνία $BER > \text{όριο FEC (π.χ. } 10^{-2})$
- SNR: signal-to-noise ratio (λόγος σήματος προς θόρυβο)
 - Μεγάλο SNR – ο δέκτης εξάγει ευκολότερα το σήμα από τον θόρυβο
- Διαφορετικές μορφές διαμόρφωσης / διαφορετικές συναρτήσεις **BER – SNR**
 - *δεδομένου καναλιού/θορύβου:*
αύξηση 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)

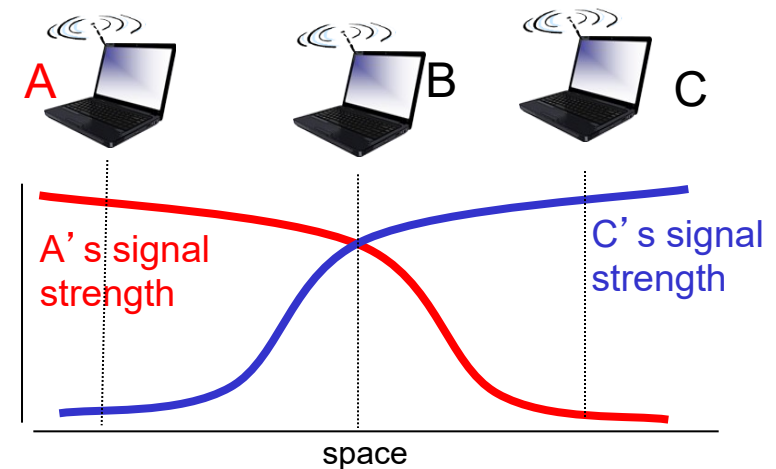
Χαρακτηριστικά ασύρματης ζεύξης (3)

Πρόβλημα κρυμμένου τερματικού (και παραλλαγές) - κυρίως σε δίκτυα WiFi



Πρόβλημα κρυμμένου τερματικού (Hidden terminal)

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



Εξασθένηση σήματος

- B, A ακούει ο ένας τον άλλο
- B, C ακούει 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
 - Διόρθωση λαθών και επαναμεταδόσεις
 - Πιο ισχυροί κώδικες (βαριά επεξεργασία, πλεονασμός - μεγαλύτερη κατανάλωση καναλιού)
 - Επαναμεταδόσεις σε μία ζεύξη (μεγαλύτερη κατανάλωση καναλιού)

4G/5G κυψελωτά δίκτυα

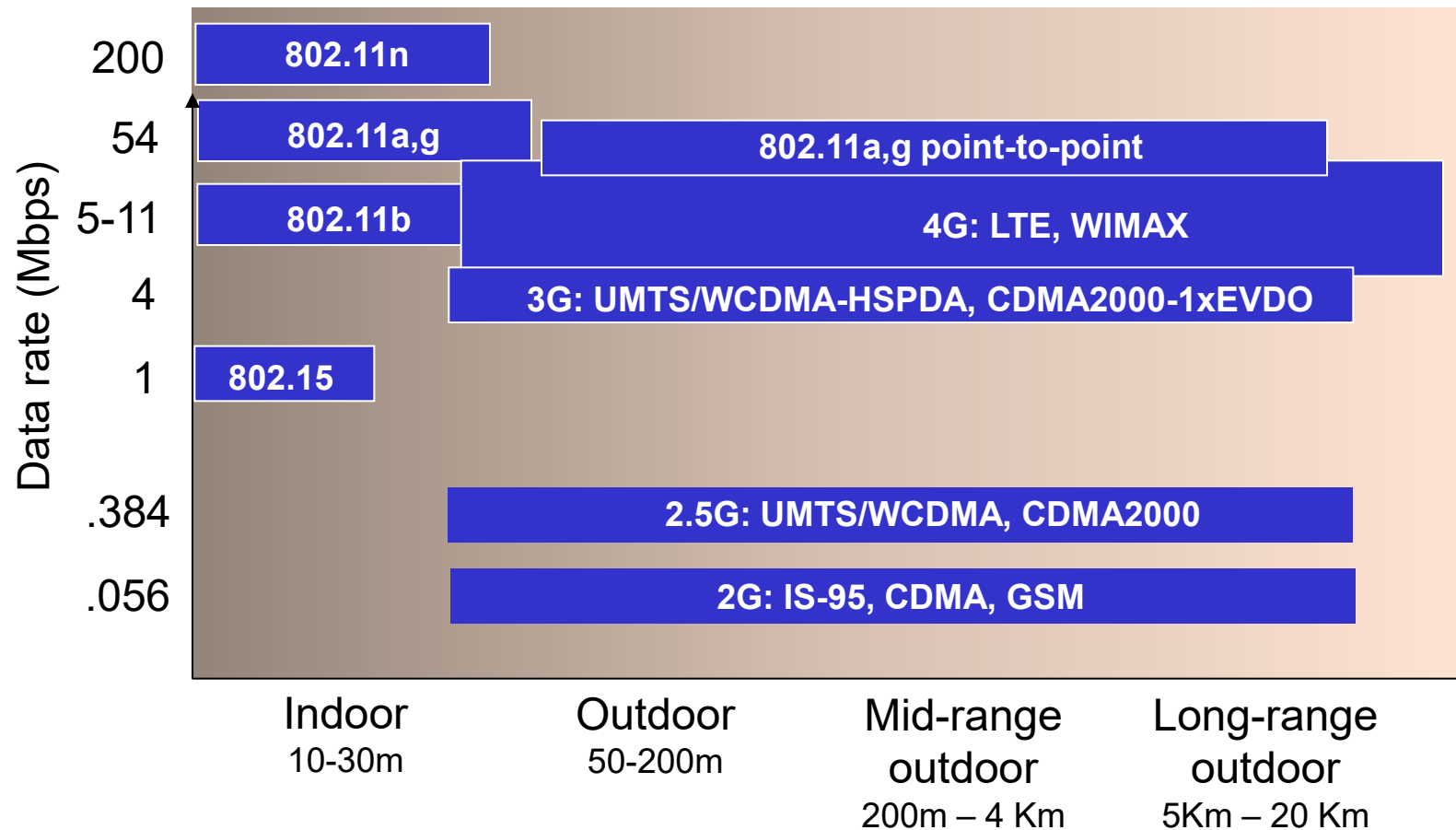
Ομοιότητες με τα ενσύρματα

- Διάκριση άκρης/πυρήνα δικτύου, αλλά και τα δύο ανήκουν στον ίδιο πάροχο στα κυψελωτά
- 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 (στον πυρήνα του κυψελωτού)

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», υπάρχει και η έννοια της περιαγωγής σε επισκεπτόμενα δίκτυα
 - παγκόσμια πρόσβαση, με υποδομή επαλήθευσης ταυτότητας και διακανονισμούς μεταξύ παρόχων

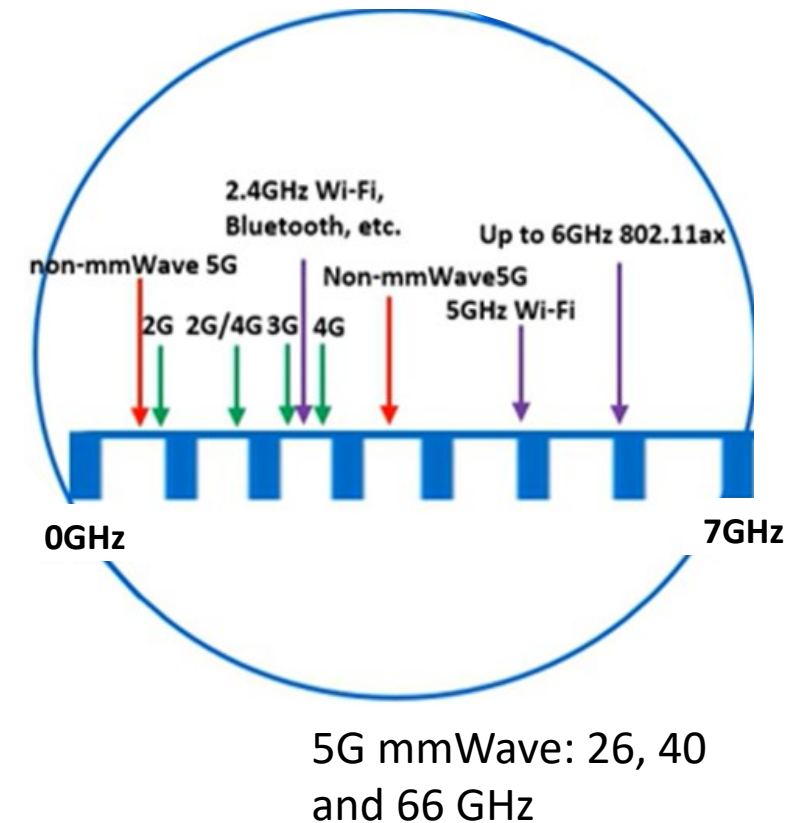
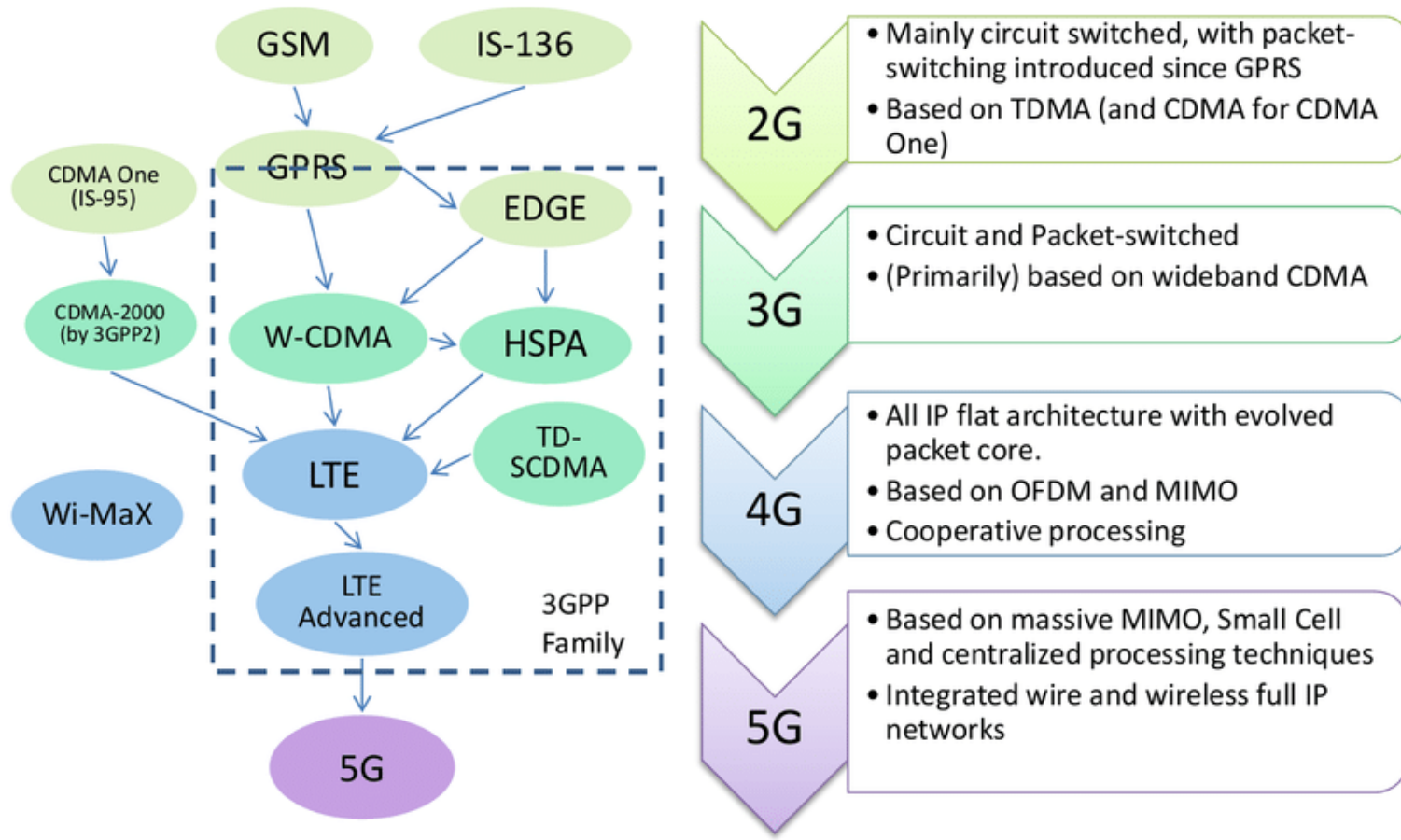
Χαρακτηριστικά επιλεγμένων ασύρματων προτύπων



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

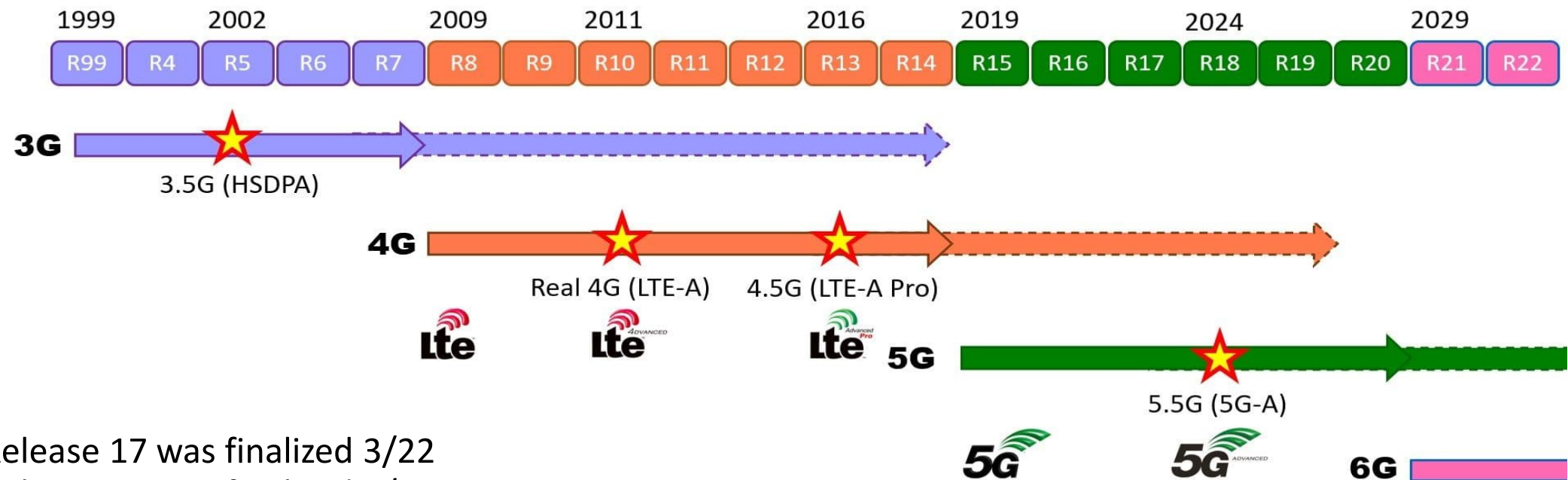


3GPP standards



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 3/24
- Now working on release 19 (plan: 9/25)
- Release 20 will open the field of 6G (plan: 80% completion by June 2026, Stage-3 by 3/2027)



Κινητά Δίκτυα

■ Εισαγωγή

- Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
- Γενιές κυψελοειδών δικτύων

■ Ραδιοφάσμα

■ 4G LTE

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

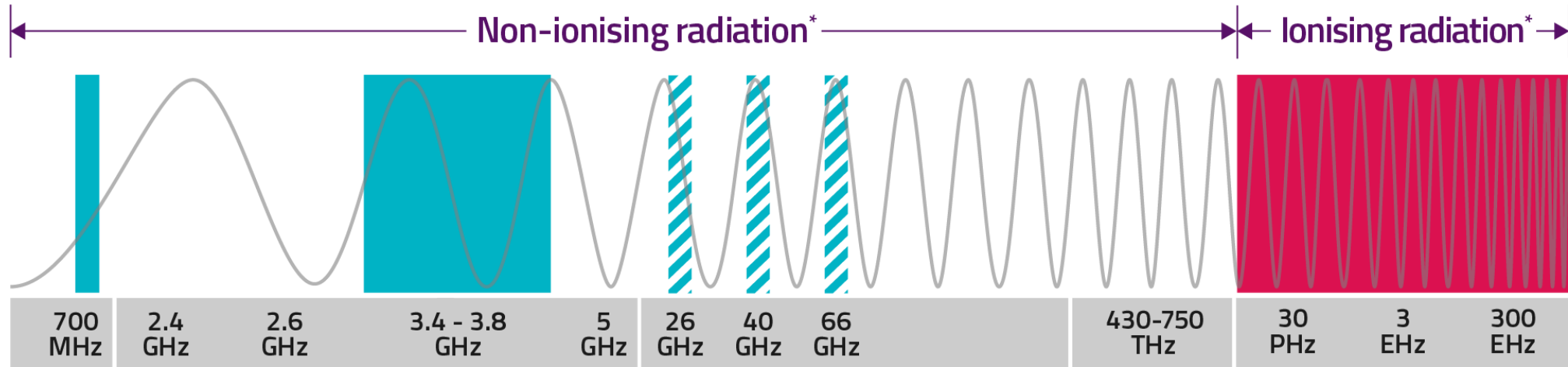
■ 5G

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



Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

The Electromagnetic Spectrum



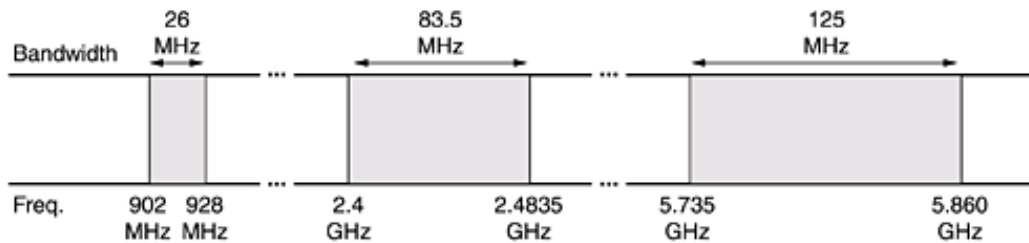
Ethernet (10Gbps Cat 6): 250 MHz
VDSL: 30 MHz
Coax: 1 GHz

**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 €):

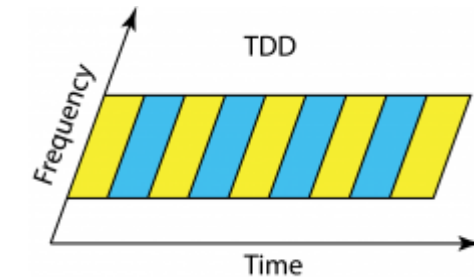
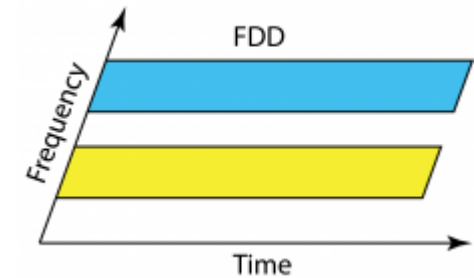
- 10 κανάλια στη ζώνη των 3400-3800 MHz με τίμημα 30.306.051 €
- 2 κανάλια στη ζώνη των 700 MHz με τίμημα 50.080.051 €
- 4 κανάλια στη ζώνη των 2 GHz με τίμημα 35.420.000 €
- 1 κανάλι στη ζώνη των 26 GHz με τίμημα 3.245.051 €

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

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

5G channels

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 – 1780 MHz	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 profiles (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

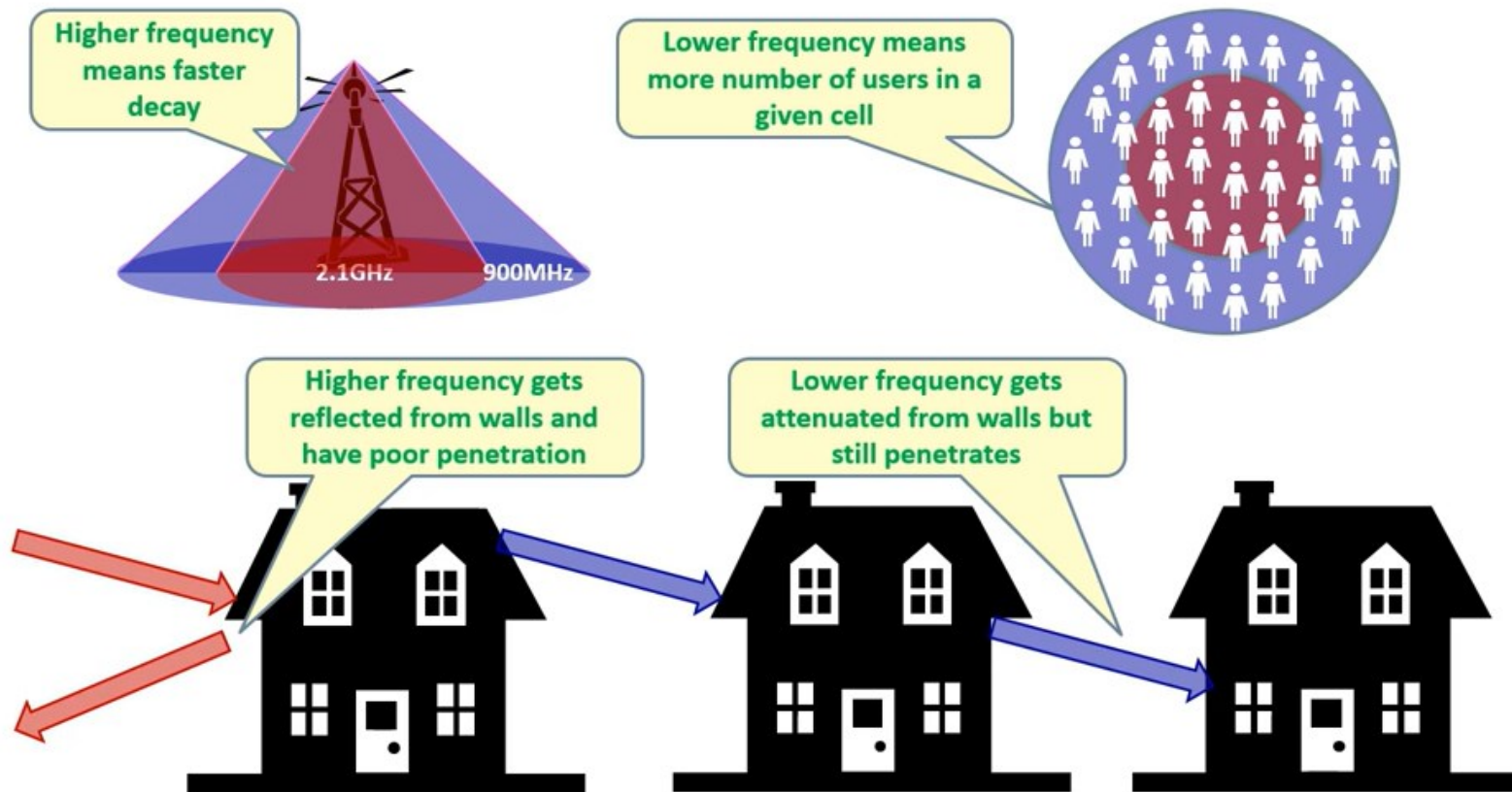
5G has even more profiles

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

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

SUL, SDL: Supplementary uplink, Supplementary downlink

High vs low frequency



Υψηλές συχνότητες

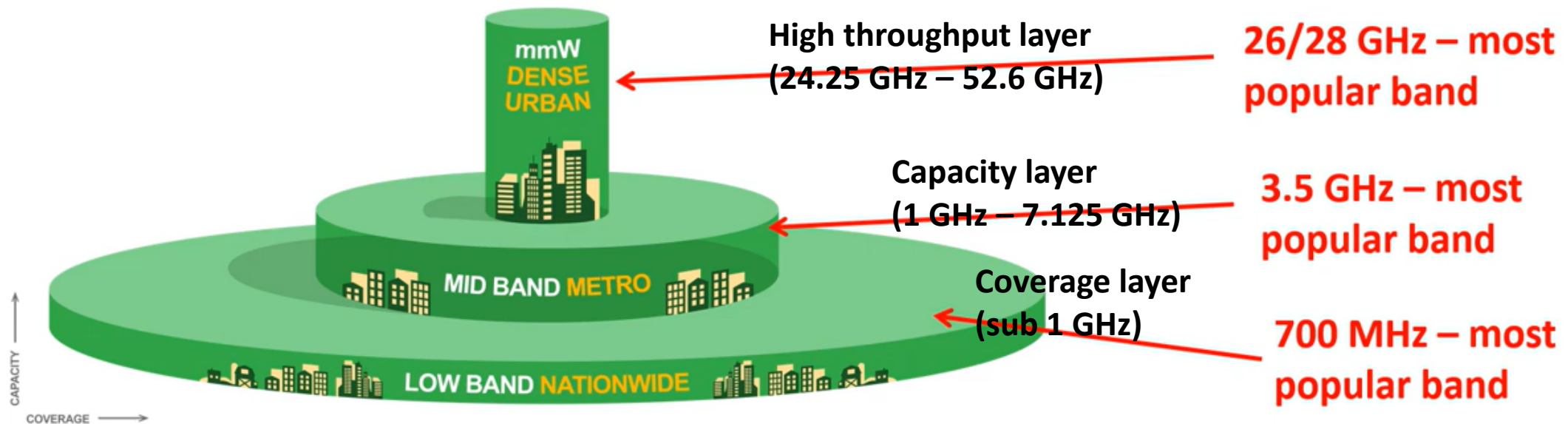
Θετικά:

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

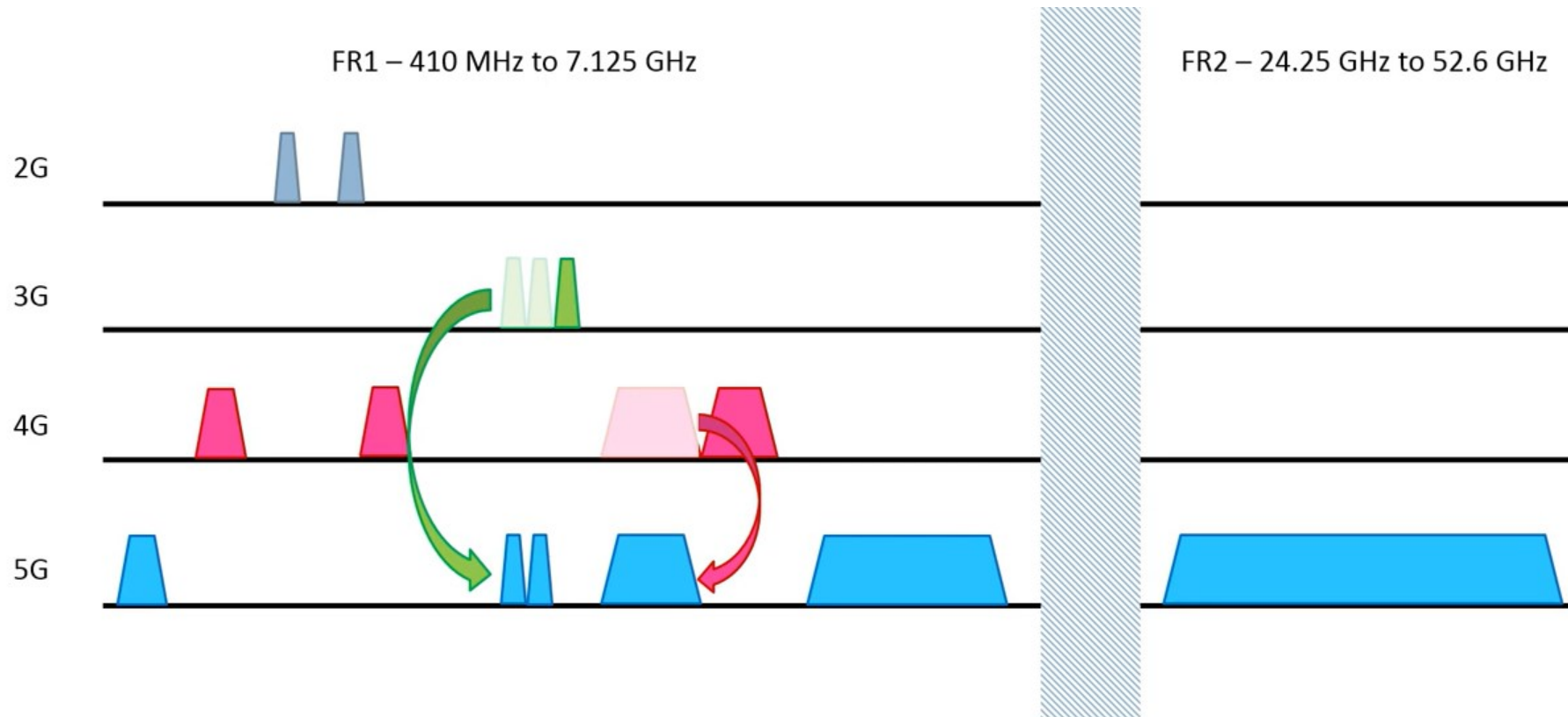
Αρνητικά:

- i) μεγαλύτερη εξασθένηση, μικρότερη διείσδυση σε εμπόδια
- 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)

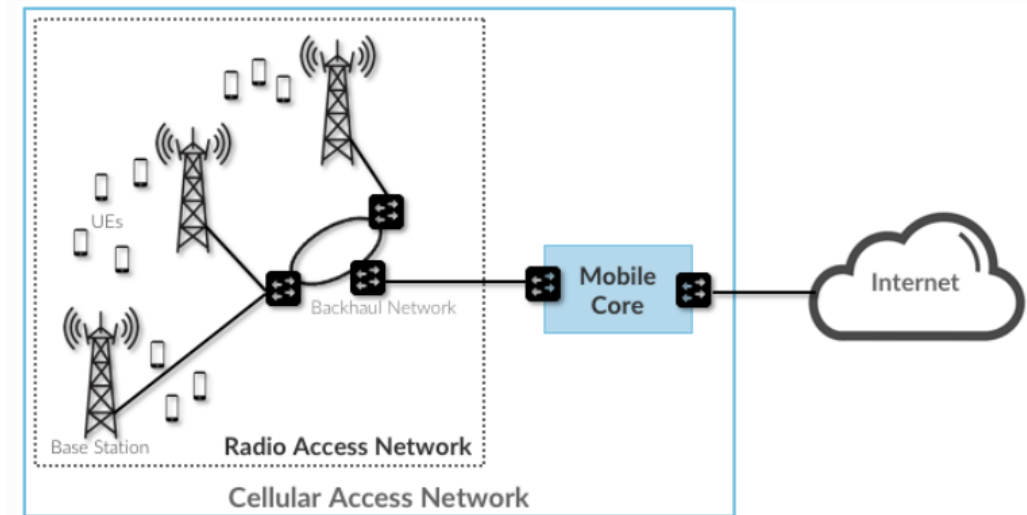
■ 5G

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

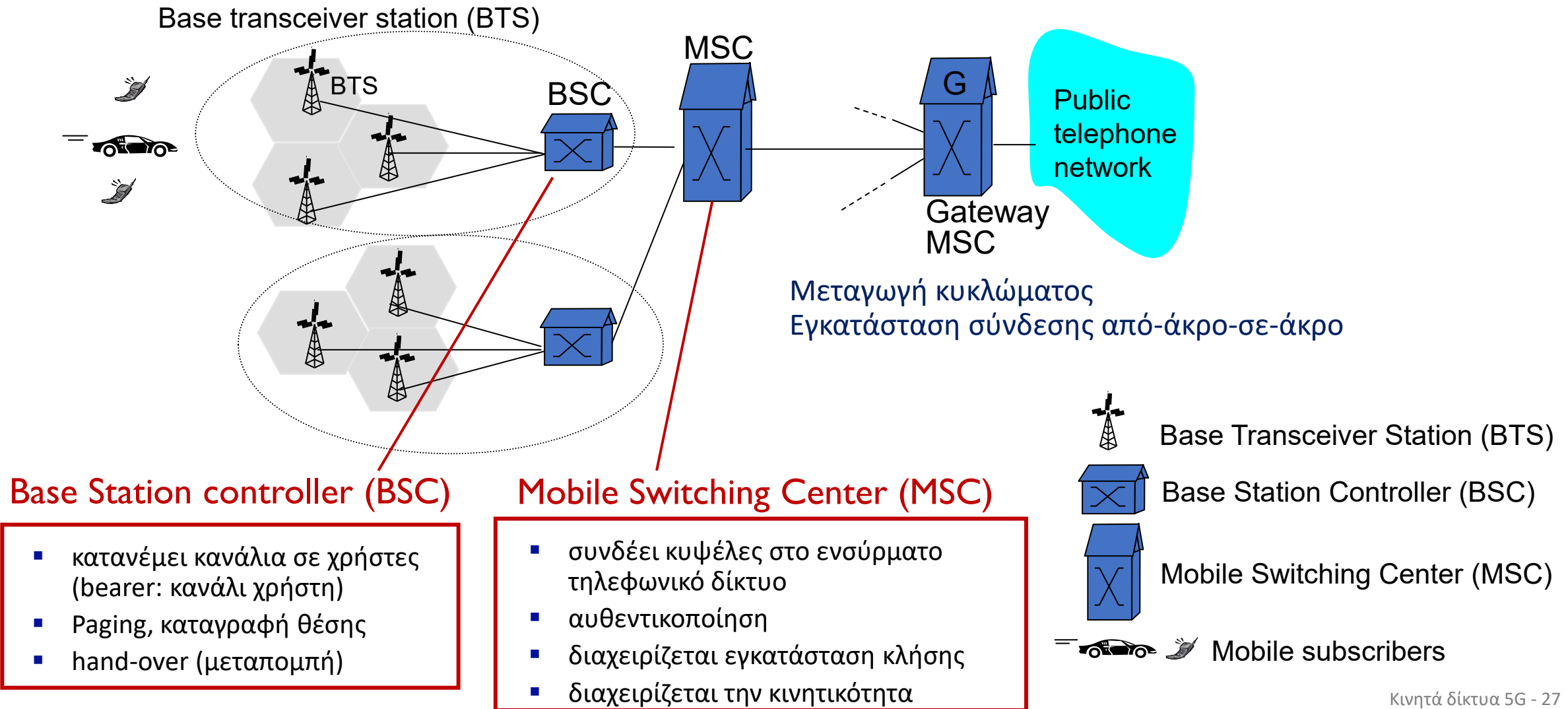


Αρχιτεκτονική κυψελωτών δικτύων

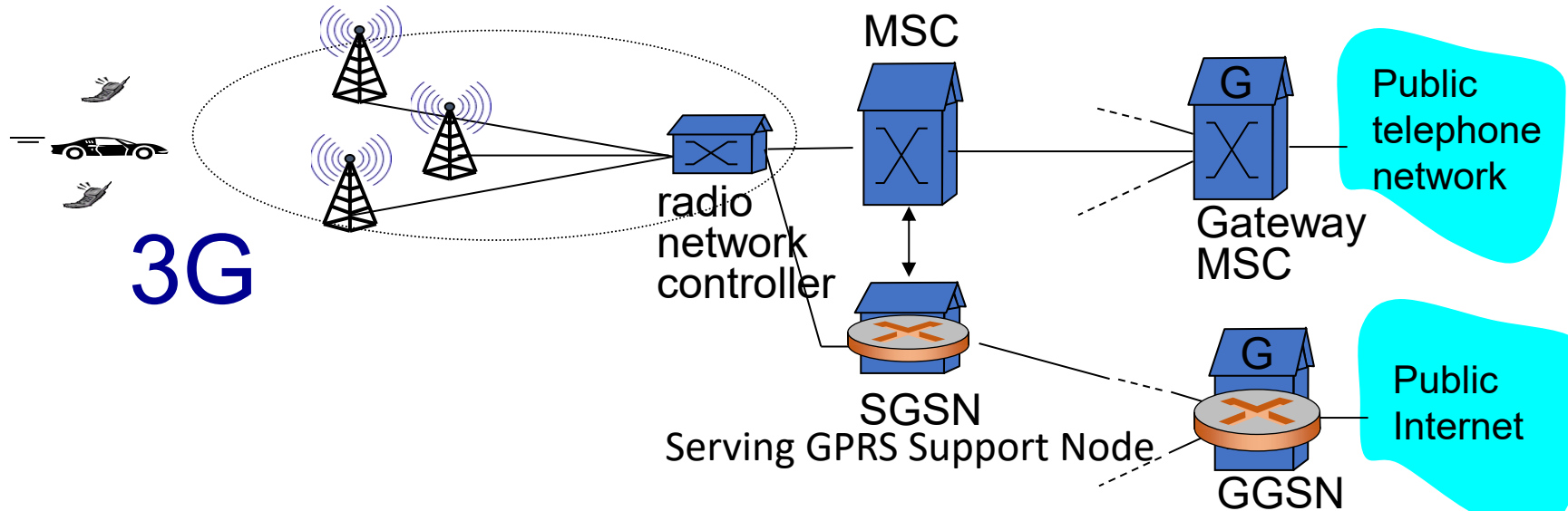
- Τα κυψελωτά δίκτυα έχουν 2 τμήματα: RAN, Core
- Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης-Radio Access Network (RAN)
 - Ασύρματο κομμάτι: κινητό <-> κεραία + επεξεργασία = L1 & L2 (phy & link layer) της ασύρματης επικοινωνίας
 - Στο 4G καλείται Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), το 5G: 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



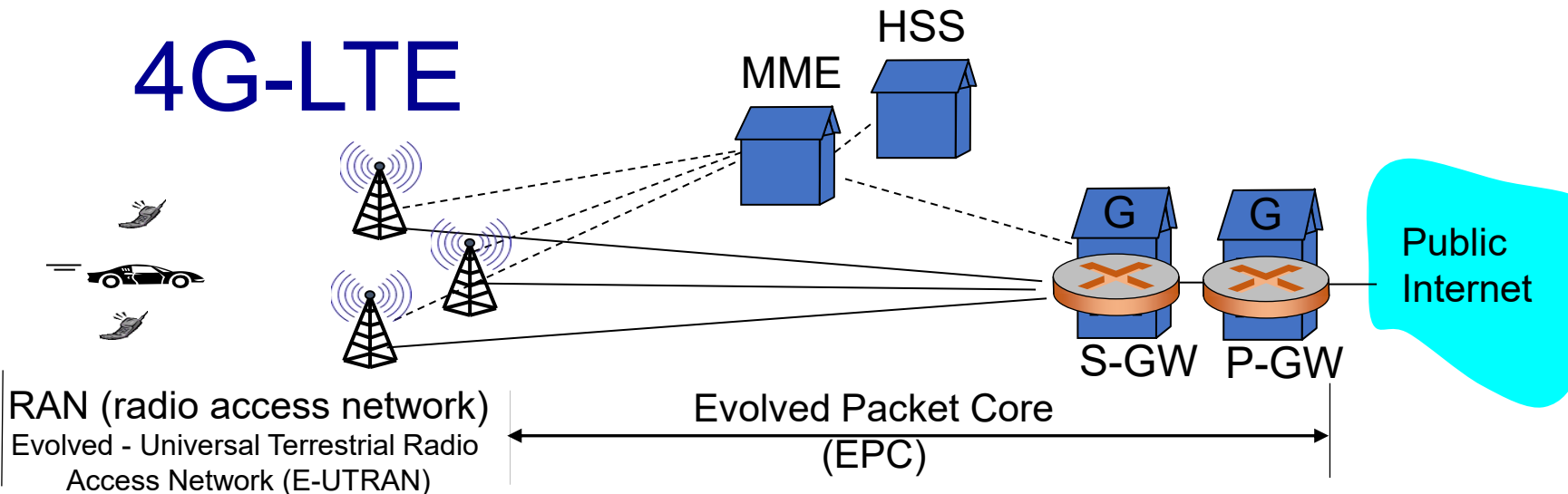
3G και 4G αρχιτεκτονικές



3G

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

4G-LTE



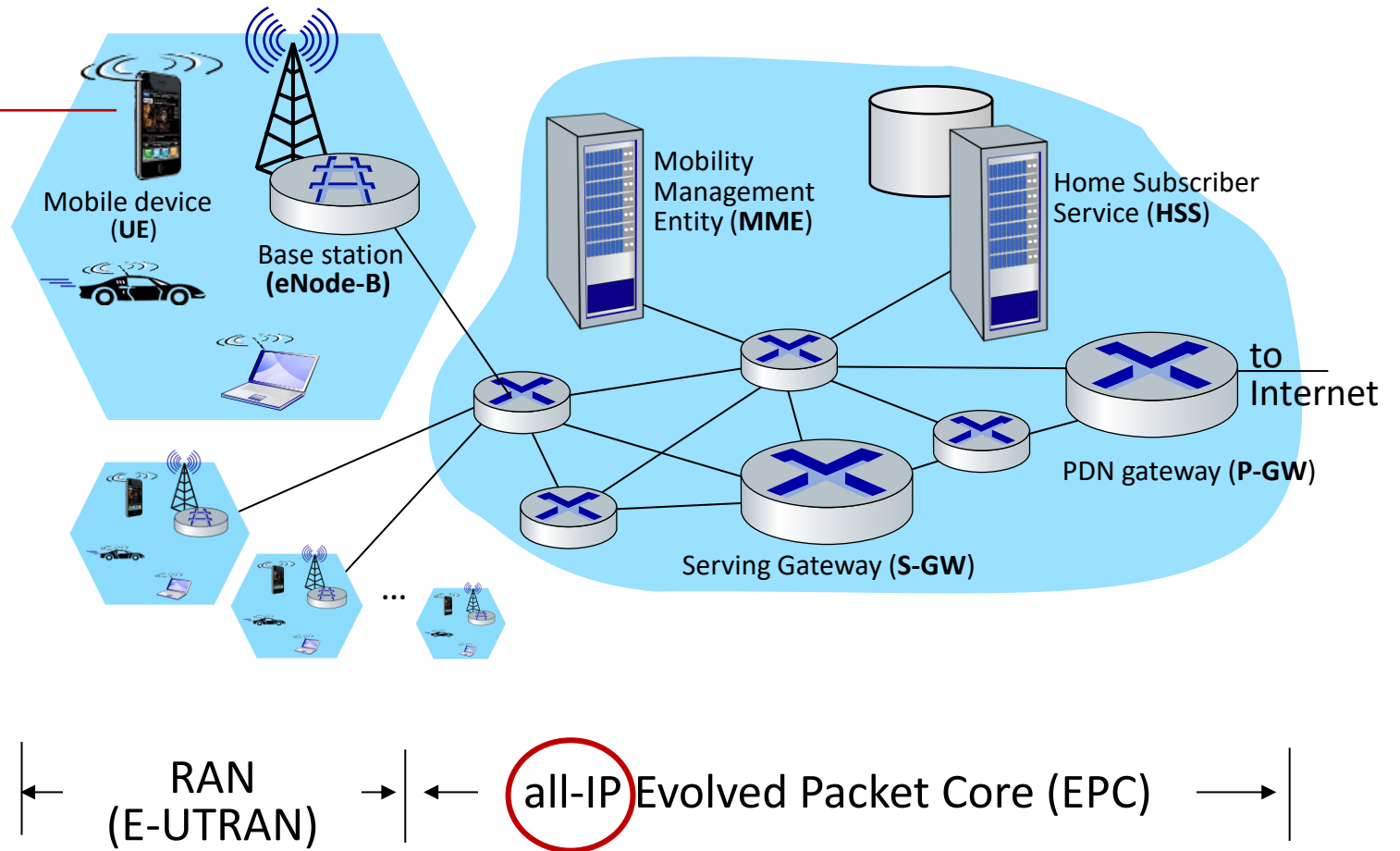
4G

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:

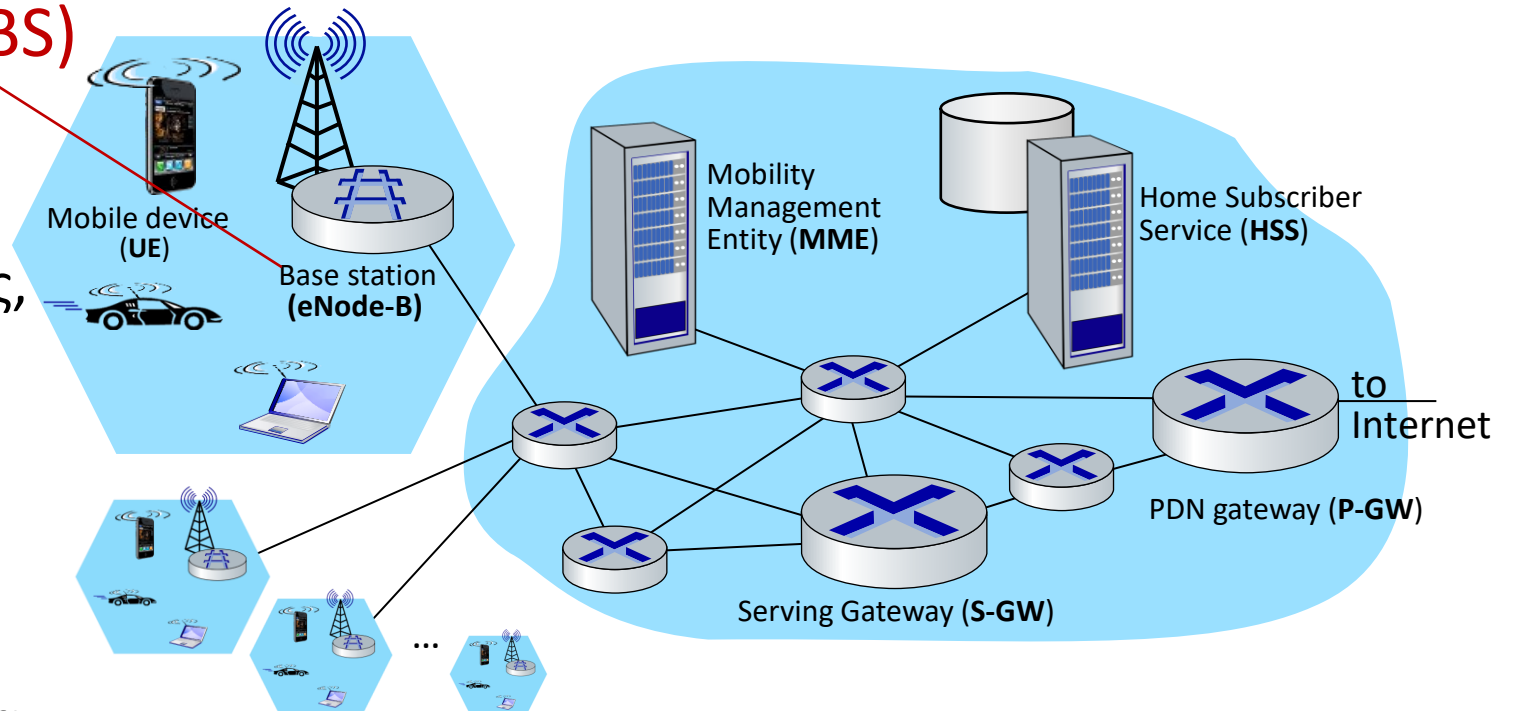
- smartphone, tablet, laptop, IoT, ... με 4G LTE radio
- Μοναδική ταυτότητα: 64-bit International Mobile Subscriber Identity (IMSI), αποθηκευμένη στην κάρτα SIM (Subscriber Identity Module)
- LTE ορολογία: εξοπλισμός χρήστη - User Equipment (UE)



4G LTE αρχιτεκτονική

Σταθμός βάσης (Base Station BS)

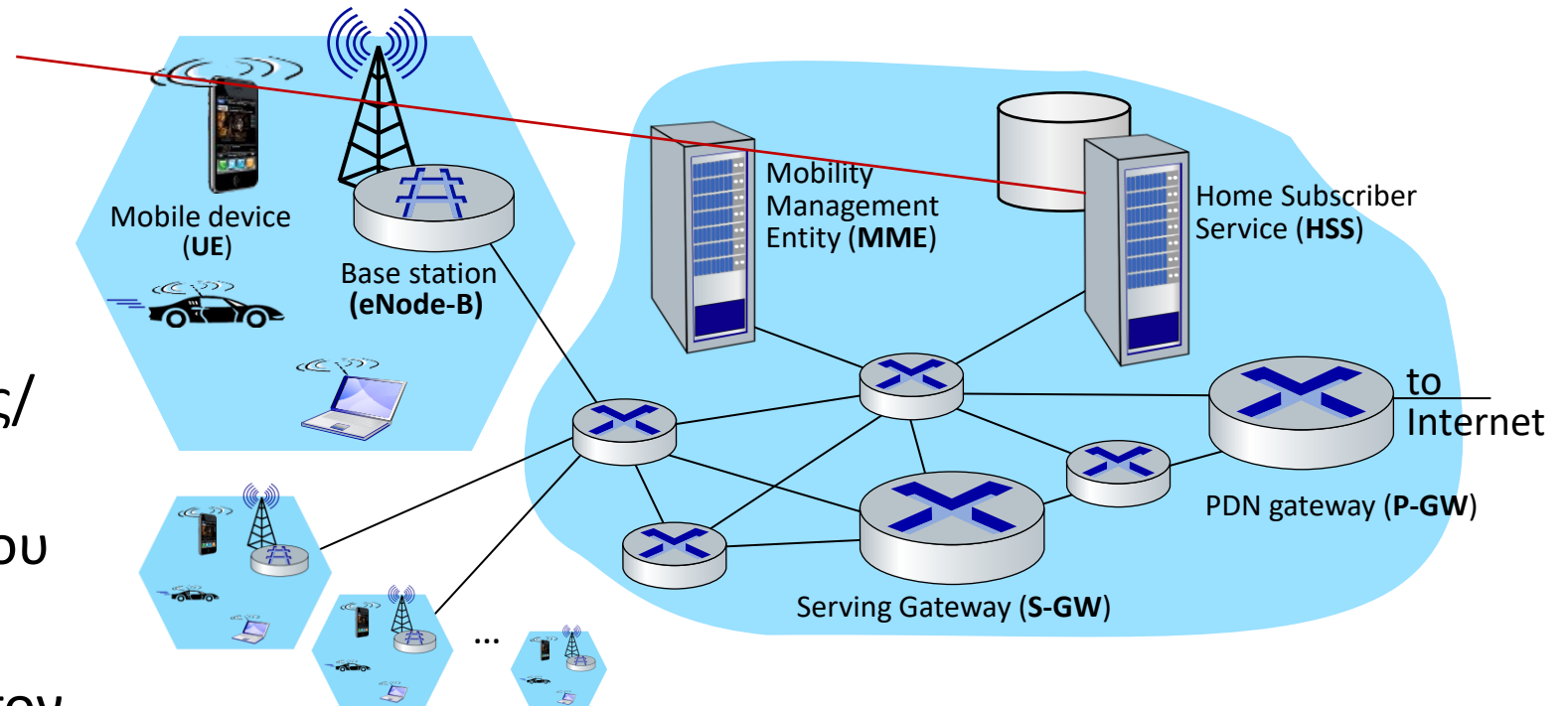
- τερματίζει το ασύρματα κανάλι - ξεκινάει το ενσύρματο δίκτυο
- διαχειρίζεται ασύρματους πόρους, φορητές συσκευές στην περιοχή κάλυψής του («κυψέλη»)
- συντονίζει τον έλεγχο ταυτότητας της συσκευής με το EPC
- παρόμοιο με το WiFi AP αλλά:
 - έχει ενεργό ρόλο στην κινητικότητα
 - συνομιλεί με κοντινούς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



4G LTE αρχιτεκτονική

Εξυπνής οικείων συνδρομητών - Home Subscriber Server (HSS)

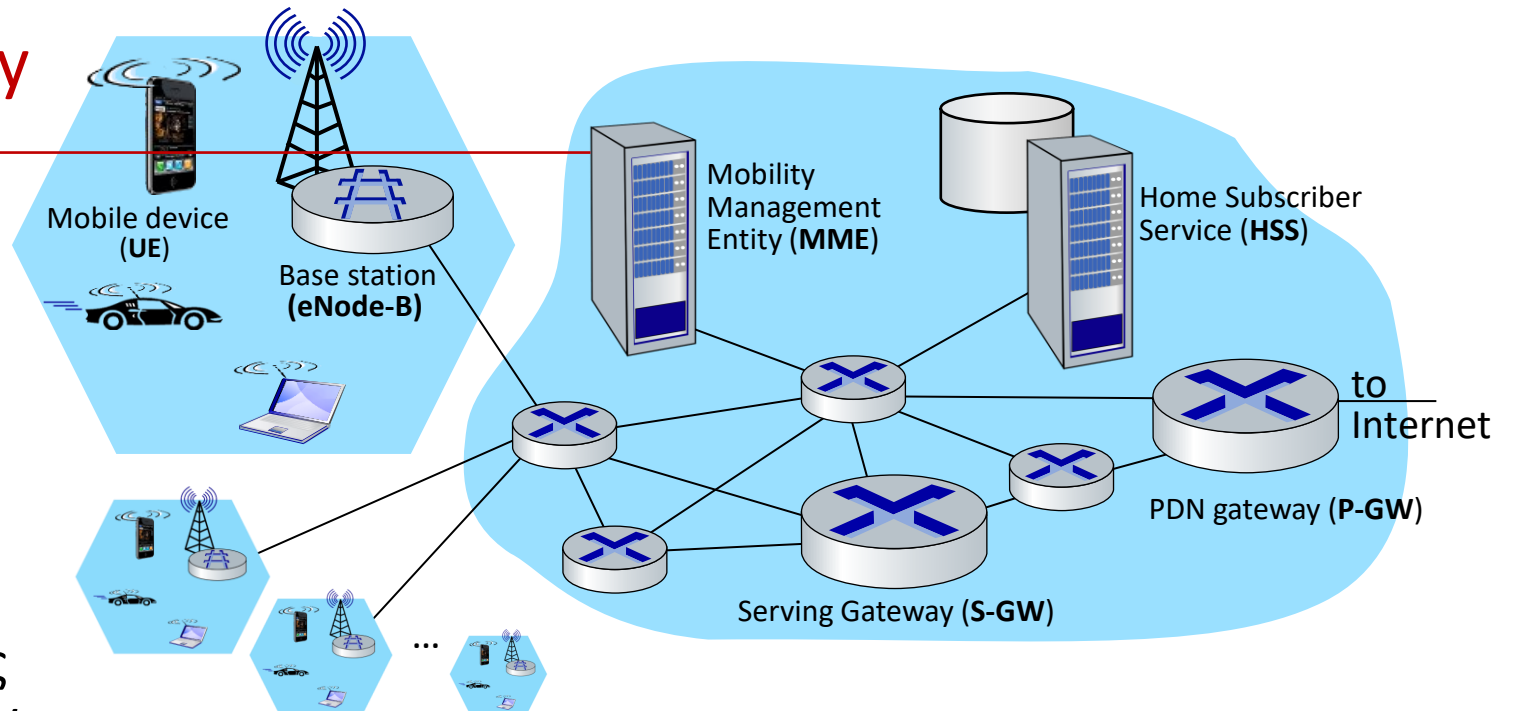
- αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με κινητές συσκευές/συνδρομητές για τις/τους οποίες/οποίους το δίκτυο του HSS είναι "οικιακό"
- συνεργάζεται με το MME στον έλεγχο ταυτότητας συσκευής



4G LTE αρχιτεκτονική

Mobility Management Entity (MME)

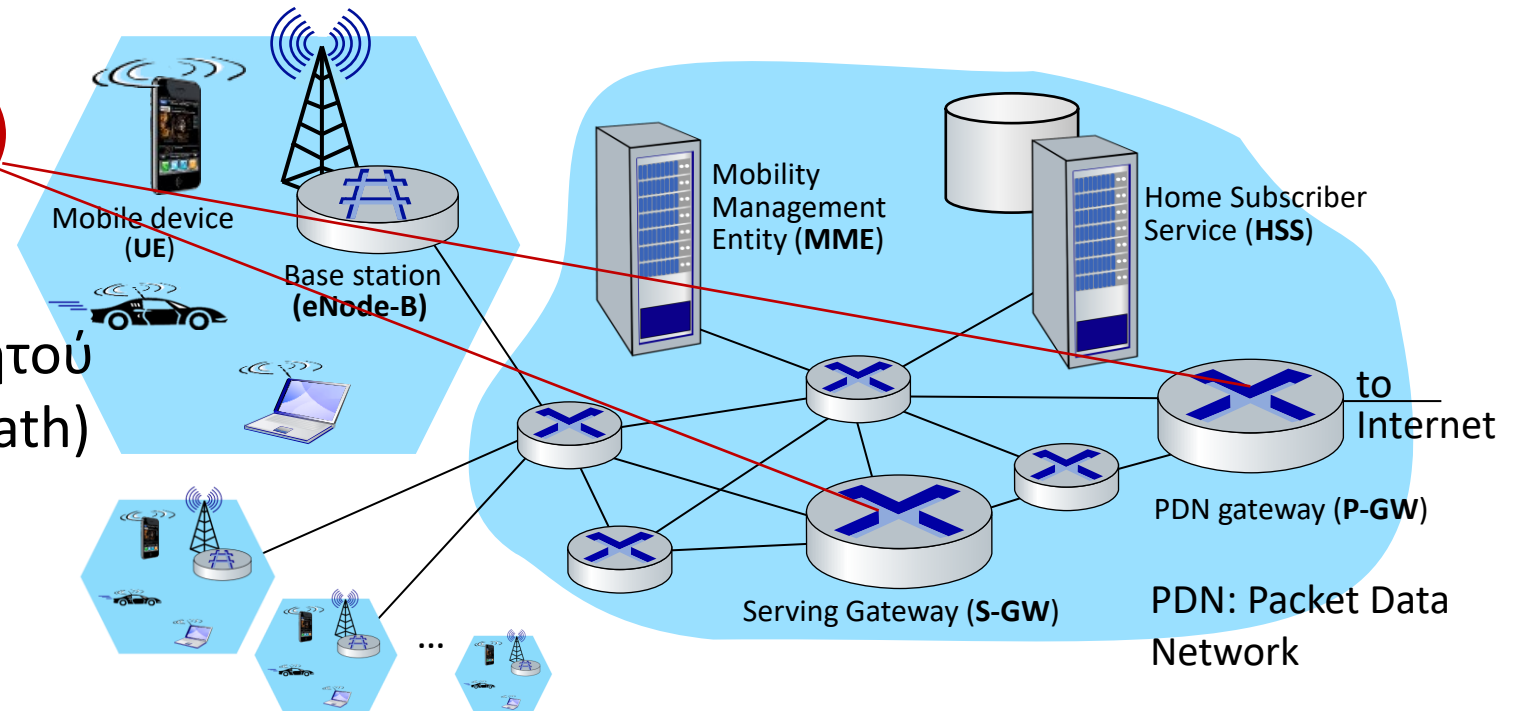
- αυθεντικοποίηση (συσκευή σε δίκτυο, δίκτυο σε συσκευή) σε συνεργασία με το HSS
- διαχείριση κινητικότητας:
 - μεταπομπή (handoff)
 - παρακολούθηση τοποθεσίας συσκευής, σελιδοποίηση (~ξύπνημα συσκευής για κλήση ή μήνυμα)
- ρύθμιση διαδρομής δεδομένων (σήραγγες) από κινητή συσκευή στο P-GW



4G LTE αρχιτεκτονική

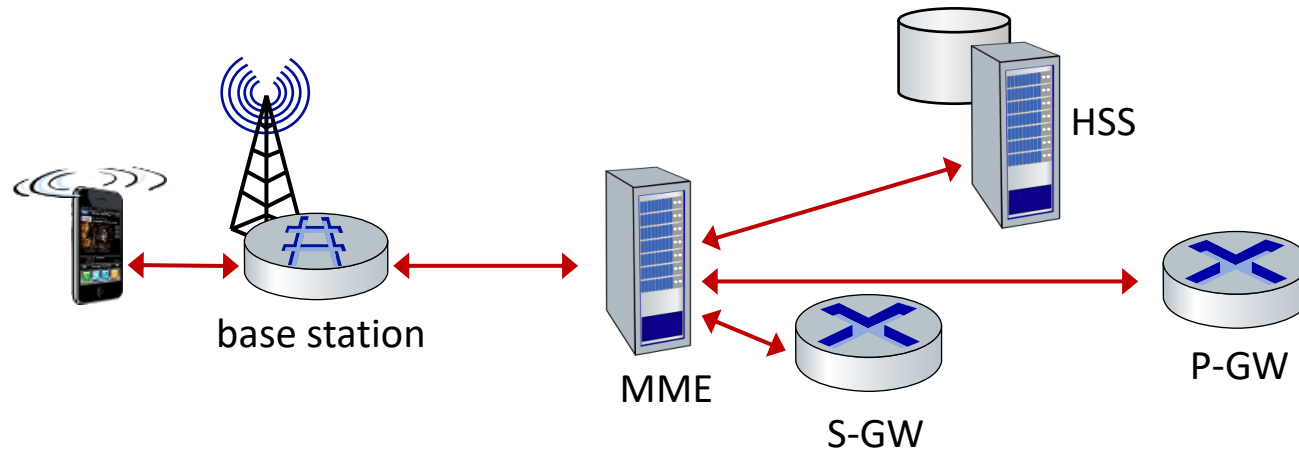
Serving Gateway (S-GW), Packet Data Network (PDN) Gateway (P-GW)

- 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



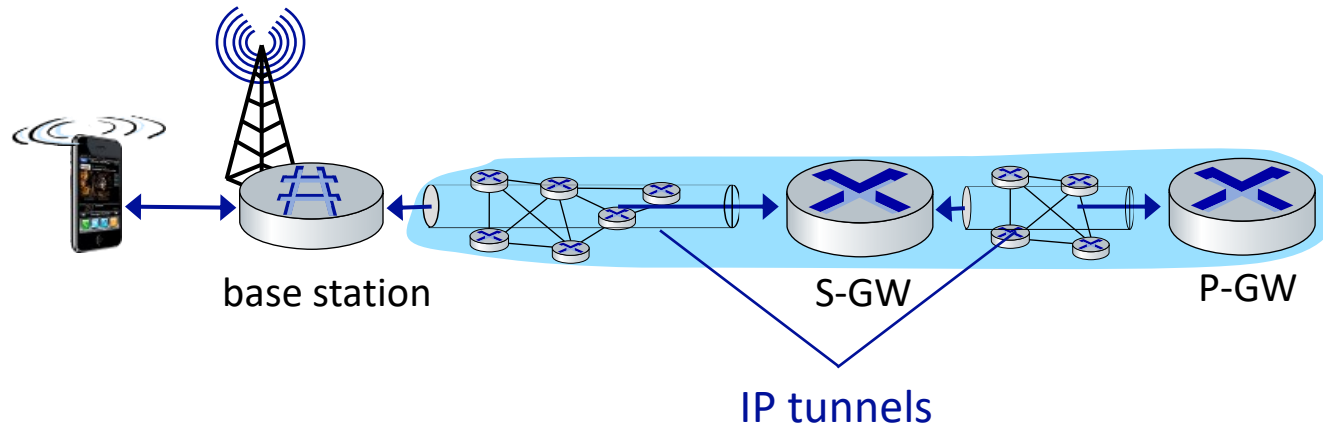
- Άλλοι δρομολογητές:
 - IP προώθηση (χρήση σήραγγας)

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)

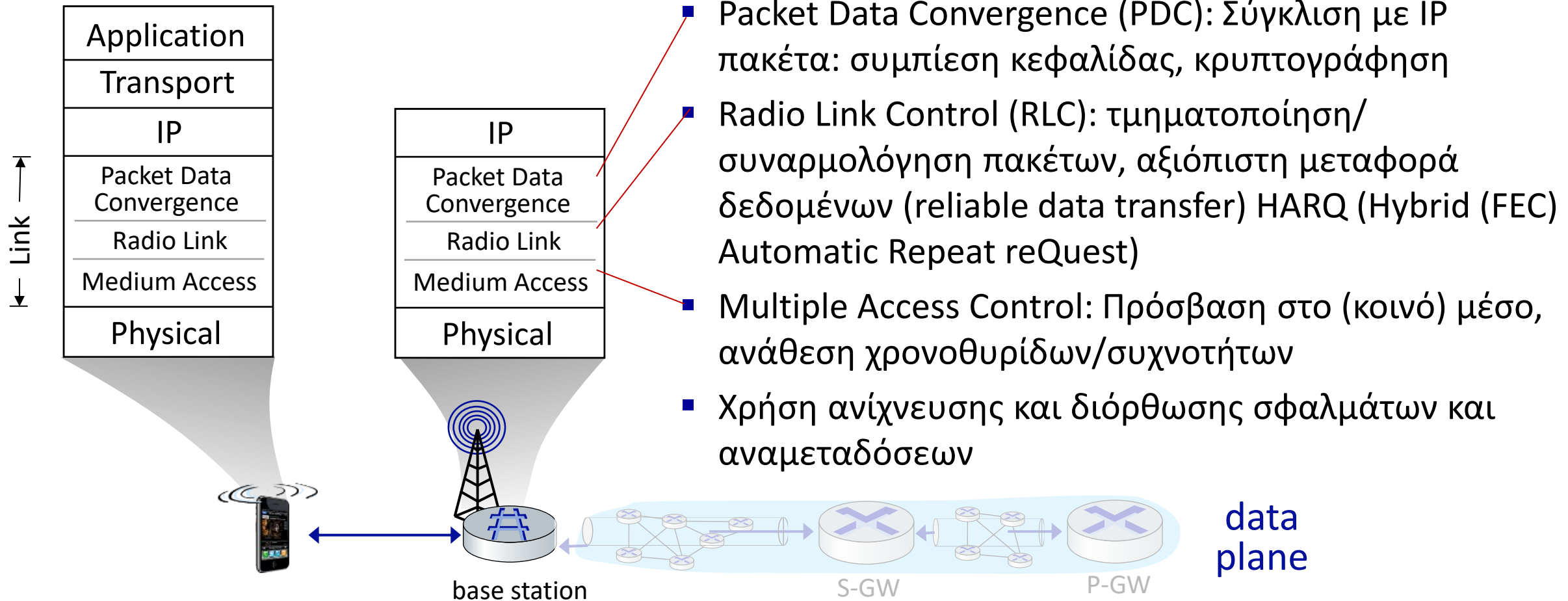
■ 5G

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



LTE Radio Access Network (RAN)

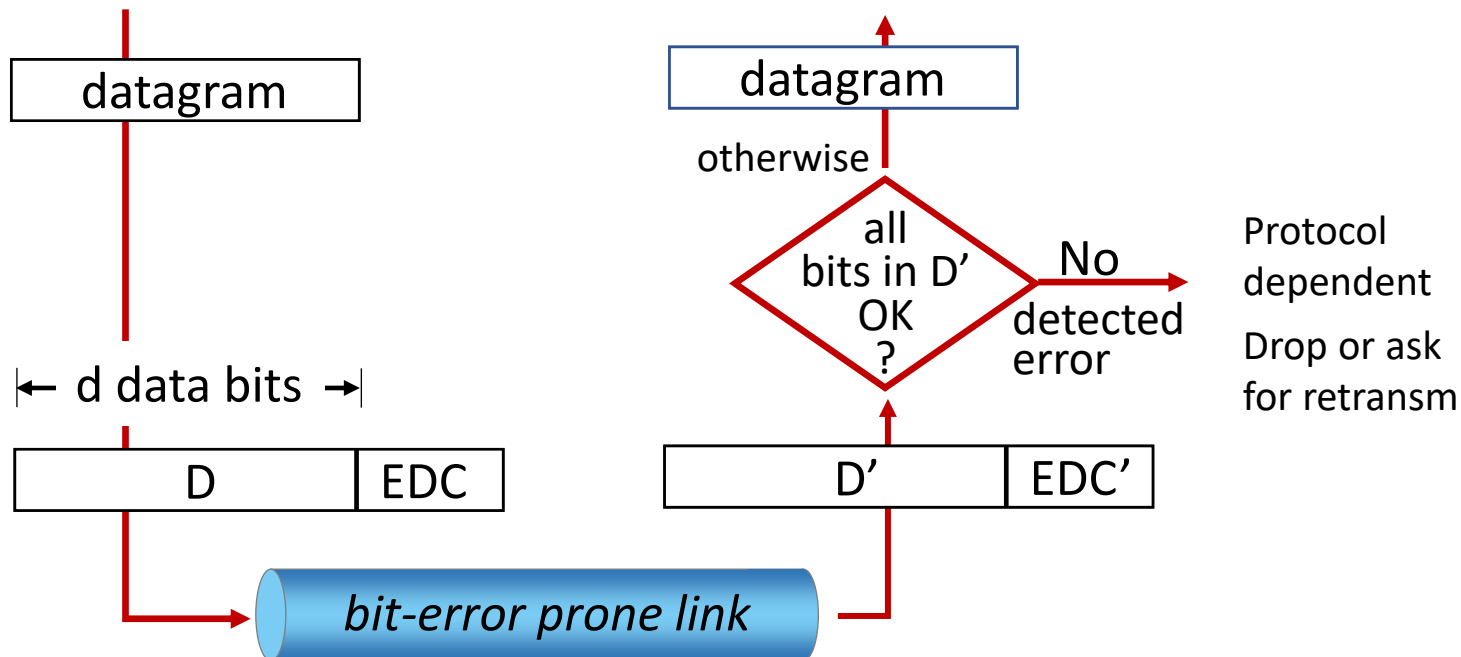
LTE πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης (link layer)



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)



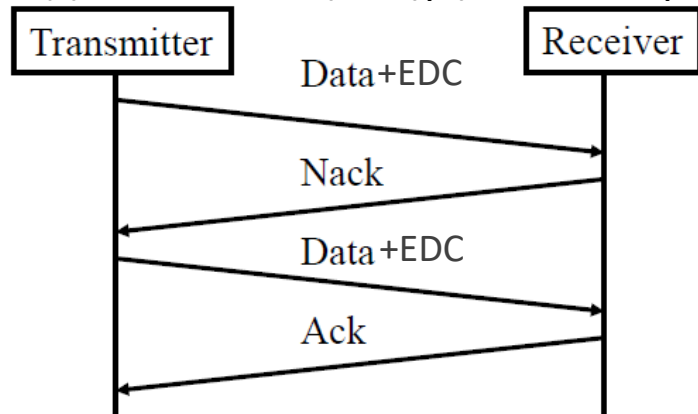
Η ανίχνευση σφαλμάτων δεν είναι 100% αξιόπιστη!

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

Αναμεταδόσεις Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ)

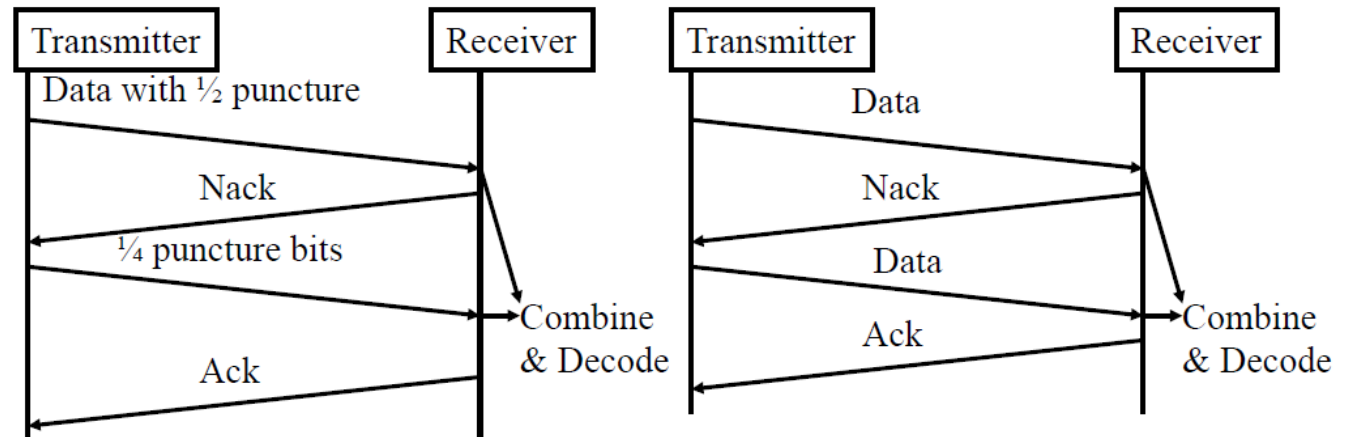
ARQ

- Μηχανισμός επαναμετάδοσης εάν ληφθεί με σφάλμα
- 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

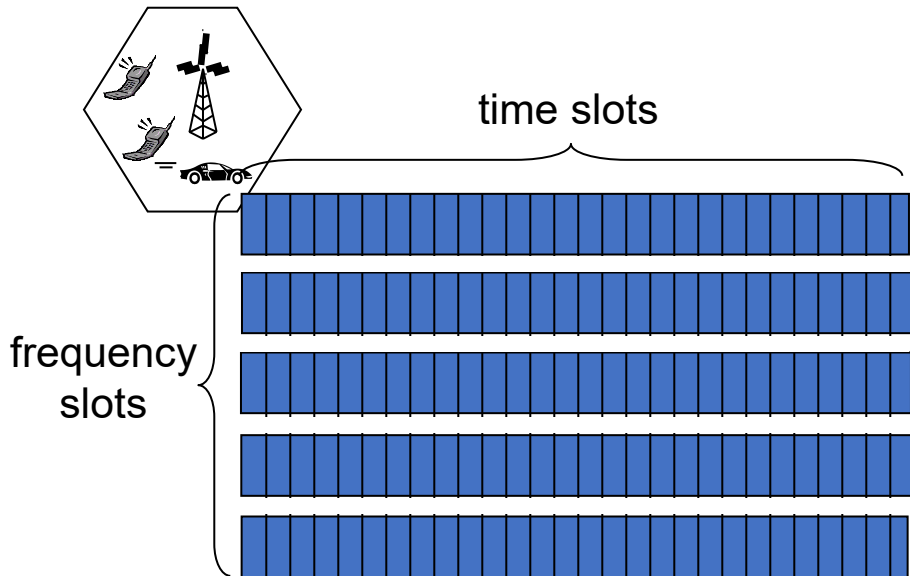
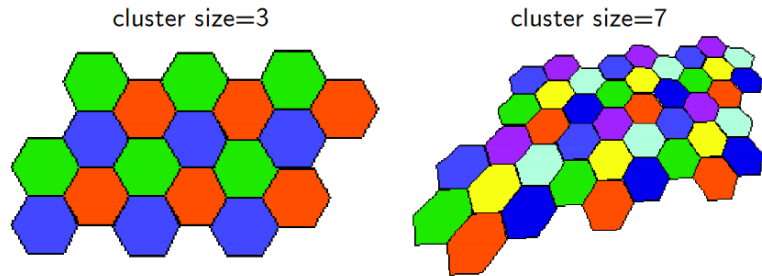


HARQ

- PHY (FEC) & MAC layers work together → Hybrid
- Forward Error Correction (FEC): επιπλέον bits για έλεγχο & 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 (O) πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM) + TDM
 - "ορθογώνια": μικρή παρεμβολή μεταξύ υποκαναλιών (subcarriers)
- **Uplink (UL):** SC-FDMA (παρόμοιο με OFDM) + TDM
- TDM: χρονοθυρίδες, πχ. 1 ms, και περίοδος με 20 θυρίδες
- 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 όχι – vendor specific

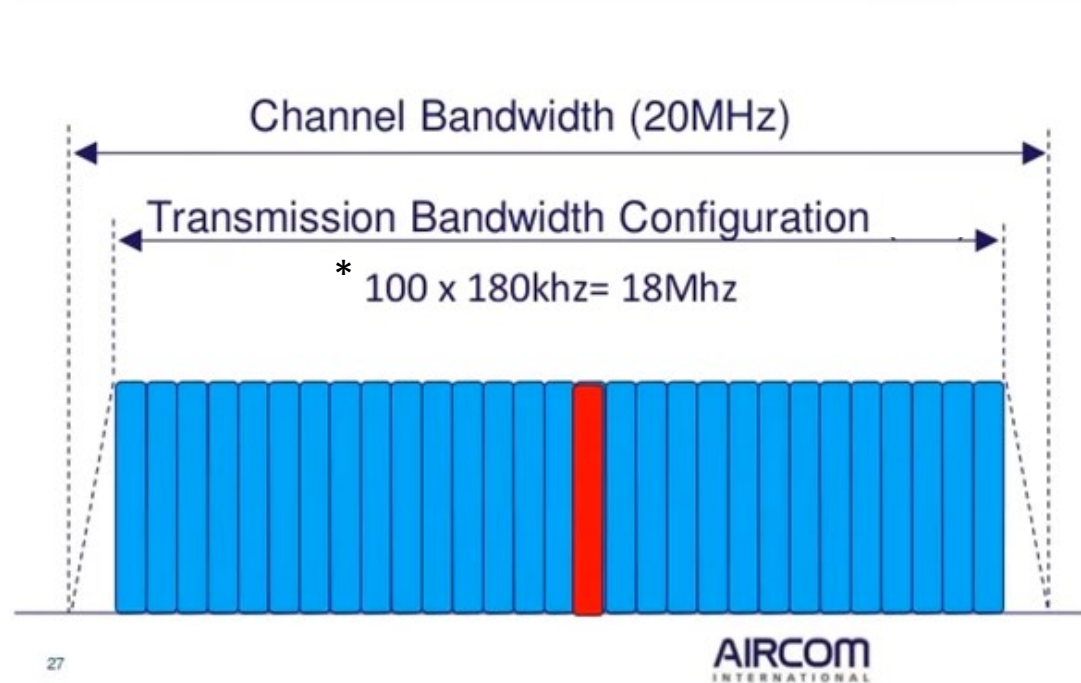
LTE φάσμα καναλιού

Το φάσμα του καναλιού χωρίζεται σε υποκανάλια (subcarriers)

Resource Block (RB): μονάδα (unit) ανάθεσης πόρων, 12 subcarriers x 1 timeslot (12 υποκανάλια φάσματος και 1 χρονοθυρίδα)

Εδώ βλέπουμε μόνο το φάσμα

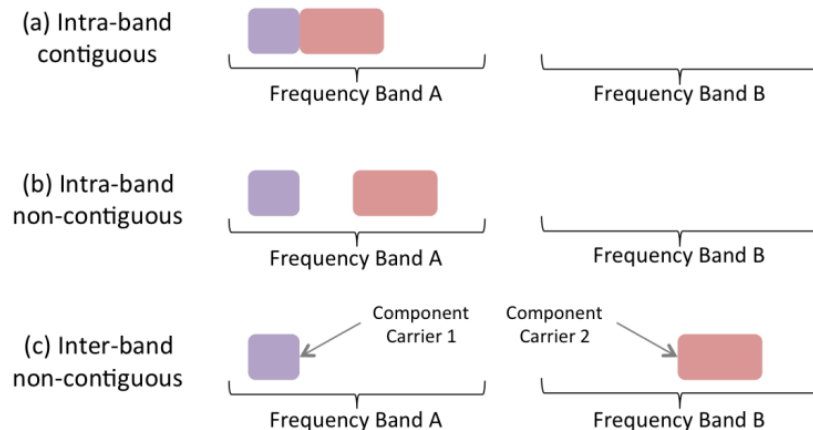
Channel Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Transmission Bandwidth Config. (RB)	6	15	25	50	75	100*
Number of Subcarriers	72	180	300	600	900	1200
Occupied Bandwidth (MHz)	1.08	2.7	4.5	9.0	13.5	18.0



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

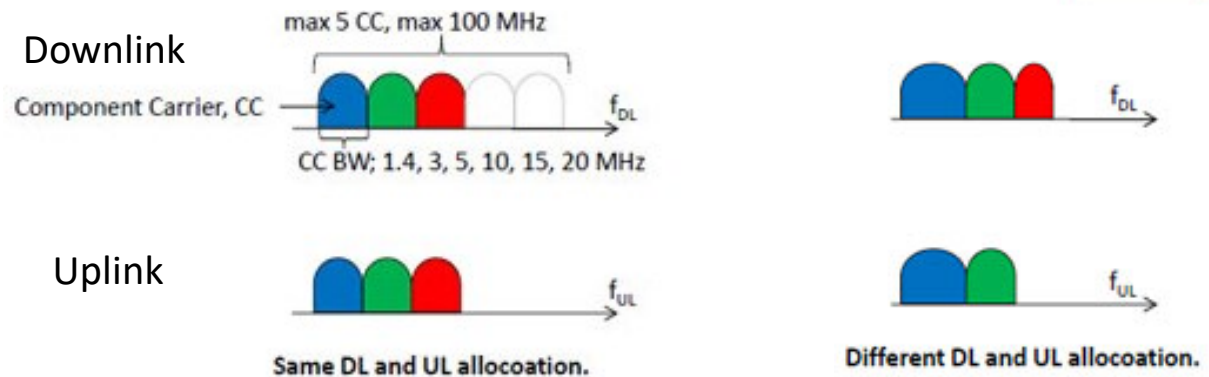
Carrier Aggregation (CA)

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

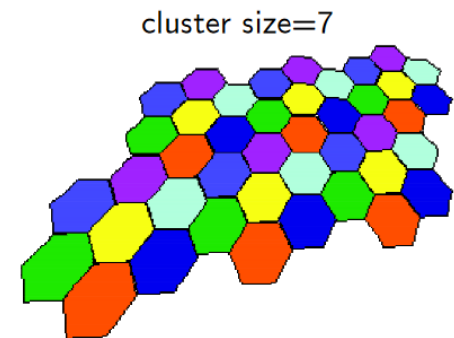
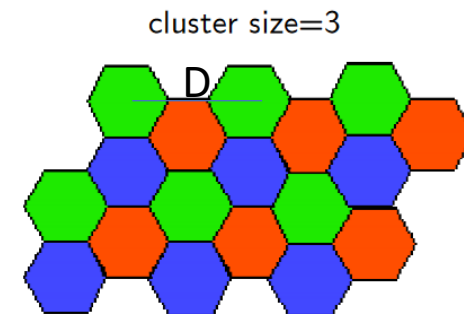
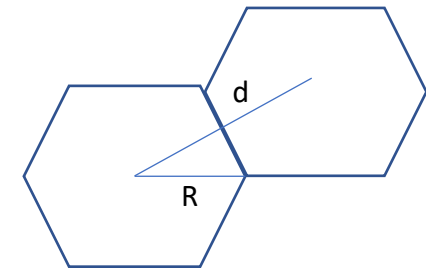
Can have different CA for Uplink (UL) and Downlink (DL)



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 $D = R\sqrt{3N} = d\sqrt{N}$

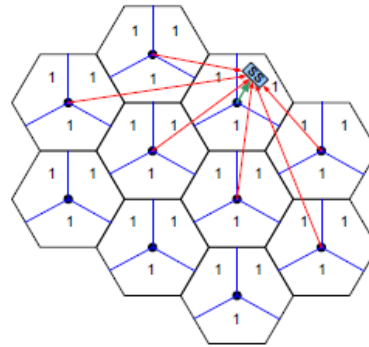


Κυψέλες με τμήματα

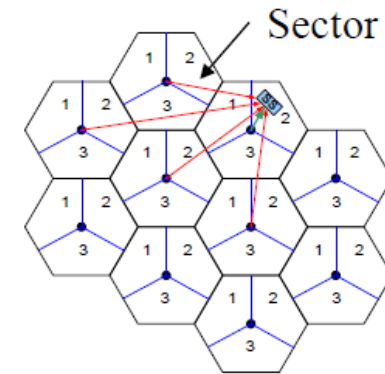
Χρησιμοποιούνται στην πράξη

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

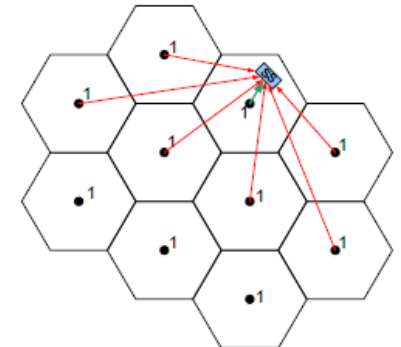
1x3x1



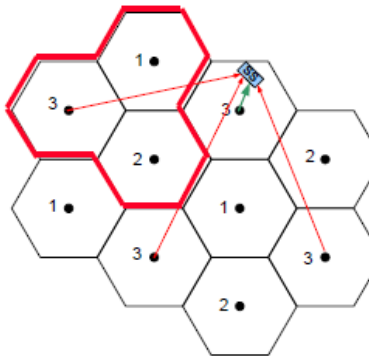
1x3x3



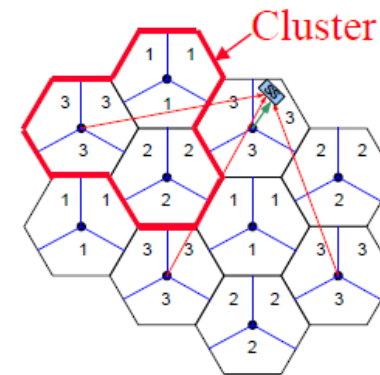
1x1x1



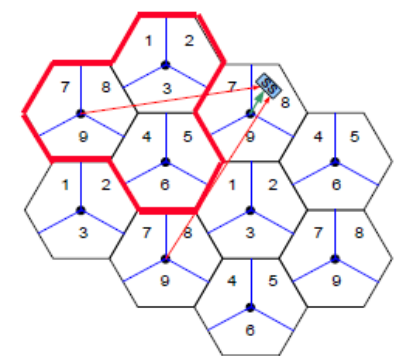
3x1x1



3x3x1



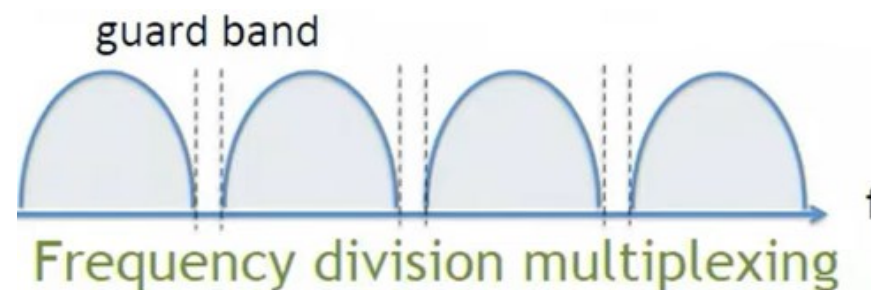
3x3x3



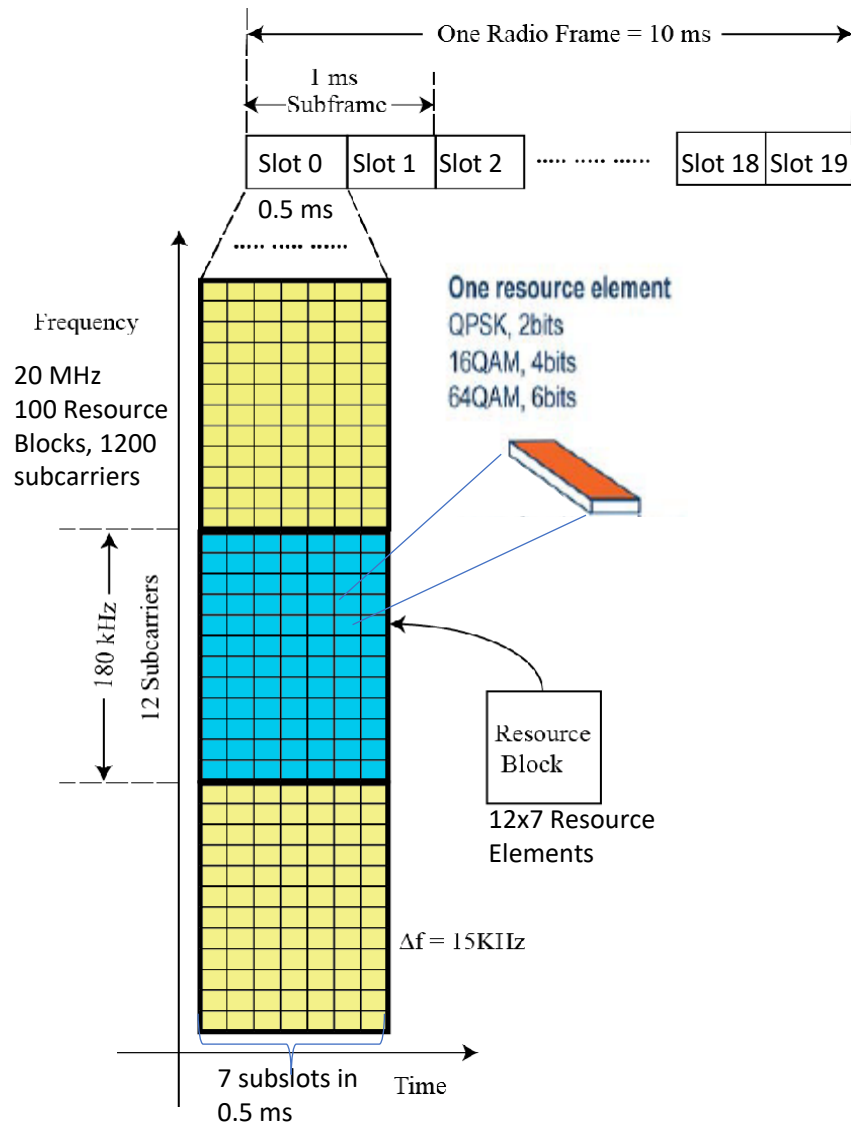
(σαν το προηγούμενο)

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 σταθμό 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

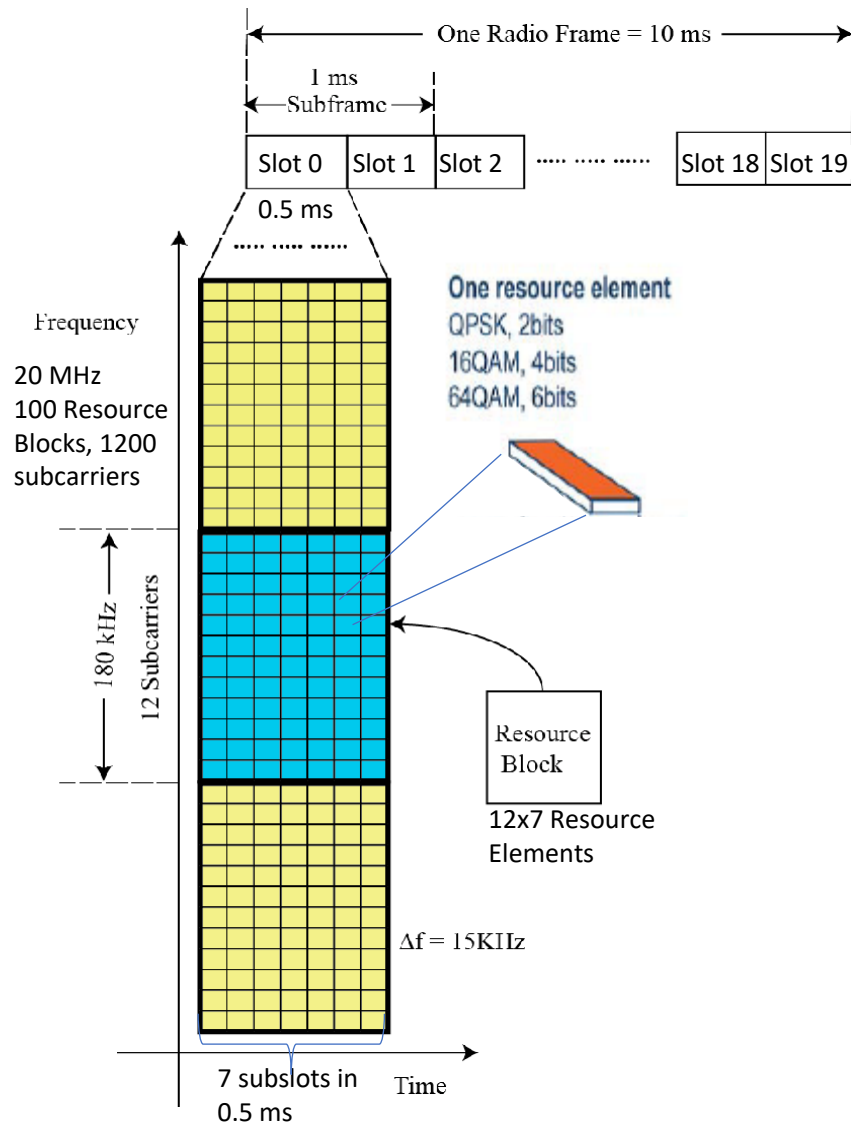


LTE ανάθεση χωρητικότητας – Freq & Time



- Το φάσμα του καναλιού (π.χ. 20 MHz) διαμοιράζεται σε υποκανάλια (subcarriers) των 15 KHz
 - $18 \text{ MHz } (=20 \text{ MHz} - \text{edge guardband}) / 15 \text{ KHz} = 1200 \text{ subcarriers}$
 - 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 ~7 subslots, 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) = 12 subcarriers x 1 slot = 12 x 7 RE
Χωρητικότητα 1 RB: $12 \times 7 \times 6 \text{ bits (64QAM)} / 0.5 \text{ ms} = 1 \text{ Mb/s}$
- Ανάθεση ανά subframe (2 ίδια RB στα 2 slots του subframe)

LTE ανάθεση χωρητικότητας - Freq & Time

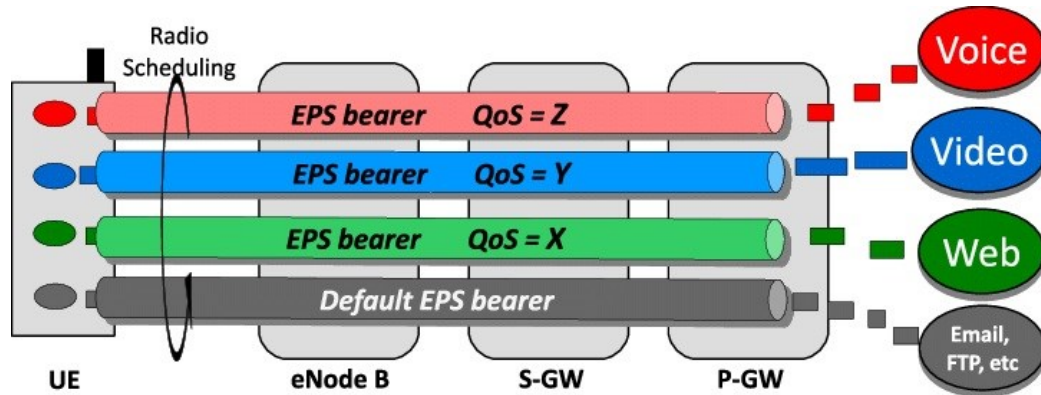


- Resource Block (RB) = 1 Mb/s
- Για 20 MHz φάσμα καναλιού (18 MHz χρήσιμα): 100 RB
Συνολική χωρητικότητα για 20 MHz: 100 Mb/s
- Κάποια RB είναι δεσμευμένα για έλεγχο (uplink RB allocation, Synchronization, Cell Search, Channel State Information (CSI) Reporting, uplink Random Access, paging, broadcast, 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 – RB to UE - 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: low peak-to-average power ratio (crucial for battery life), Cons: slightly less efficient (needs time guardbands)
- BS scheduler αναθέτει uplink (UL) RBs στα UEs (διάφορες παραλλαγές): i) semi-persistent scheduling, or ii) dynamic: Scheduling Request (SR), Buffer Status Reports (BFS)
 - Semi-persistent scheduling: periodic, e.g. for VoIP or low latency apps
 - Dynamic / Scheduling Request: το UE χρησιμοποιεί τα Physical Uplink Control Channel-PUCCH (συγκεκριμένα RBs στο UL frame) για να ζητήσει RB, μετά μπορείς να συνεχίσει στέλνοντας BFS
 - Αν δεν έχει PUCCH τότε χρησιμοποιεί το Random Access CHannel (RACH)
 - Συνήθως όταν το κινητό ξεκινάει ή όταν έχει παραμείνει ανενεργό για πολύ χρόνο
 - Random access: πιθανές συγκρούσεις, αν δεν υπάρχει σύγκρουση το BS στέλνει ACK, αλλιώς το UE πάει σε random backoff
- BS μεταφέρει στα Physical Downlink Control Channels (PDCCHs) (συγκεκριμένα RBs/DL frame) την πληροφορία ανάθεσης UL RBs στα UEs – μοιάζει με το MAP στα PON
- Τα UEs χρειάζονται συγχρονισμό για να μεταδώσουν UL
 - Μαζί με την ανάθεση RBs το BS παρέχει και το timing advance- TA (έχοντας μετρήσει το round-trip time RTT UE-BS), διαφορετικό TA για κάθε UE, το TA είναι ο χρόνος που περιμένει το UE για να 'συγχρονιστεί' στην αρχή του UL frame
 - Μοιάζει με το equalization delay (EqD) στα PON
 - Το BS μετράει το RTT/TA 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), κάθε EPS bearer ανήκει σε μια κλάση

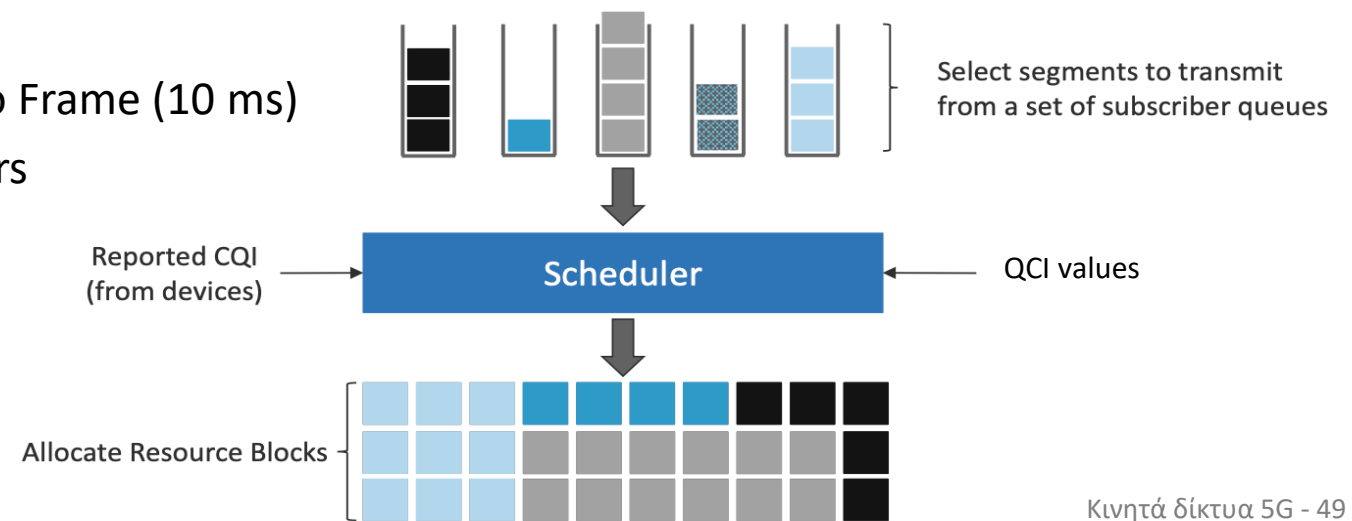
(3GPP -23.203 Table 6.1.7: Standardized QCI characteristics : Release 8)

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	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)		9			

GBR = Guaranteed Bit Rate

RAN Scheduler

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



Κινητά Δίκτυα

■ Εισαγωγή

- Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
- Γενιές κυψελοειδών δικτύων

■ Ραδιοφάσμα

■ 4G LTE

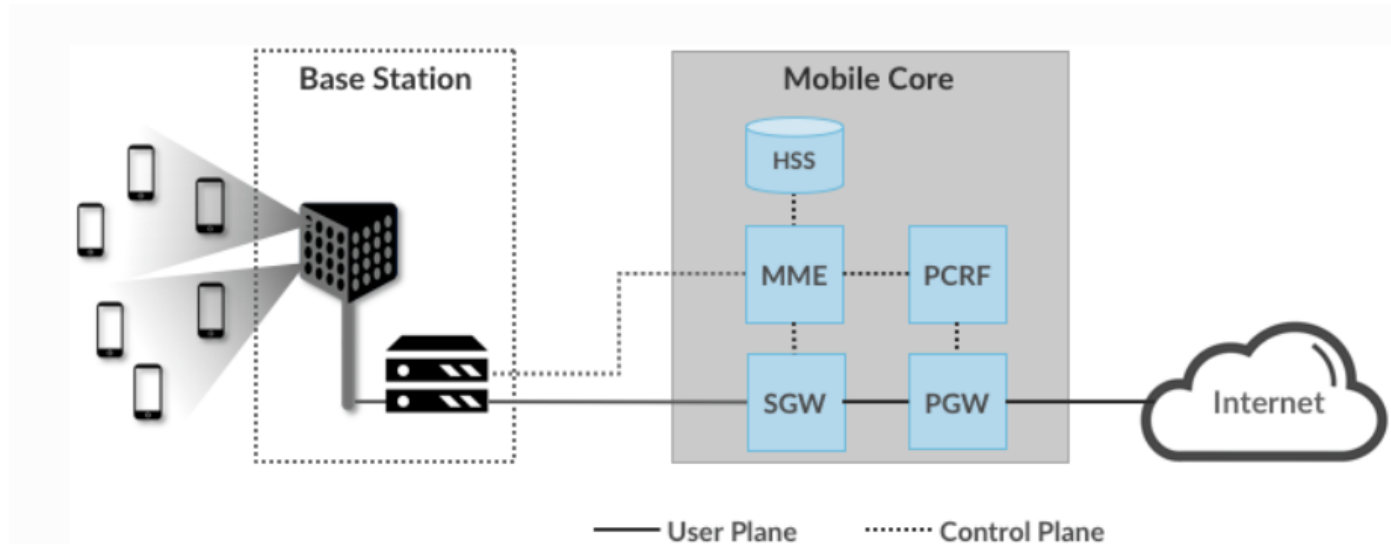
- Αρχιτεκτονική
- Radio Access Network (RAN)
- Evolved Packet Core (EPC)

■ 5G

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



Evolved Packet Core

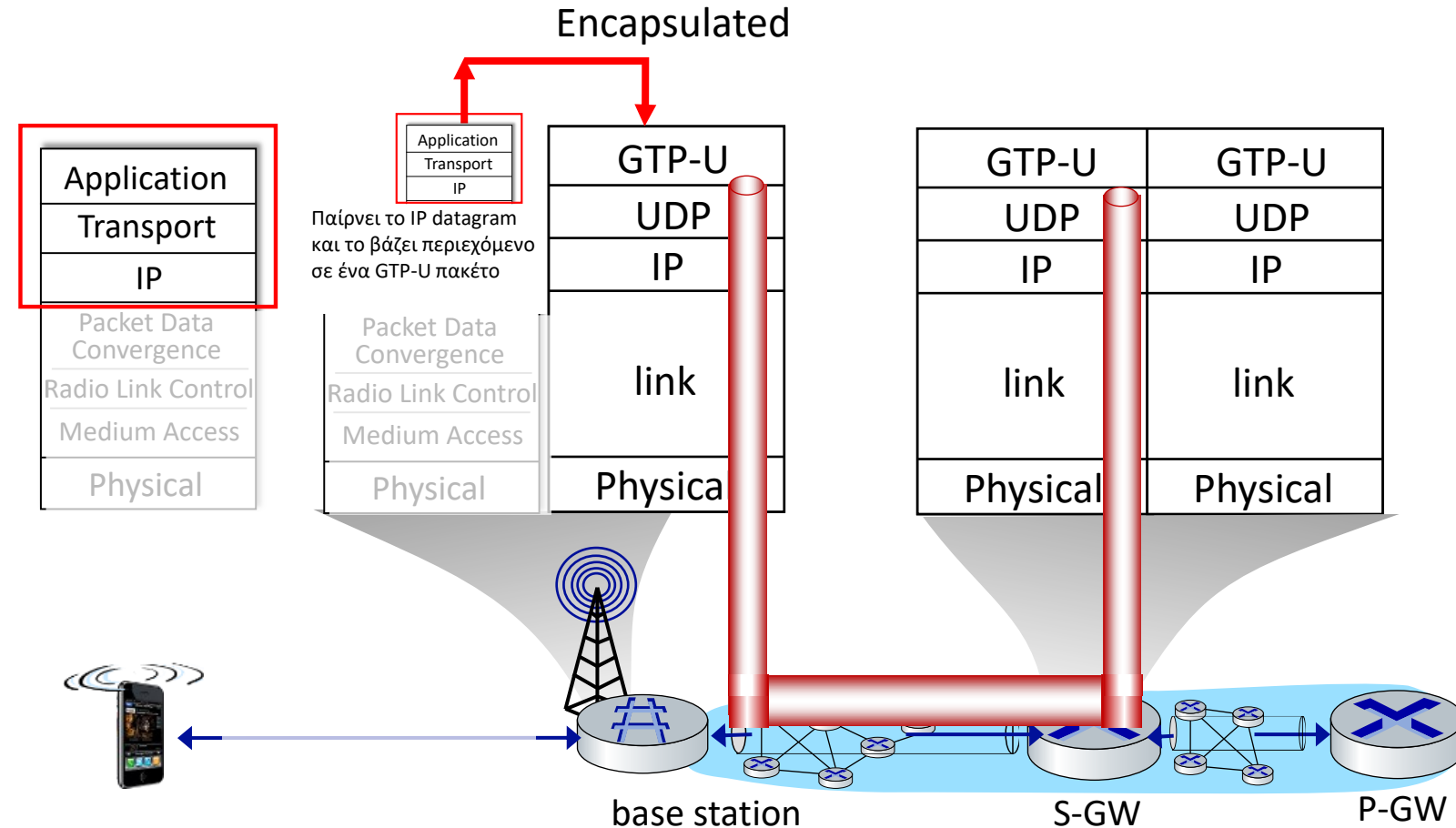


- MME (Mobility Management Entity -MME):
 - Καταγράφει και διαχειρίζεται την κινητικότητα, παρακολουθεί τοποθεσία, εκτελεί σελιδοποίηση, μεταπομπές και περιαγωγή
 - Υποστηρίζει λειτουργίες επιπέδου ελέγχου για διαχείριση συνεδριών στον πυρήνα, ρύθμιση data plane
- HSS (Home Subscriber Server): Βάση δεδομένων 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

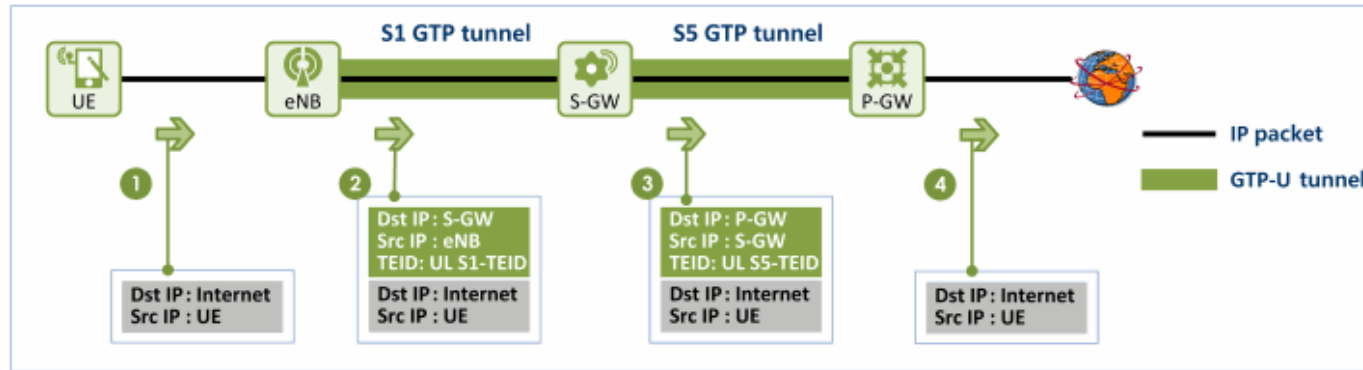
LTE επίπεδο δεδομένων: evolved packet core

Σήραγγες (tunnels):

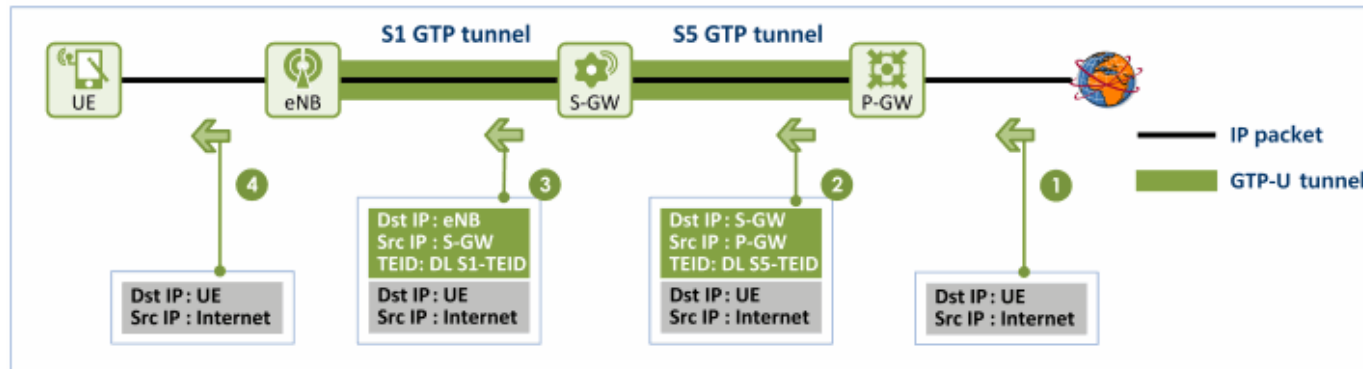
- BS: ενθυλακώνει το datagram του κινητού με χρήση **G**PRS (General Packet Radio Service) **T**unneling **P**rotocol (GTP) μέσα σε UDP και το αποστέλλει στο S-GW
- Σήραγγα BS → S-GW: IP source addr: BS, IP dest addr: S-GW
- Το S-GW αποθυλακώνει και προωθεί με νέα σήραγγα τα datagrams στο P-GW
- **Εύκολη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



LTE evolved packet core: σήραγγες



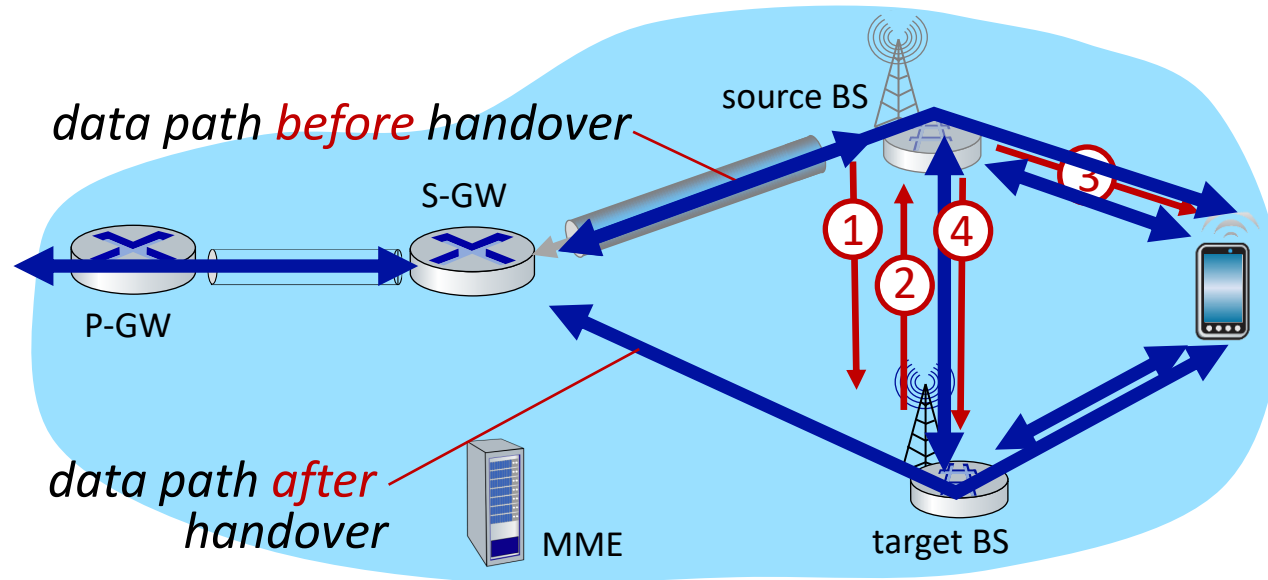
(a) from the UE to the Internet



(b) from the Internet to the UE

- Η προώθηση στους ενδιάμεσους δρομολογητές του mobile core γίνεται με τις IP addresses του GPT πακέτου (που ενθυλακώνει το αρχικό πακέτο)
- Tunnel Endpoint ID (TEID) εκχωρείται σε κάθε σήραγγα, μεταφέρεται στην GPT κεφαλίδα ώστε να ξέρουν ο ενδιάμεσος (S-GW) πως να χειριστεί το GPT πακέτο
- Το TEID/σήραγγα 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

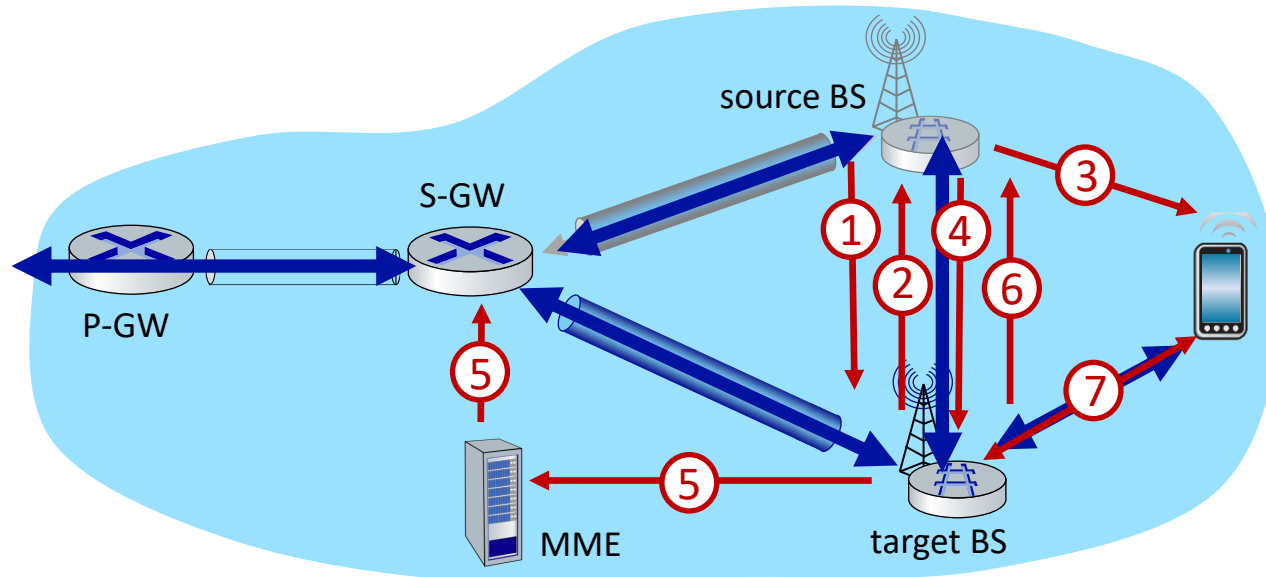
② Το νέο (target) BS εκχωρεί χρονοθυρίδες/subcarriers, ανταποκρίνεται με HO ACK

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

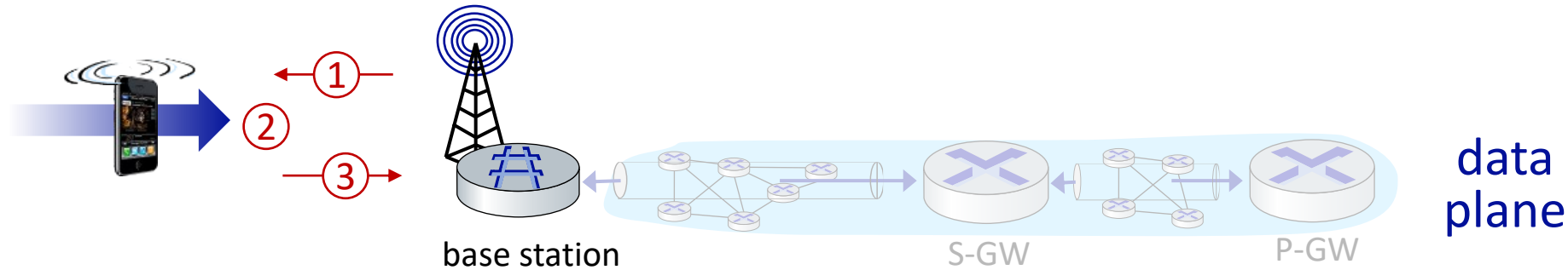


- ⑤ Το νέο (target) BS ενημερώνει το MME ότι είναι το νέο BS για το κινητό
- Το MME δίνει εντολή στο S-GW να αλλάξει το τελικό σημείο της σήραγγας στο νέο BS

- 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

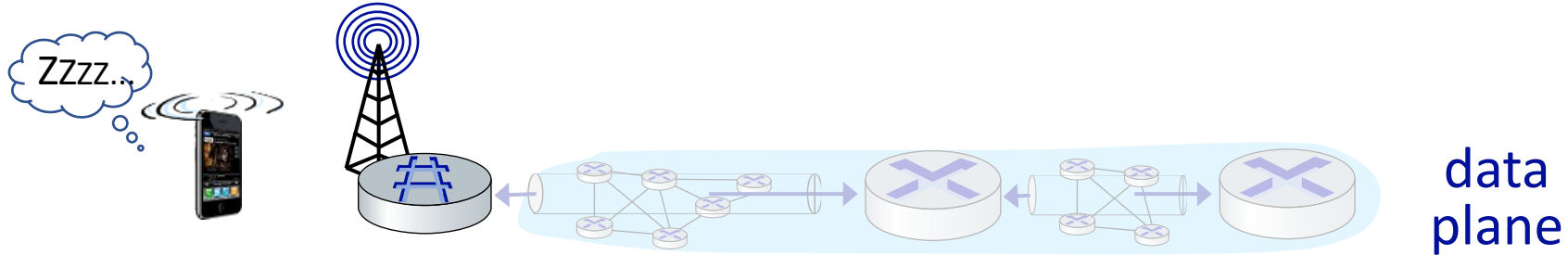
Σήραγγα (tunnel): τα κινητά έχουν 'επίπεδες' IP διευθύνσεις (όχι ιεραρχικές π.χ. με βάση το BS), οι δρομολογητές δεν έχουν στους πίνακες δρομολόγησης τους τις διευθύνσεις των κινητών, η δρομολόγηση δεν χρησιμοποιεί την IP διεύθυνση του κινητού αλλά γίνεται με τη σήραγγα

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: διάμετρος κυψελών 10-100 m, απαιτείται πυκνή ανάπτυξη νέων σταθμών βάσης σε περιοχές που θα μπει mmWave
 - 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)

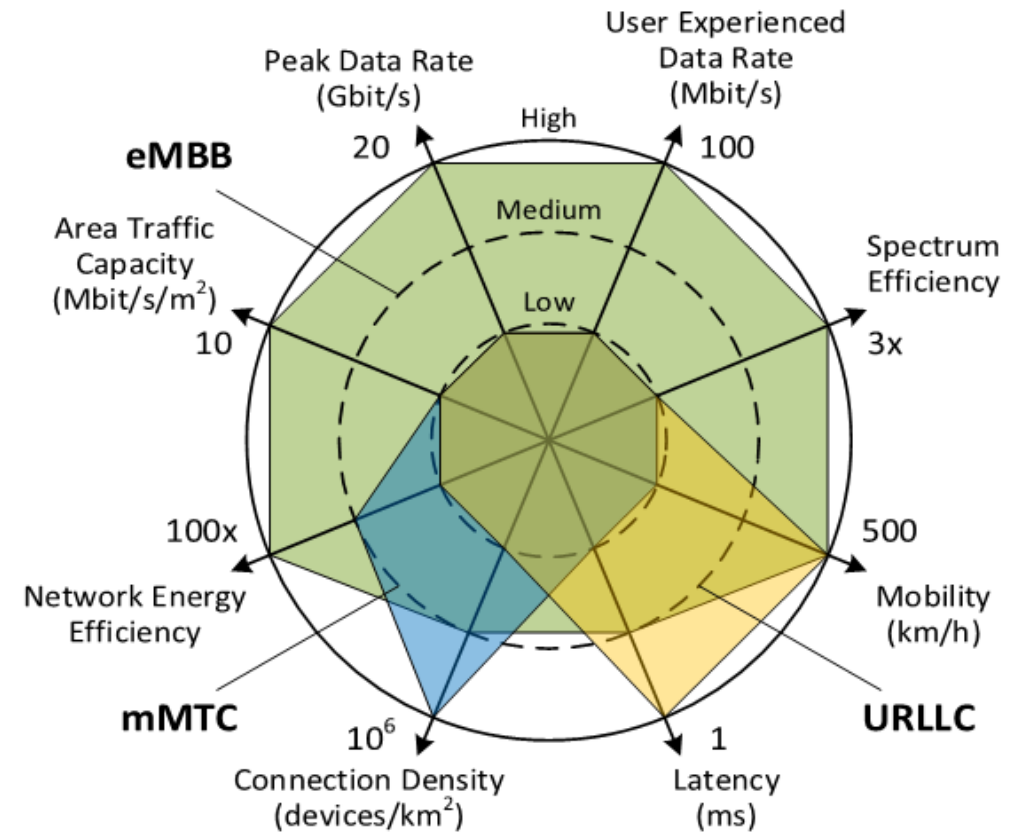
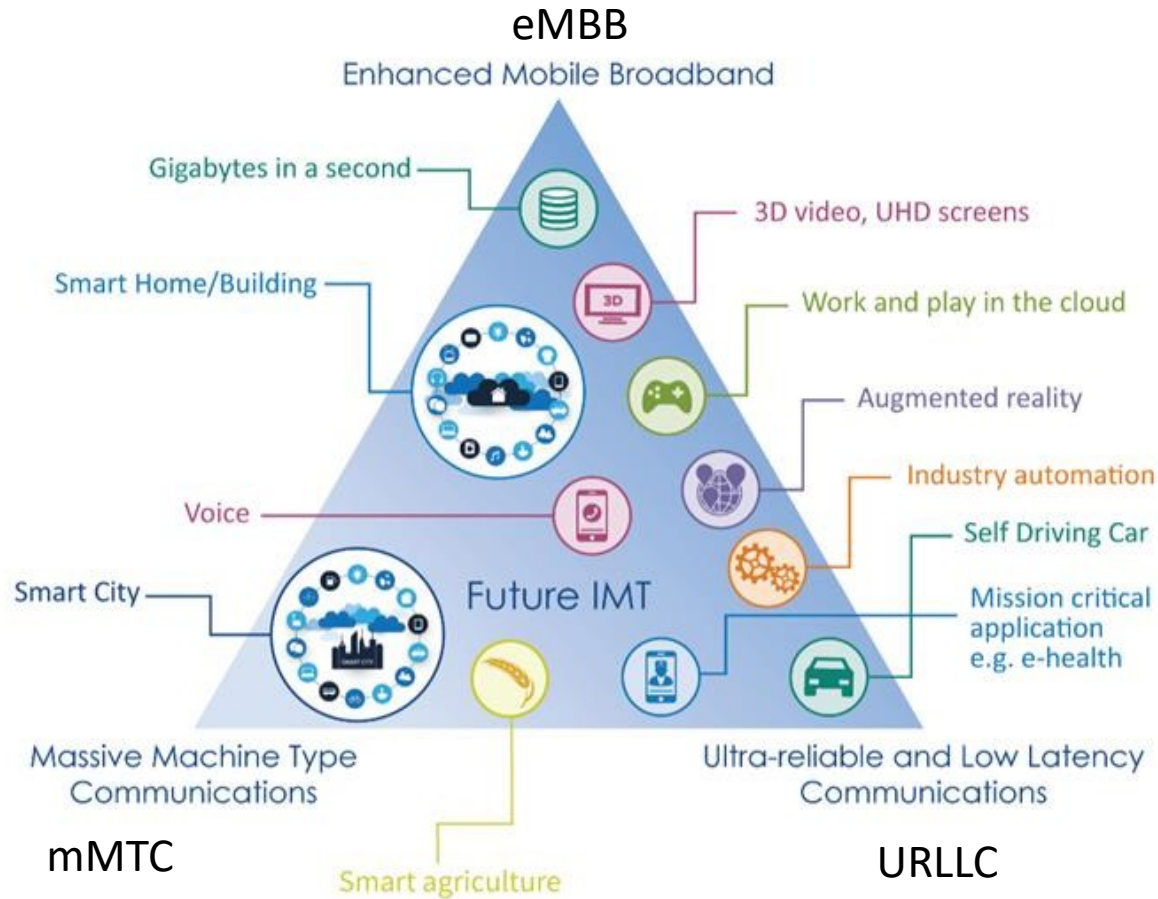
Το όραμα του 5G

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 (#/km2)	10 ⁵	10 ⁶	10x
Network Energy Efficiency	Baseline	100x	100x
Area Traffic Capacity (Mbps/m2)	0.1	10	100x

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

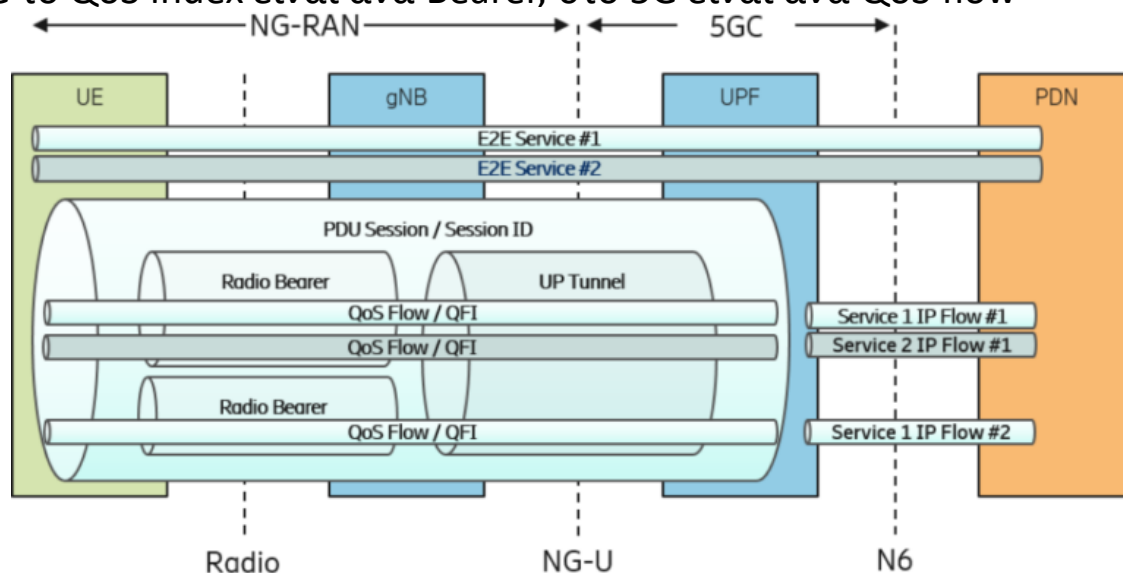
3GPP translates that to specifications

Εφαρμογές και απαιτήσεις



QoS in 5G

- Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS): Βασικό για υποστήριξη των 3 τύπων εφαρμογών
- Protocol Data Unit (PDU) session: αντιπροσωπεύει μια λογική σύνδεση μεταξύ ενός User Equipment (UE) και του 5G core (5GC), φέρει ροές με συγκεκριμένες απαιτήσεις
- Στο 5G ένα UE μπορεί να έχει μία ή περισσότερες PDU sessions, η καθεμία έναν ή περισσότερους Radio Bearer, ο καθένας μία ή περισσότερες QoS flows (ροές)
 - 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 index είναι ανά Bearer, στο 5G είναι ανά QoS flow



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)

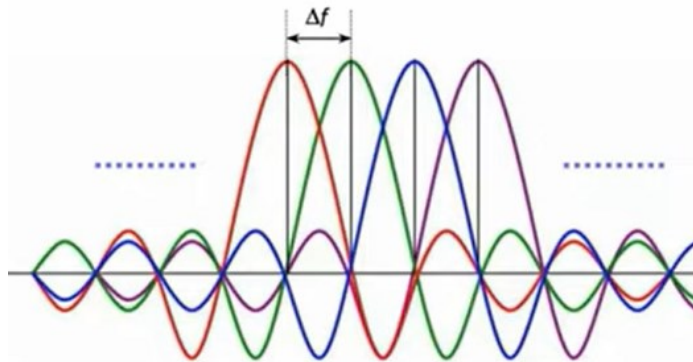
■ 5G

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

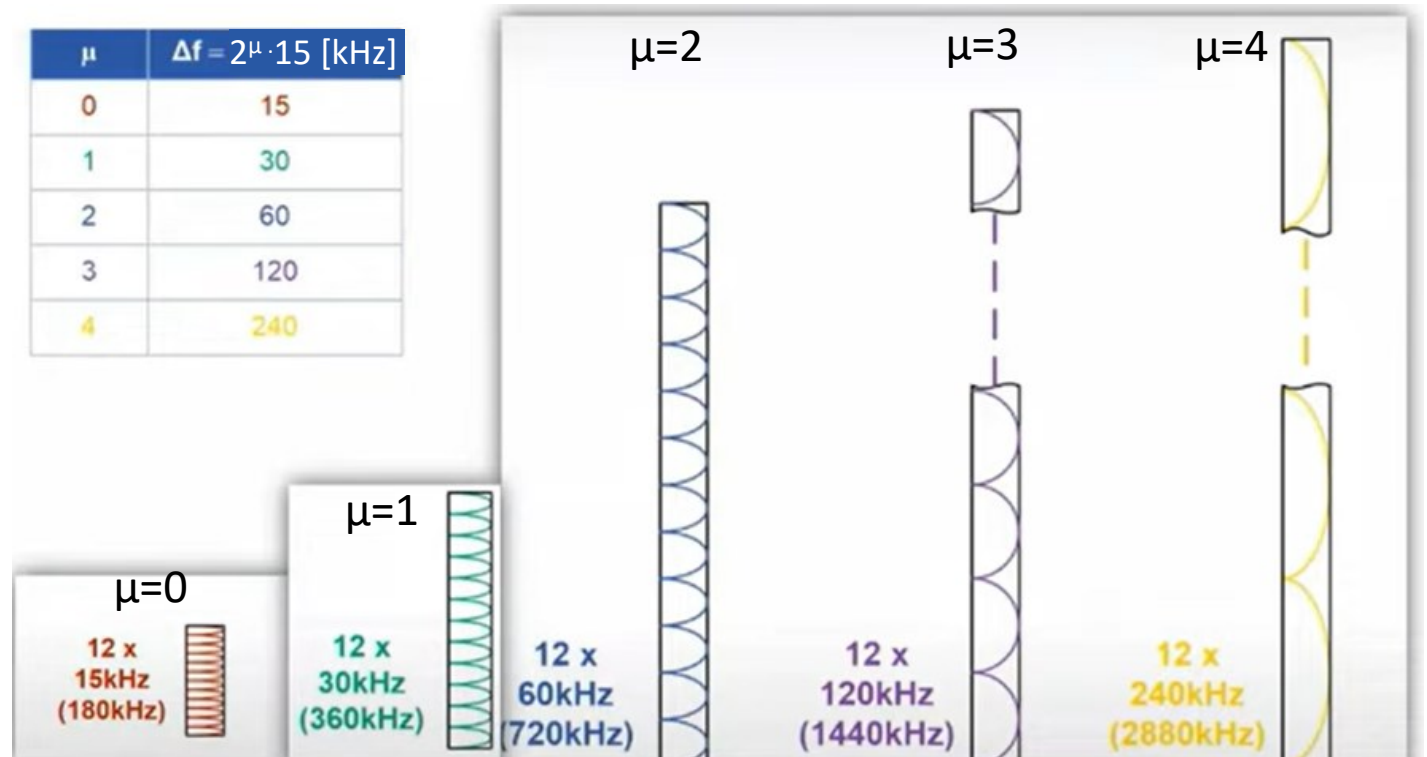


5G (NR) New Radio Numerology

- **Numerology** = parameter μ defining the OFDM waveforms (subcarrier spacing)
- Subcarrier spacing (SCS): $\Delta f = 2^\mu \times 15$ 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)

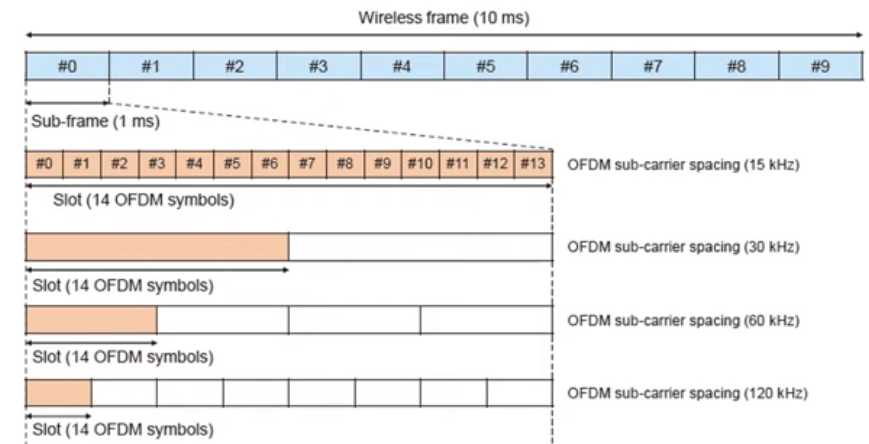


μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15$ [kHz]
0	15
1	30
2	60
3	120
4	240

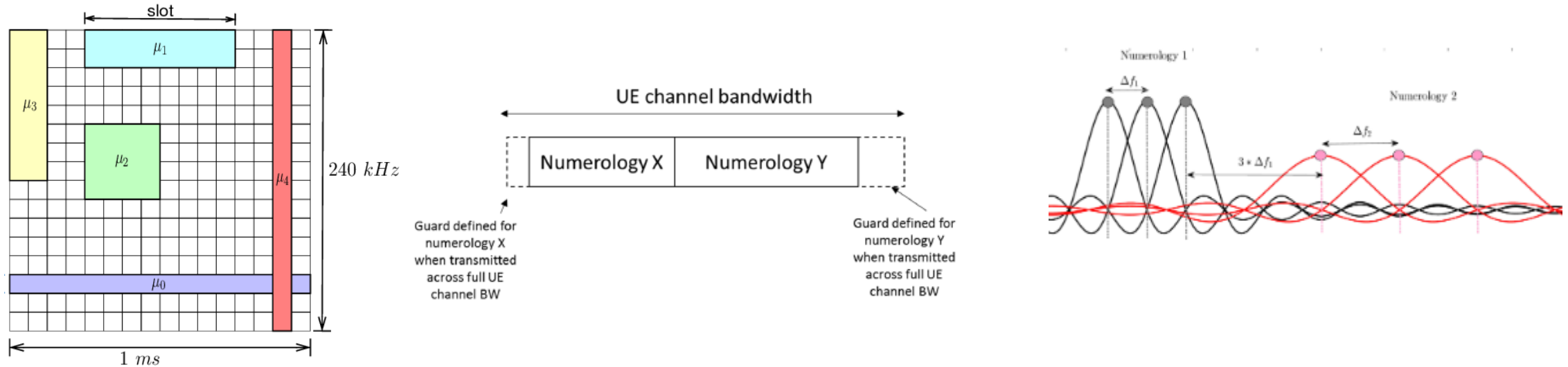


5G NR (New Radio) Radio Frame

- Το 5G NR πλαίσιο (frame) είναι 10 ms (ίδιο με 4G) και χωρίζεται σε 10 υποπλάγια (subframes) διάρκειας 1 ms (ίδιο με 4G)
- Τα subframes χωρίζονται σε slots, κάθε slot έχει 14 subslots (=14 symbols), η διάρκεια ενός slot ορίζεται από το numerology / sub-carrier spacing μ (4G: το subframe έχει 2 slots, 14 subslots in subframe)
 - Slot 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 symbols/slot, symbol duration = slot duration/14
- RB = 12 subcarriers (spectrum = $12 \times 2^\mu \times 15$ KHz) x slot duration ($= 1/2^\mu$ ms) = $12 \times 15 \text{ kHz/ms}$
→ τα RB έχουν πάντα ίδιο spectrum x time εμβαδόν (=capacity) ανεξάρτητος του μ



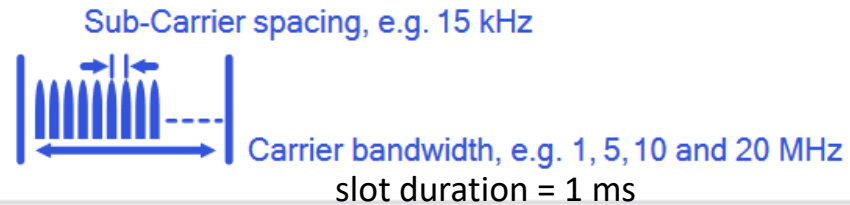
Flexible numerology



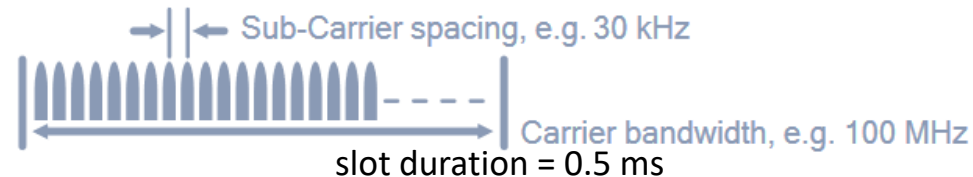
- Υποσύνολο των OFDM υποκαναλιών (subcarriers) στο ίδιο κανάλι μπορεί να χρησιμοποιεί ένα numerology/subcarrier spacing και άλλο μέρος διαφορετικό
- Υπάρχει πρόβλημα παρεμβολών μεταξύ OFDM subcarriers που χρησιμοποιούν διαφορετικά numerologies
 - Το 3GPP ορίζει guardband στις άκρες του καναλιού ανάλογο 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 μερών με διαφορετικό numerology, η ανάθεση διαφορετικών numerology και guardbands εσωτερικά είναι vendor/operator specific

Συνδυασμός καναλιών / numerology

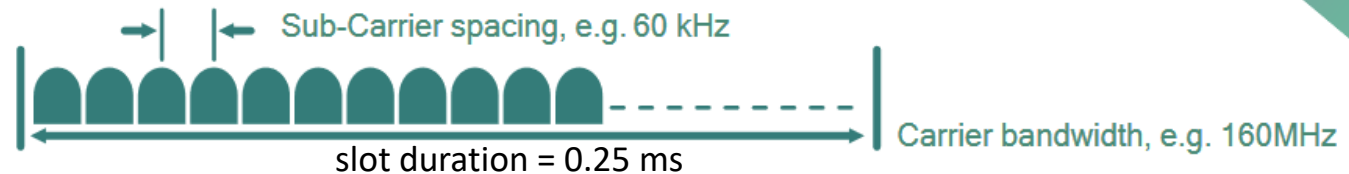
Outdoor macro coverage
e.g., FDD 700 MHz



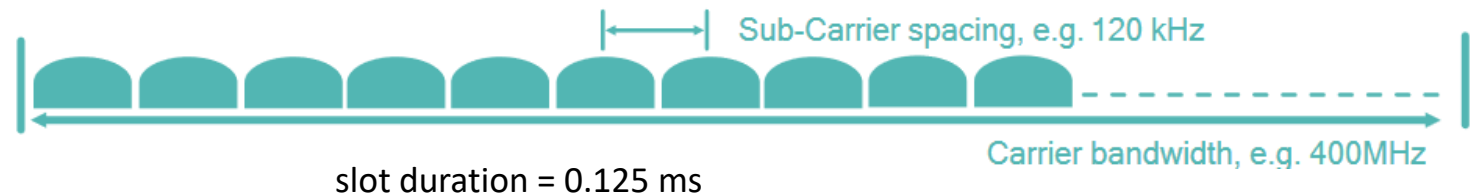
Outdoor macro and small cell
e.g., TDD 3-5 GHz



Indoor wideband
e.g., unlicensed 6 GHz



mmWave
e.g., TDD 28 GHz



2ⁿ scaling of Sub-Carrier Spacing (SCS)

While 5G standards allow multiple numerologies in the same cell or carrier*, in practice, vendors and operators tend to deploy a single numerology per carrier or even per cell (*cell and carrier differ in carrier aggregation)

Maximum Channel Bandwidth FR1

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

Αριθμός RB & GuardBand σύμφωνα με τη ζώνη του καναλιού αλλά και το numerology (μ)

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

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

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	742.5	812.5	892.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	505	665	825	985	1145	1305	1465	1625	1785	1945	2105	2265	2425	2585	2745
60	N/A	1010	1330	1650	1970	2290	2610	2930	3250	3570	3890	4210	4530	4850	5170

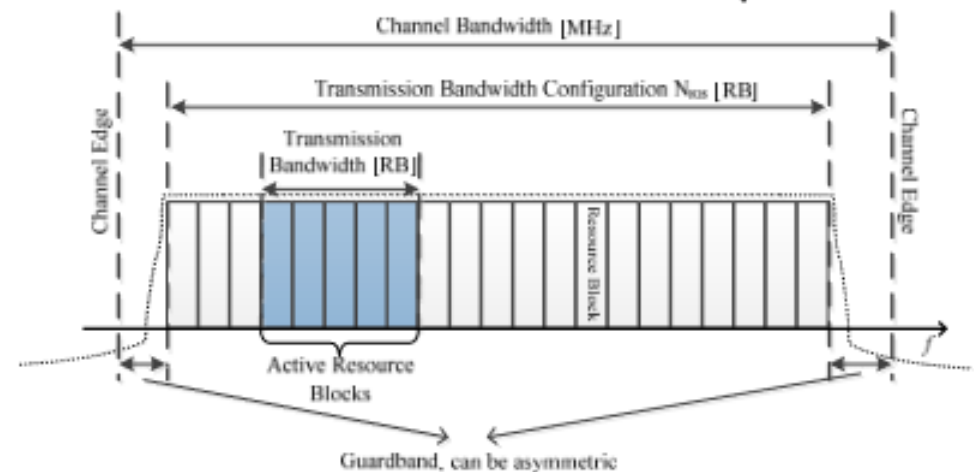
Table 5.3.3-1: Minimum guardband for each UE channel bandwidth and SCS (kHz)

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

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.

Εύρος ζώνης εκπομπής/λήψης κινητού

- Το UE εκπέμπει/λαμβάνει σε ένα μέρος του φάσματος (bandwidth part - BWP) ενός καναλιού New Radio (έστω κοιτώντας μια 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

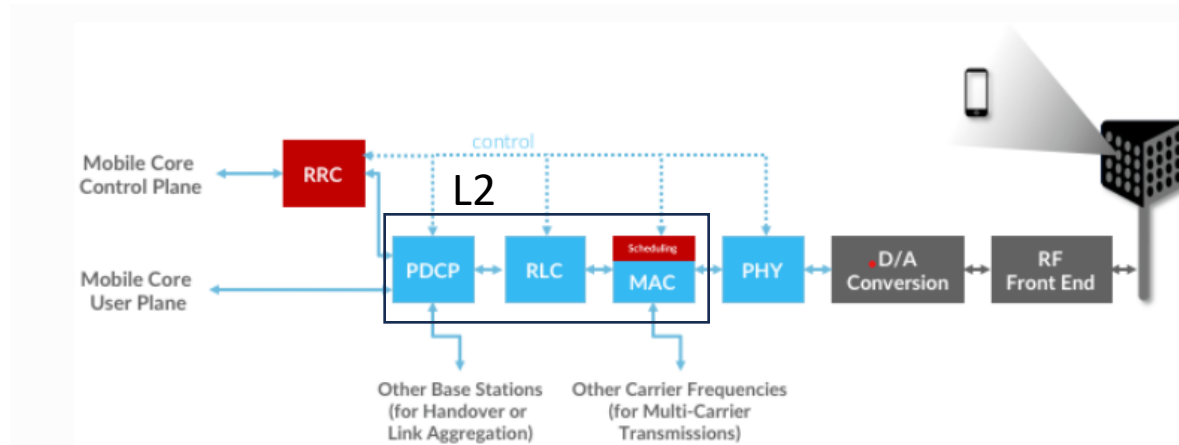
- Αρχιτεκτονική
- Radio Access Network (RAN)
- Evolved Packet Core (EPC)

■ 5G

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



RAN - Στοιίβα πρωτοκόλλων



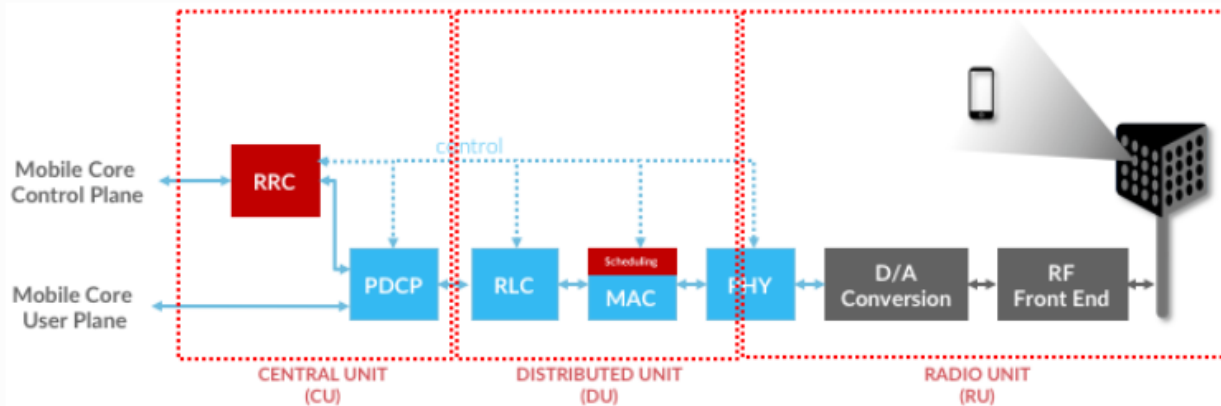
Στοιίβα πρωτοκόλλων του Base Station παρουσιασμένη οριζόντια σαν μια «αλυσίδα» επεξεργασίας πακέτων (παρόμοια εικόνα στο 4G αλλά εκεί ήταν κάθετα)

- Basestation in 5G: gNB – next generation Node Bearer
- 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 αυτές οι λειτουργίες εκτελούνταν στο Base Station)



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

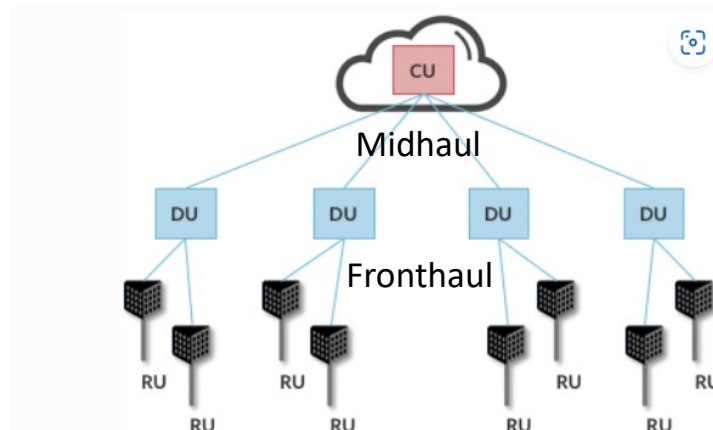
Διαχωρισμός του RAN

Κεντρική μονάδα (Central Unit - CU)

Κατανεμημένη μονάδα (Distributed Unit - DU)

Ραδιο μονάδα (Radio Unit - RU)

Το RRC αναφέρεται και ως CU-C (control) και το PDCP ως CU-U (user)



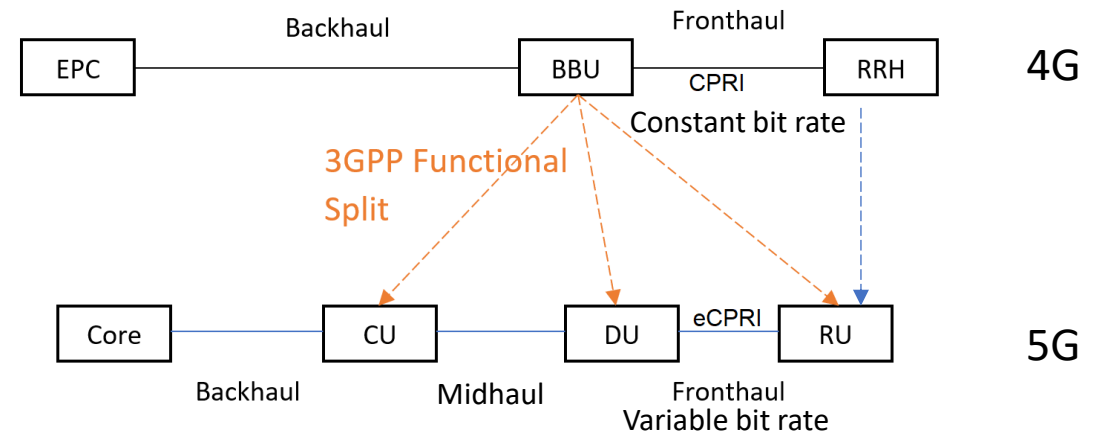
Split-RAN hierarchy, with one CU serving multiple DUs, each of which serves multiple RUs.

Ονοματολογία συνδεσιμότητας/διεπαφών μεταξύ των μονάδων:

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

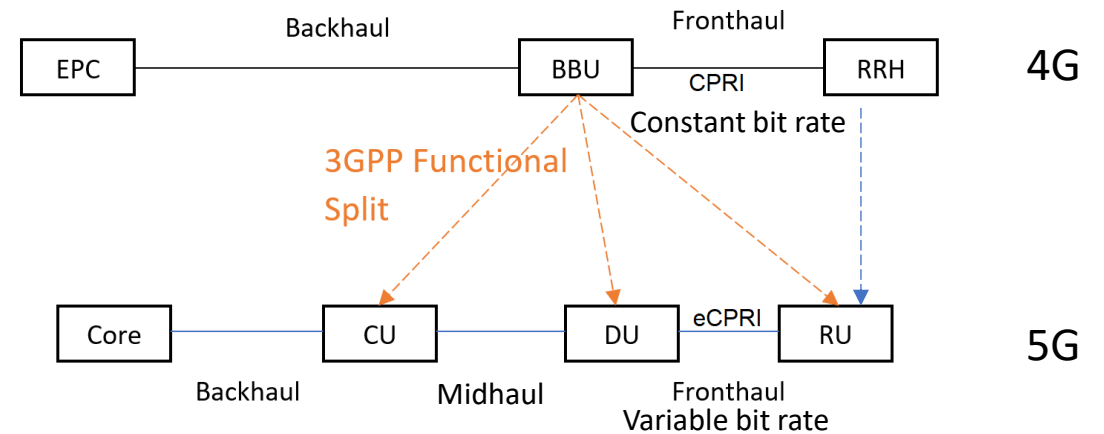
*εδώ συζητάμε πώς "σπάμε" το RAN· το Core βρίσκεται πιο "πίσω" στο κυψελοειδές δίκτυο πρόσβασης

C-RAN architecture



- 4G: RRH (remote radio head) επεξεργασία του RF σήματος, BBU (baseband unit) ψηφιακή επεξεργασία σήματος στη βάση του πυλώνα
- RU: μετάδοση/λήψη των ασύρματων σημάτων από και προς την κεραία, αναλογική/ψηφιακή μετατροπή, το χαμηλό τμήμα του L1 (low PHY), καθώς και λειτουργία του beamforming
 - Ειδικό hardware
- DU: περιλαμβάνει τα RLC και MAC (low L2-Link layer), και μέρος του L1 (high PHY), λειτουργίες 'πραγματικού χρόνου' (βρόγχος ελέγχου <10 msec)
- CU: περιλαμβάνει τα RRC, και PDCP = high L2 (Link layer) και προσαρμογή στο L3, είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες 'μη πραγματικού χρόνου' (βρόγχος ελέγχου > 100 msec)
- Το CU και DU είναι software και μπορεί να τρέξουν σε servers (commodity of the shelf - COTS)
- Χωρισμός λειτουργιών και δυνατότητα επιλογής στην τοποθέτησή τους, συνήθως τα RU & DU τα βάζουν στην ίδια τοποθεσία ...

C-RAN architecture



Network Interfaces

■ Fronthaul

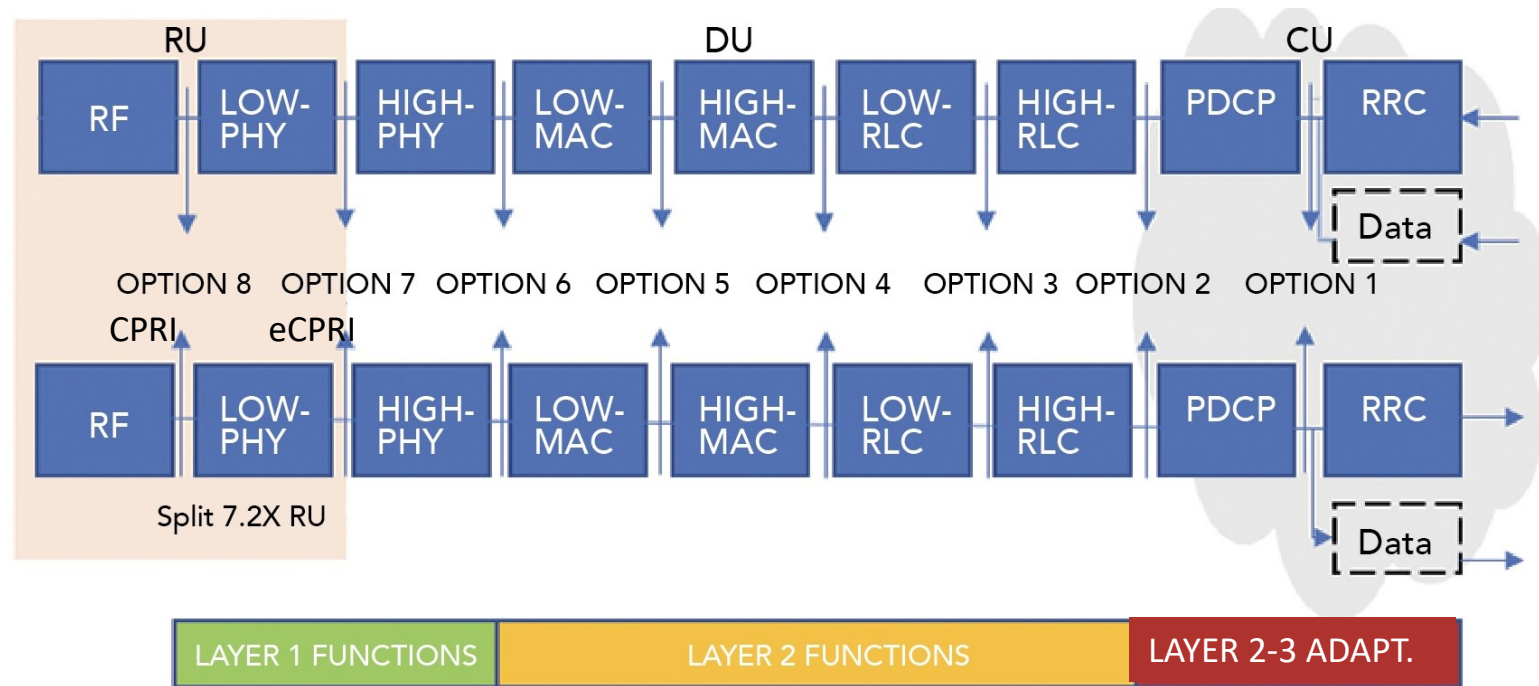
- CPRI (4G): Μεταφέρει ψηφιοποιημένα δείγματα IQ, π.χ. στη λήψη, τα bits μετά την μετατροπή συχνότητας και μετατροπή του αναλογικό σε ψηφιακό σήμα (ADC), το RRH δεν ξέρει τα 'κενά' RB
→ Constant bit rate
- eCPRI (5G): έχει ξεκινήσει η επεξεργασία στο PHY και η αποδιαμόρφωση, πετάει τα 'κενά' RB
→ Variable bit rate (ρυθμός ανάλογος του φορτίου)

■ Midhaul: εμφάνιση midhaul στο 5G, F1 interface, μετά από το RLC (μετά την αξιόπιστη μεταφορά /επανεκπομπή ARQ πλαισίων και συναρμολόγηση τους), άρα μεταφέρει L2 πλαίσια

- Fronthaul requires ~10-25 Gbps (per 100 Mhz) and latency <100 μ s (for ARQ)
- Midhaul (in 5G) requires ~1-10 Gbps (per 100 Mhz) and latency <10 ms (for handover)

■ Backhaul μοιάζει και στα δύο: GTP-U over IP

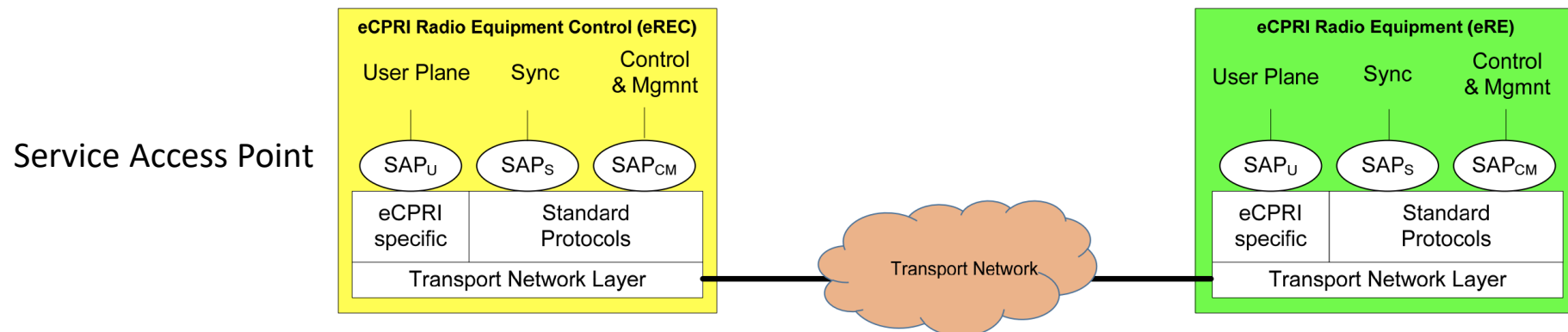
Functional Splits



- 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)

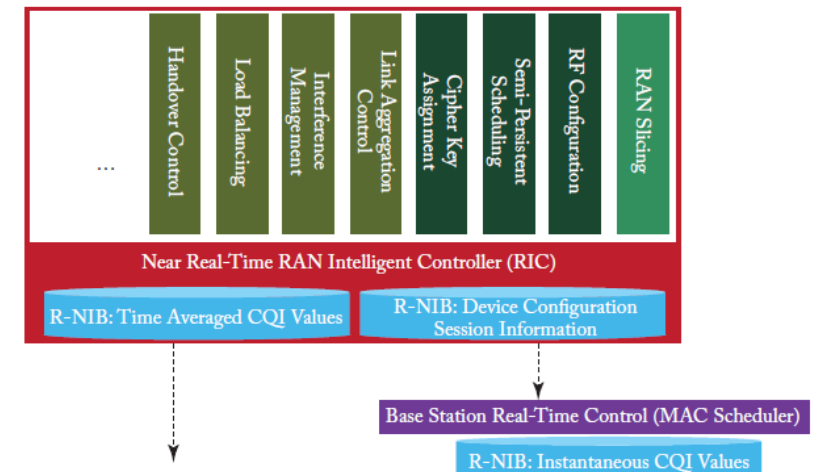
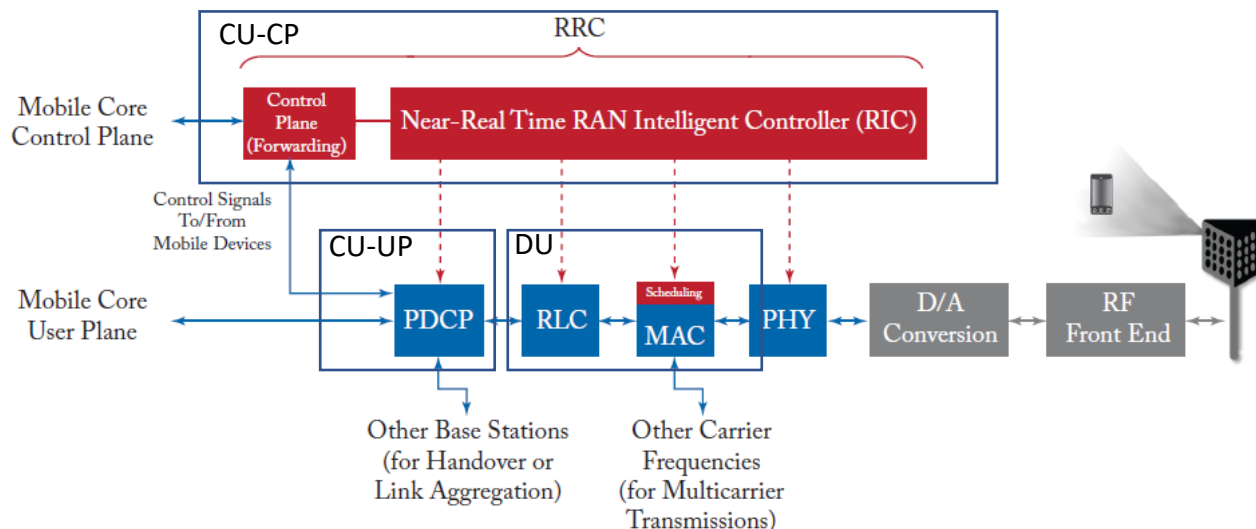
Evolved CPRI για μεταφορά fronthaul κίνησης

- 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 εντολές γνωστών πρωτοκόλλων (π.χ. SNMP)
- Οποιοσδήποτε τύπος δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά, εφόσον πληροί τις αυστηρές απαιτήσεις (υψηλή χωρητικότητα τάξης Gbps και χαμηλή καθυστέρηση τάξης 100 μs)



Software defined (SD)-RAN

- Υλοποίηση σύμφωνα με τις αρχές των Δικτύων Προγραμματιζόμενων μέσω Λογισμικού (SDN)
- Ο έλεγχος των πόρων της ασύρματης μετάδοσης χωρίζεται στα δύο
 - Scheduler / MAC (in DU): control loop <10 msec, channel estimation, frequency/time (RB) allocation
 - Near-real time RAN Intelligent Controller (RIC) = RRC (Radio Resource Control)/CU-CP: control loop 0.1-1 sec
Includes a control plane proxy: a 3GPP-compliant way for the RAN to interface with Mobile Core's control plane
- Το RIC προσφέρει API για τον έλεγχο μέσω λογισμικού του RAN (δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης εφαρμογών, π.χ. Handover control, load balancing, interference management...)



Κινητά Δίκτυα

■ Εισαγωγή

- Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
- Γενιές κυψελοειδών δικτύων

■ Ραδιοφάσμα

■ 4G LTE

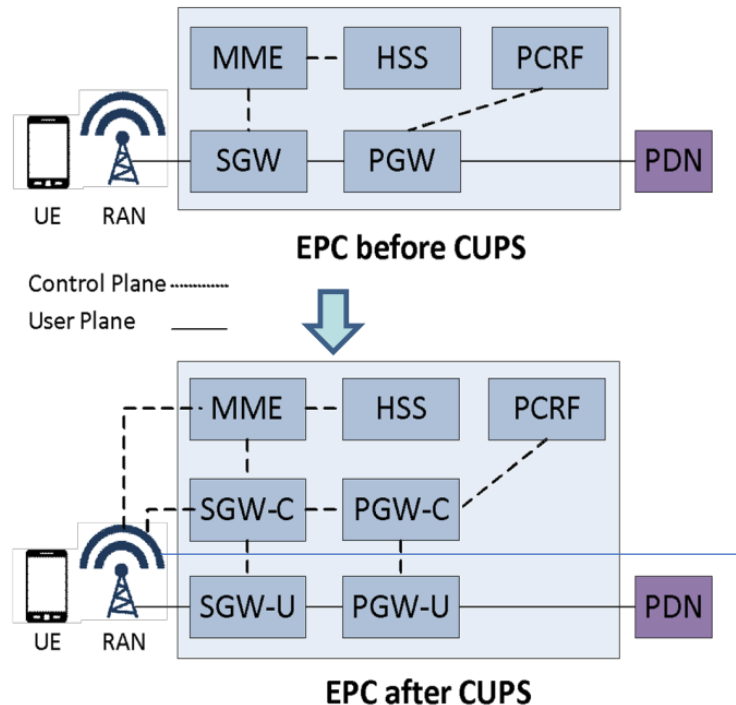
- Αρχιτεκτονική
- Radio Access Network (RAN)
- Evolved Packet Core (EPC)

■ 5G

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



4G EPC Control and User Plane Separation



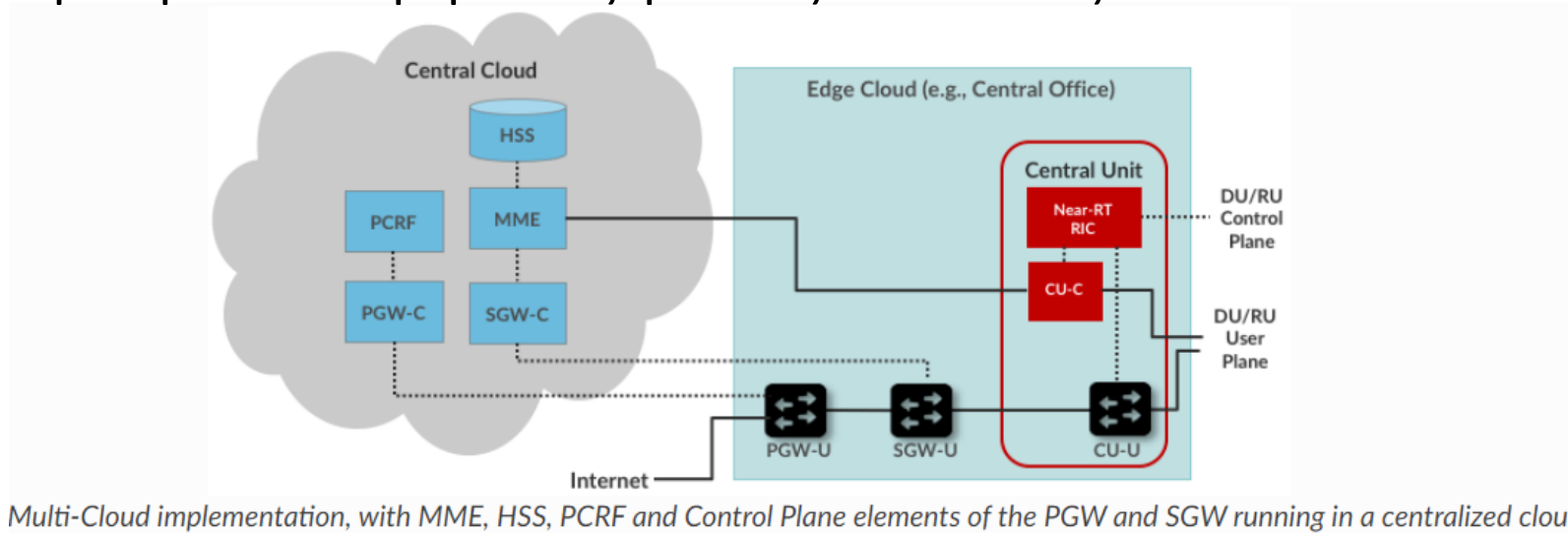
- MME (Mobility Management Entity -MME): Καταγραφή και διαχείριση της κινητικότητας, μεταπομπές, ρύθμιση data plane
- HSS (Home Subscriber Server): Βάση δεδομένων με πληροφορίες συνδρομητών
- PCRF (Policy & Charging Rules Function): Εφαρμόζει πολιτικές QoS και χρέωση
- SGW (Serving Gateway): Προωθεί 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

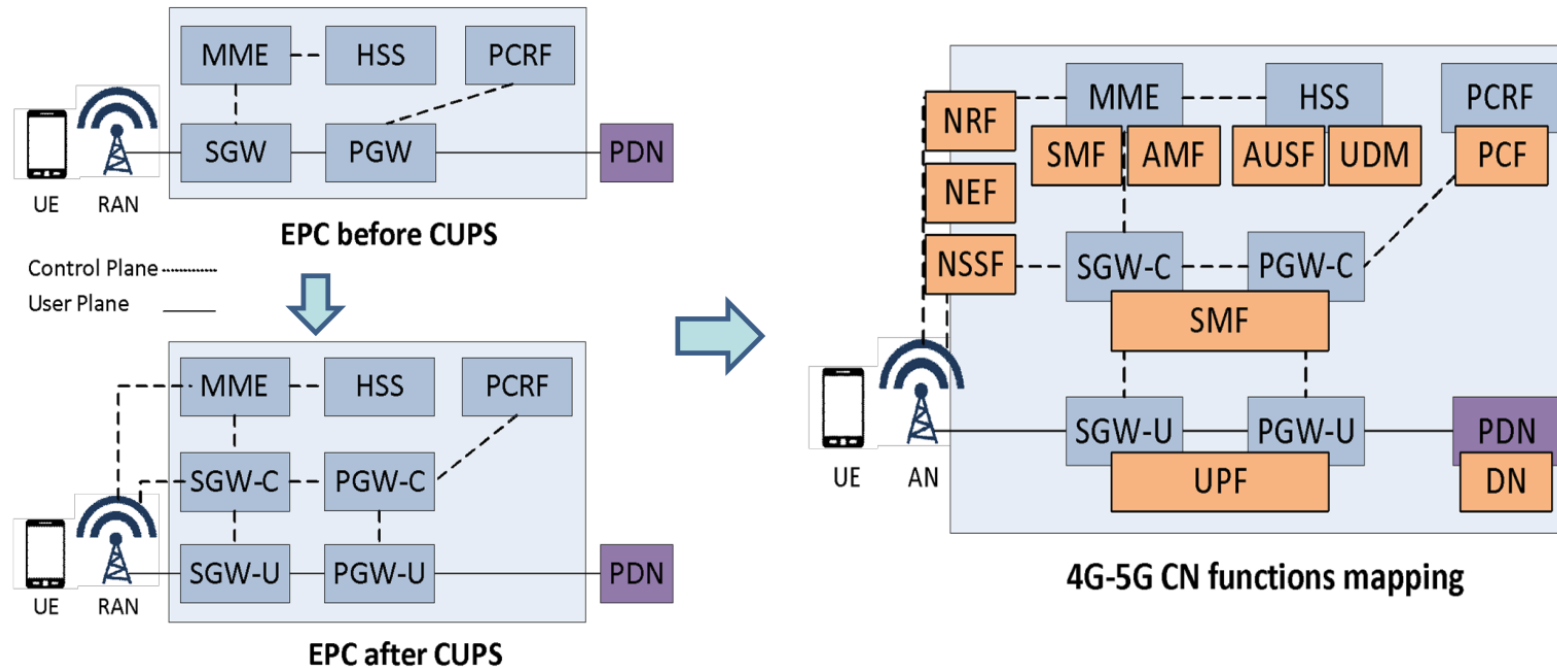
Cloud λειτουργία

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



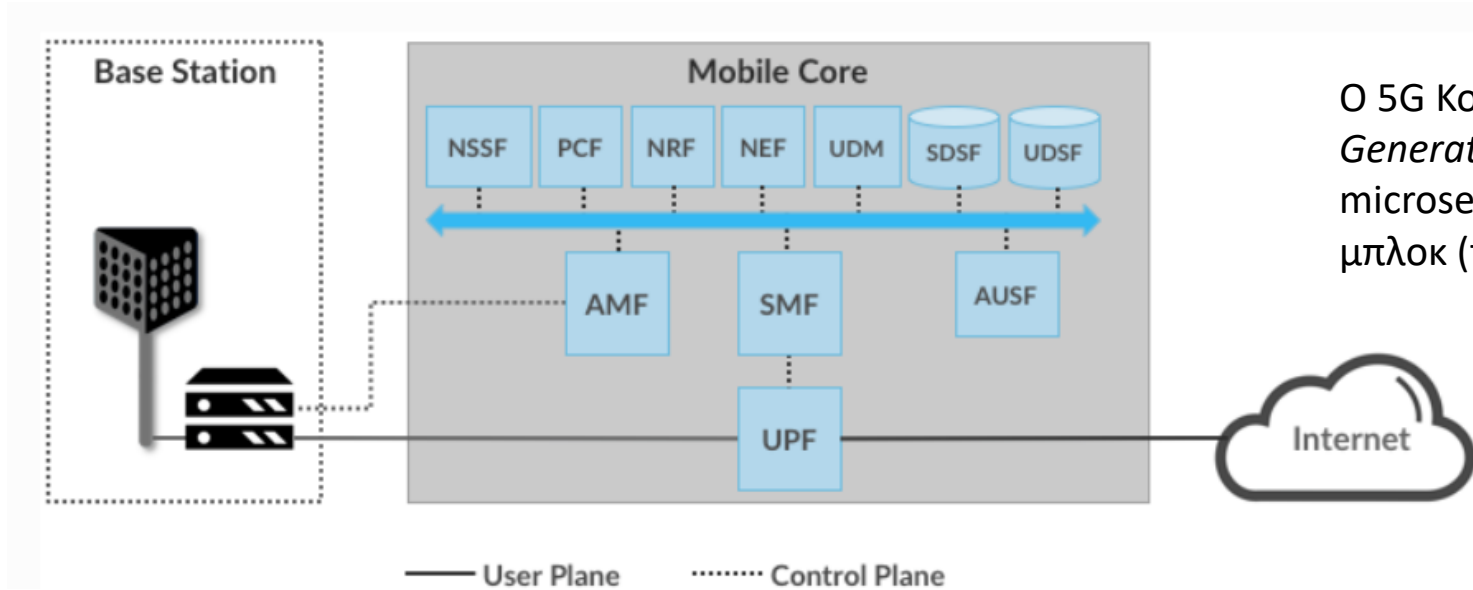
- Δυνατότητα τοποθέτησης των λειτουργικών τμημάτων ελέγχου σε μια μεγάλη υπολογιστική υποδομή με πολλούς πόρους π.χ. Central Cloud
- Ο συγκεντρωτισμός εξοικονομεί κόστος, διευκολύνει την εφαρμογή έξυπνων πολιτικών και τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων από πολλές τοποθεσίες – κόμβους

4G Core 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

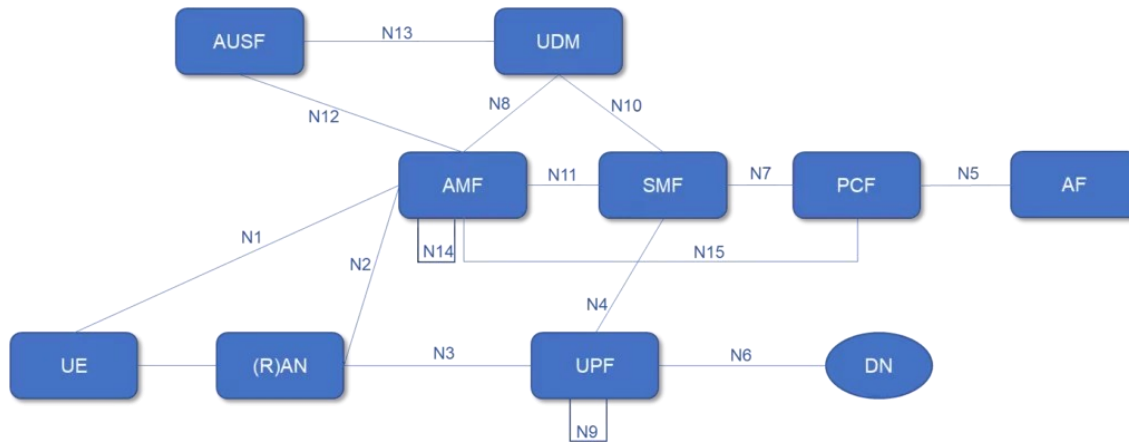


Ο 5G Κορμός Κινητής, τον οποίο το 3GPP καλεί *Next Generation NG-Core*, υιοθετεί μία αρχιτεκτονική με microservice που αποτελείται από λειτουργικά μπλοκ (functional blocks)

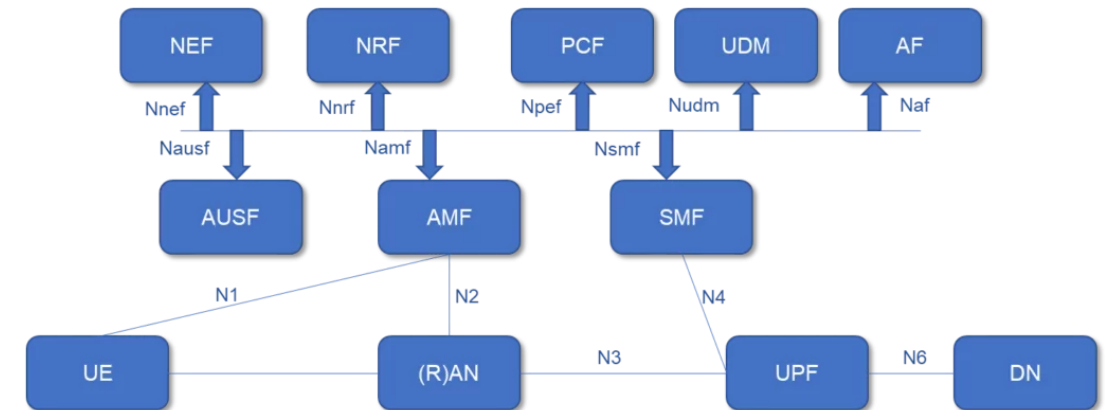
- SMF (Session Management Function): establishment, modification, and termination of user plane sessions in 5G core
- AMF (Access & Mobility Management Function): managing user authentication, authorization, mobility, and sessions in 5G RAN
- AUSF (Authentication Server Function): Authenticates UEs
- 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)

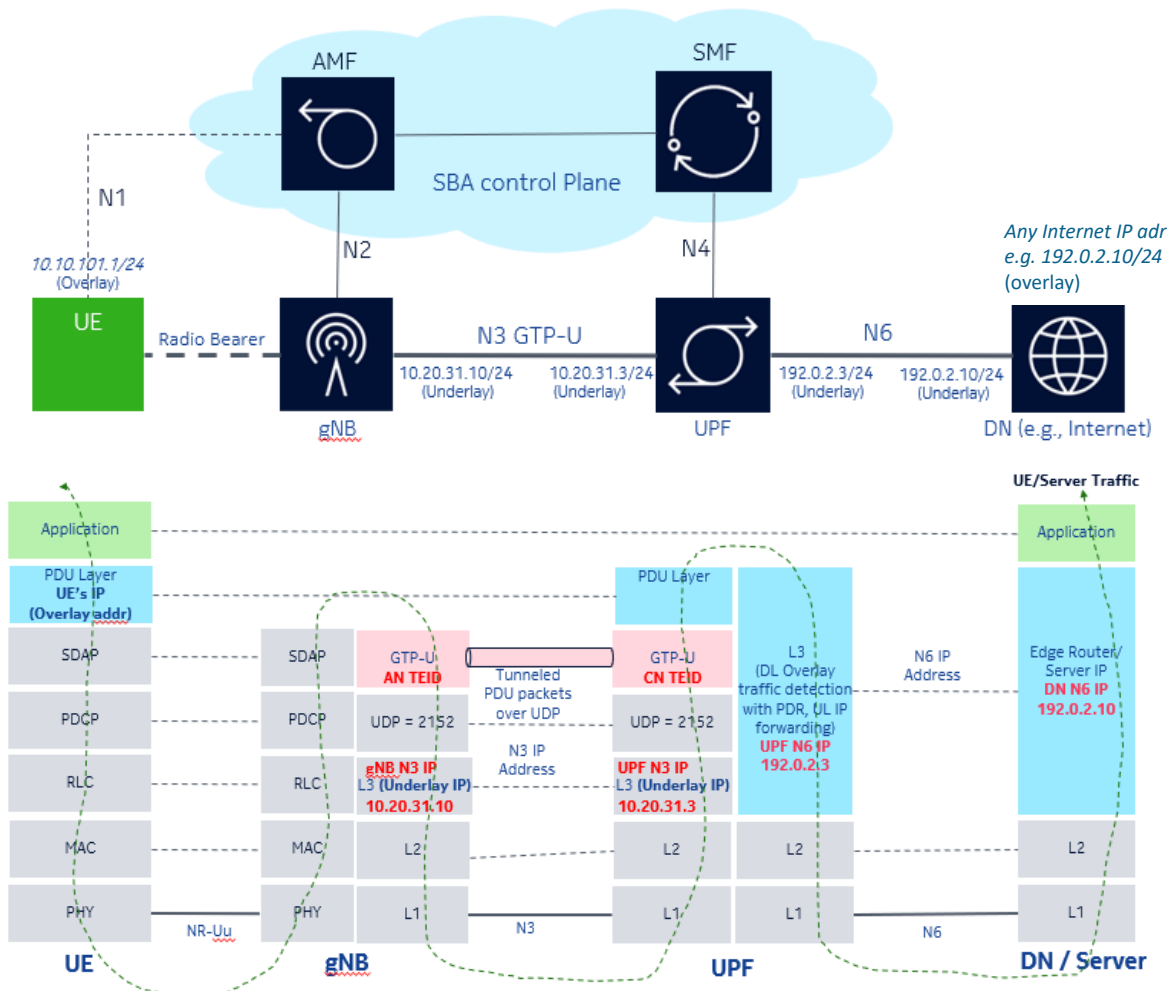


Service Based Architecture (SBA)



- 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
- Reference Point Architecture (RPA) → Service Based Architecture (SBA), Network Elements (NE) → Network Functions (NF)
 - Κάθε NF παρέχει υπηρεσίες σε άλλα NF, δεν υπάρχει μόνο ένα network element (NE) για όλο το δίκτυο
- Οφέλη SBA
 - Πιο ελεύθερα interfaces, ύπαρξη service registry, πιο ελεύθερη τοπολογία / συνδεσμολογία, τα NFs εκτελούνται ανεξάρτητα και να αυτοδιαχειρίζονται χωρίς να επηρεάζουν το ένα το άλλο
 - Στο SBA, μια υπηρεσία μπορεί εύκολα να αντικατασταθεί, αναβαθμιστεί, να υπάρξουν πολλαπλά instances, και να γίνει orchestration με άλλα NF
 - Το SBA σχεδιάστηκε με στόχο microservices και containers / to run in the cloud

5G User Plane Function



5G UPF Σήραγγες (tunnels):

- Το datagram του κινητού ενθυλακωμένο με χρήση **G**PRS (General Packet Radio Service) **T**unneling **P**rotocol (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 & **M**obility Management **F**unction: διαχείριση ελέγχου πρόσβασης, κινητικότητας και συνεδριών

Session Management **F**unction: εγκατάσταση, τροποποίηση και τερματισμός συνεδριών στον πυρήνα του 5G δικτύου

Service **D**ata **A**pplication **P**rotocol: αντιστοίχιση πακέτων σε QoS flow ID

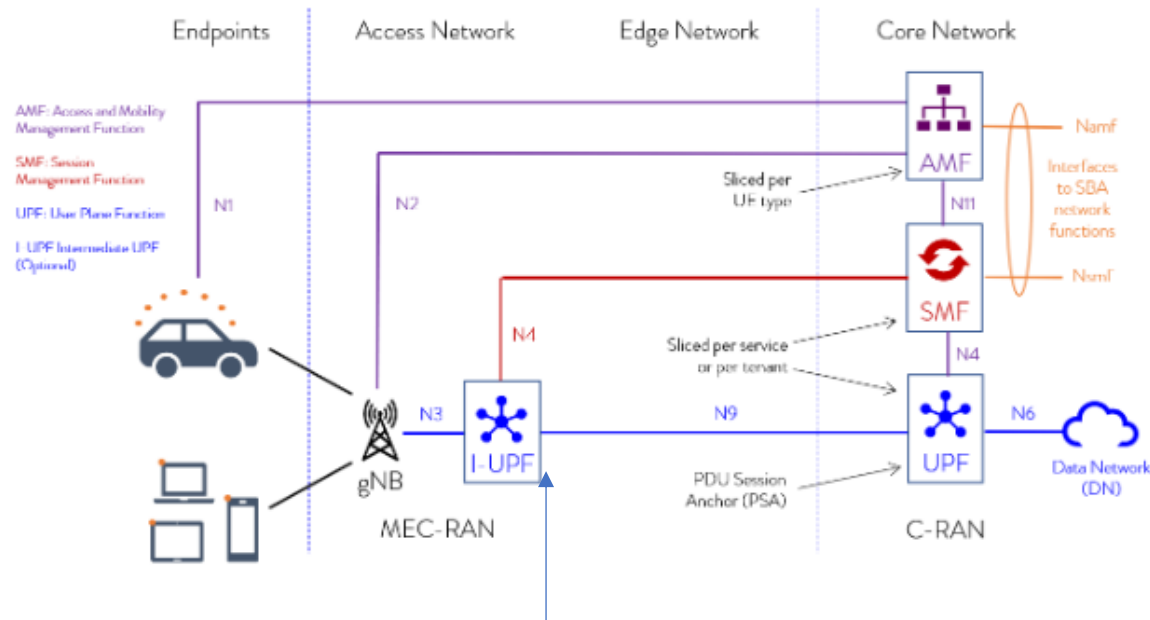
Packet **D**ata **C**onvergence Protocol: συμπίεση κεφαλίδας, κρυπτογράφηση

Radio **L**ink **C**ontrol: αρίθμηση, τμηματοποίηση/ συναρμολόγηση πακέτων, αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest)

Multiple **A**ccess **C**ontrol: πρόσβαση στο κοινό μέσο, ανάθεση χρονοθυρίδων/ συχνοτήτων

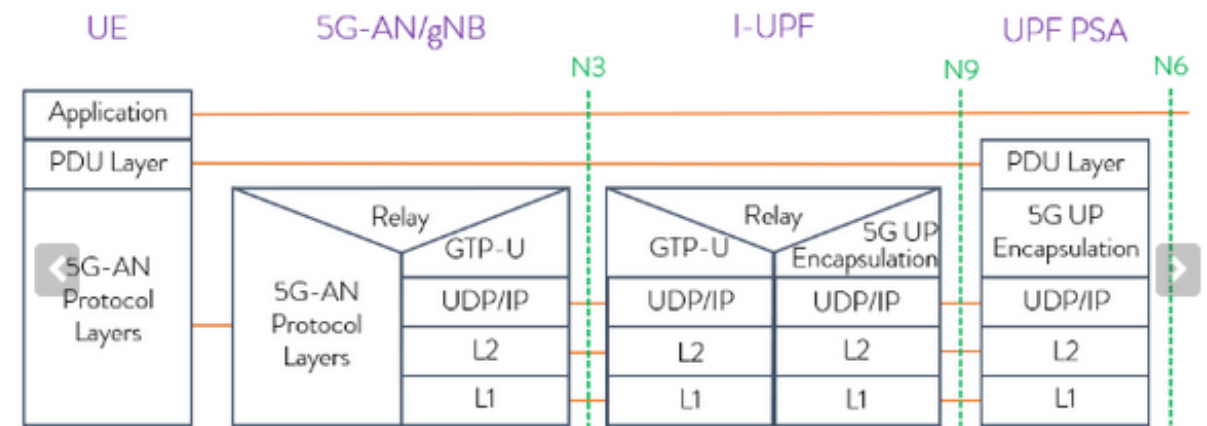
Tunnel **E**ndpoint **I**D: εκχωρείται σε κάθε User Equipment (UE), χρησιμοποιείται στα gNB και UPF για να αντιστοιχεί σήραγγα GTP σε UE (αντί IP διευθύνσεις)

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

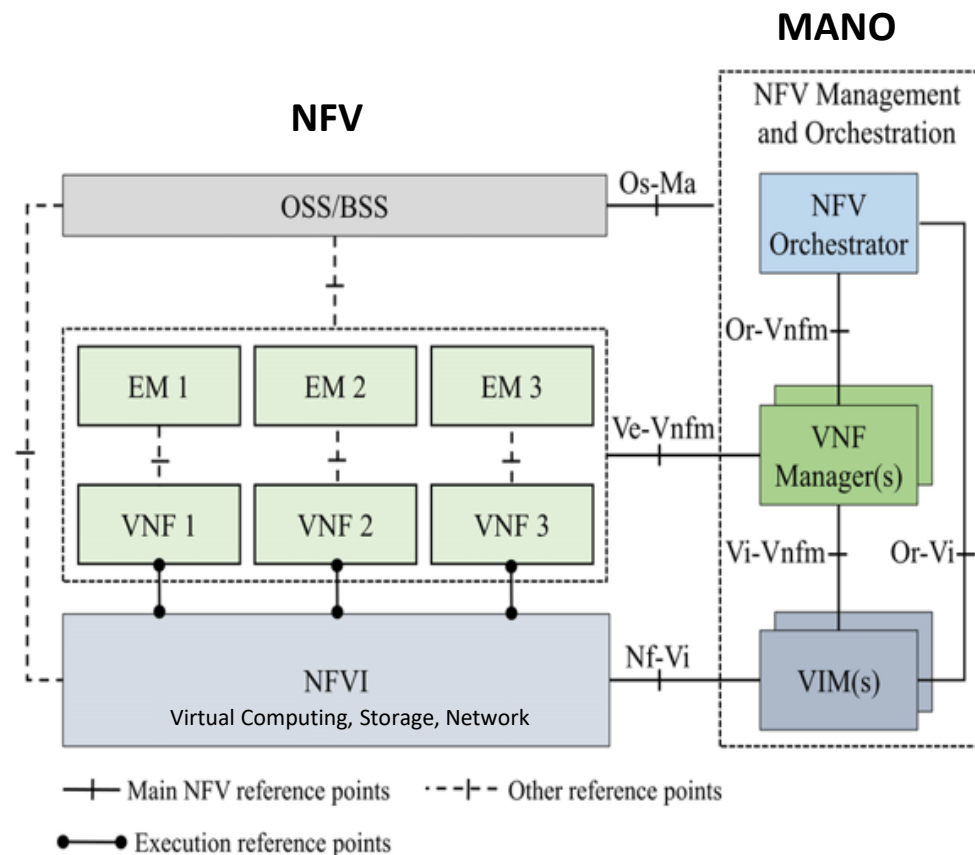


5G User Plane Protocol Stack, employing STP with 5G header extensions

NFV and MANO

Network Function Virtualization (NFV) architecture

- **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

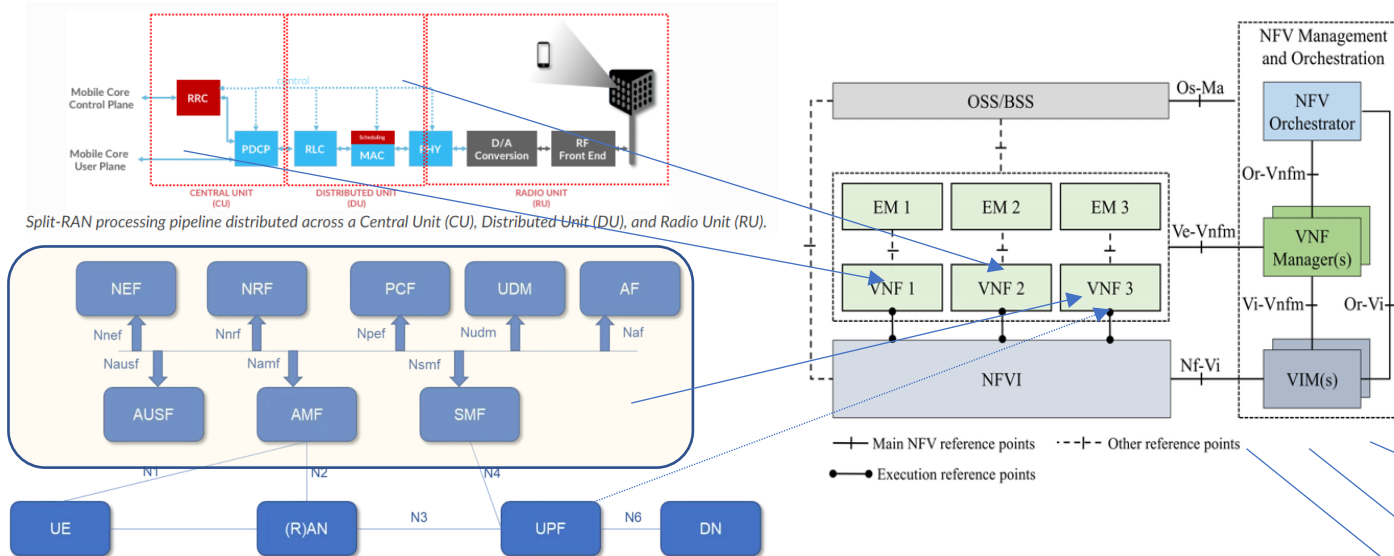


MANO (management & orchestration)

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

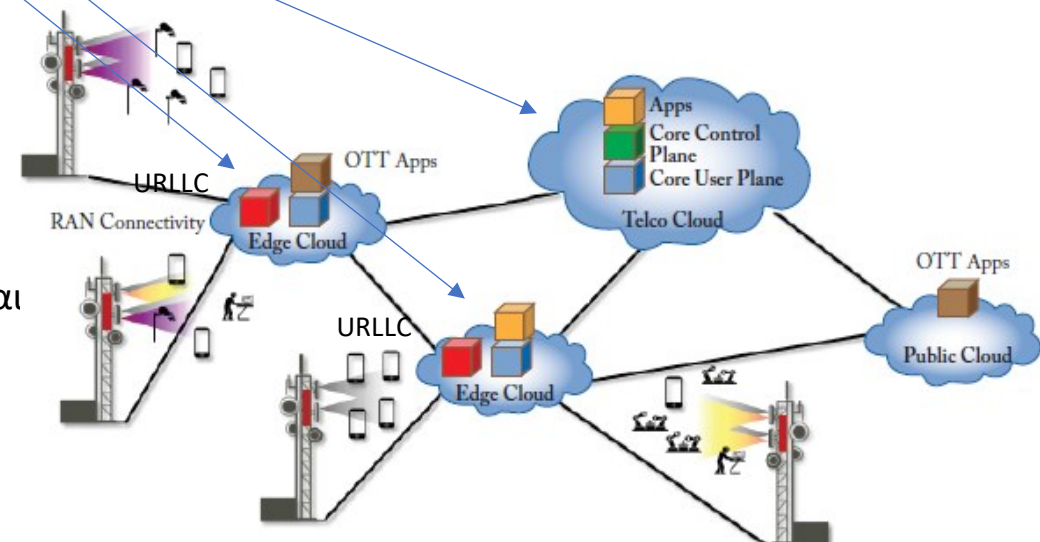
- **Virtualized Infrastructure Manager (VIM)**
Διαχειρίζεται τον κύκλο ζωής των εικονικών πόρων σε έναν NFVI: δημιουργεί, διατηρεί και καταστρέφει εικονικές μηχανές (VM) από φυσικούς πόρους σε ένα NFVI
- **VNF Manager (VNFM)**
Διαχειρίζεται τον κύκλο ζωής των VNF: δημιουργεί, διατηρεί και τερματίζει 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 DU και CU του RAN, οι λειτουργίες ελέγχου του 5G Core (5G Core Control Plane - CP), καθώς και (μερικώς) το User Plane του 5G Core (5G UPF) και οι εφαρμογές (App), εκτελούνται ως εικονικές δικτυακές συναρτήσεις (Virtual Network Functions - VNFs) πάνω σε Cloud υποδομές. Η διαχείριση και ενορχήστρωσή τους γίνεται μέσω MANO (NFV Management and Orchestration) ή Kubernetes

- Edge Cloud for 5G: MEC-Mobile (or Multi-access) Edge Computing
- Τα τμήματα μπορούν να εκτελούνται σε διαφορετικά σημεία Edge ή Core Cloud, αλλά πρέπει να έχουμε σωστή σειρά
 - Data plane: RU,DU, CU, 5G core UP (UPF), App
 - Control plane: το 5G core CP έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις καθυστέρησης και μπορούν να βρίσκονται πιο μακριά (στο core)
- Ειδικά για URLLC, είναι κρίσιμο όλο η αλυσίδα data plane (DU, CU, UPF, App) να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον τελικό χρήστη (UE)
- Δυνατές διαφορετικές 'αλυσίδες' και control plane → slice



Κινητά Δίκτυα

■ Εισαγωγή

- Ιδιαιτερότητες ασύρματων ζεύξεων
- Γενιές κυψελοειδών δικτύων

■ Ραδιοφάσμα

■ 4G LTE

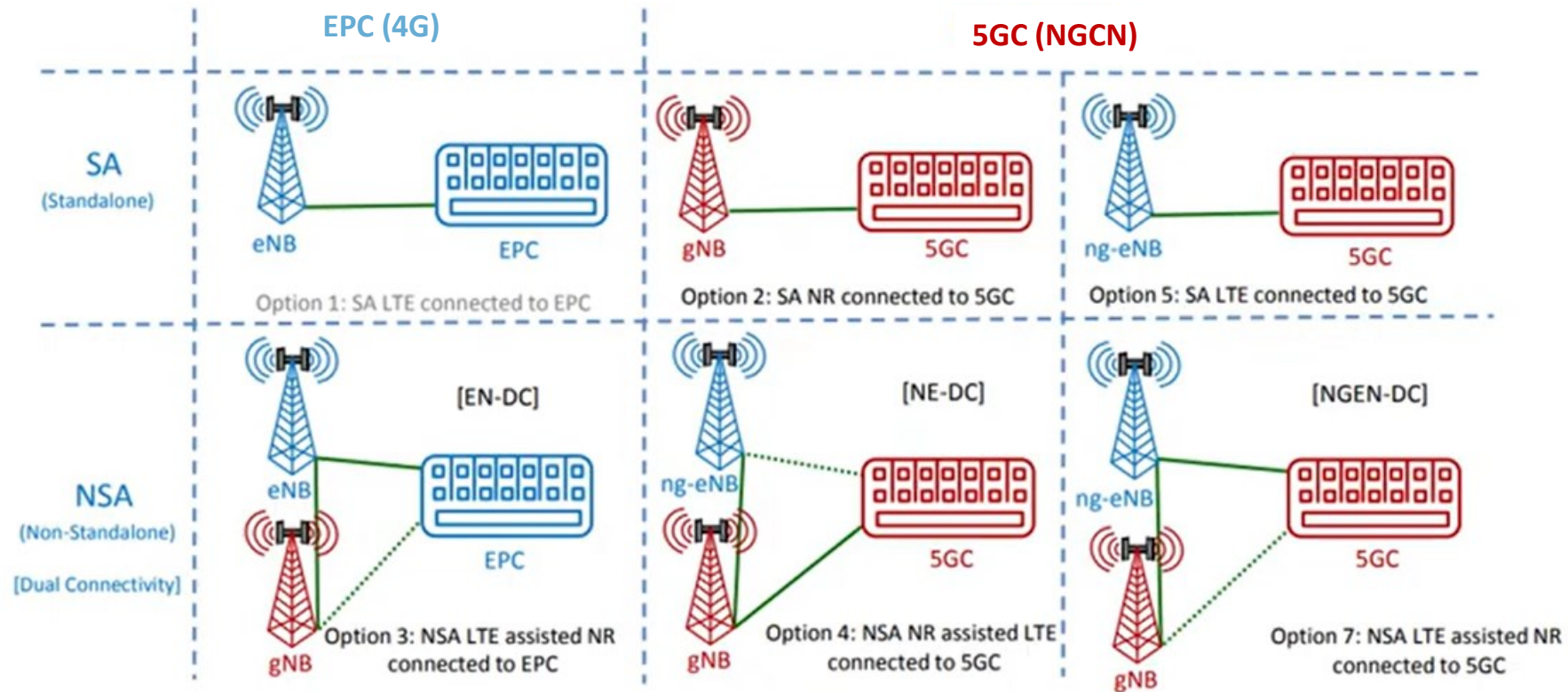
- Αρχιτεκτονική
- Radio Access Network (RAN)
- Evolved Packet Core (EPC)

■ 5G

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

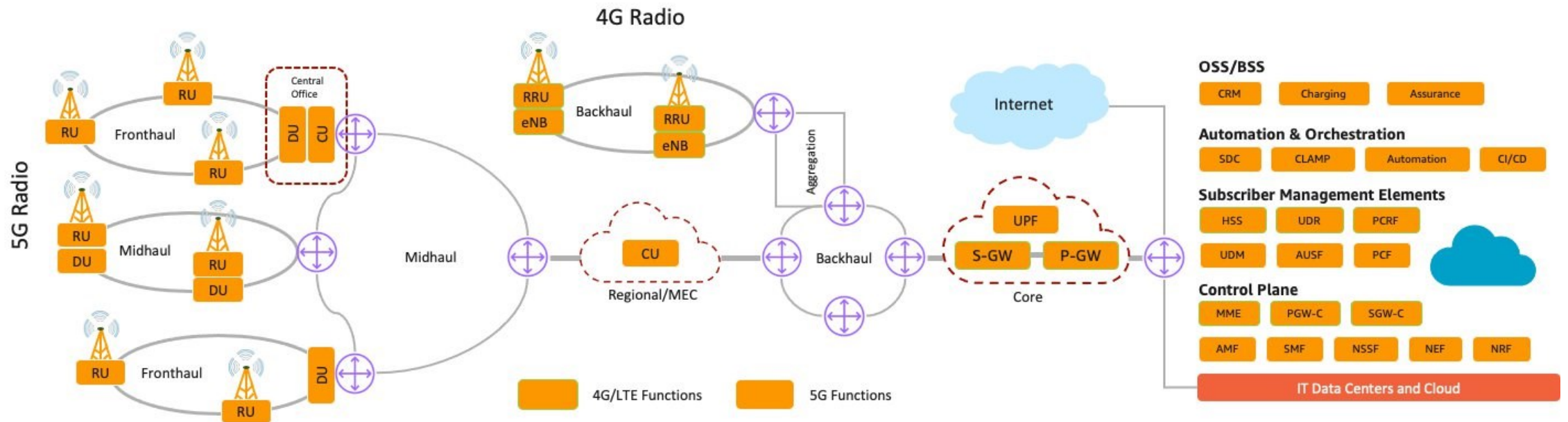


5G deployment options



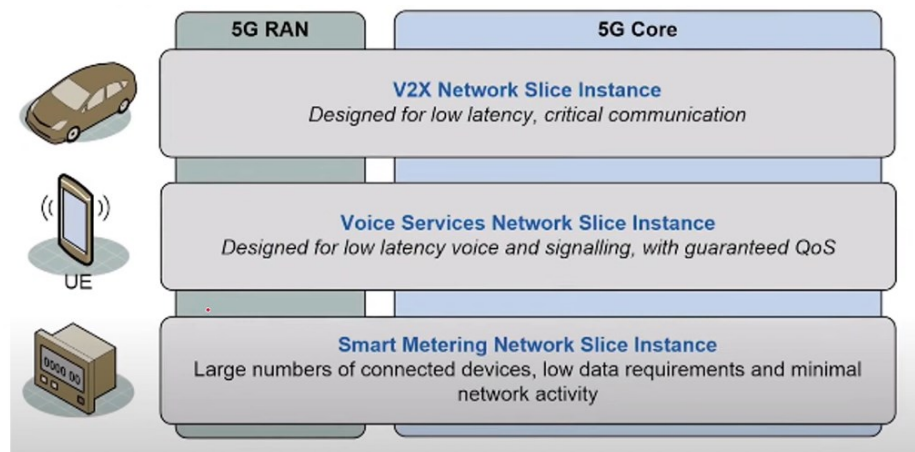
- Δυνατές επιλογές εγκατάστασης/συνύπαρξης 5G και 4G
- Ο κάθε πάροχος (ανάλογα με το προϋπάρχον δίκτυο 4G που έχει και τον ρυθμό εγκατάστασης 5G κεραιών και πυρήνα) επιλέγει μια από αυτές
 - μπορεί να κάνει διαφορετικές επιλογές σε διαφορετικές τοποθεσίες ή/και να αλλάξει επιλογή με την πάροδο του χρόνου

RAN and Core placement scenarios



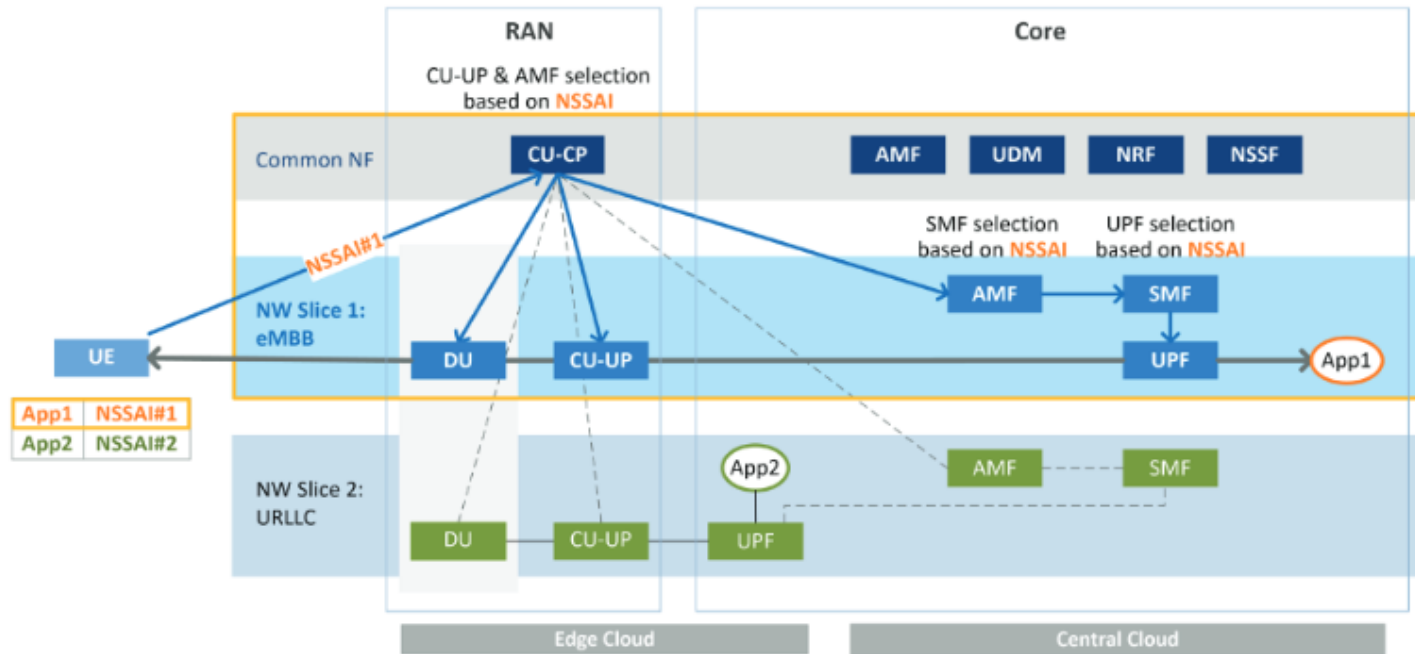
Τμηματοποίηση Δικτύου – Network Slicing

- 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

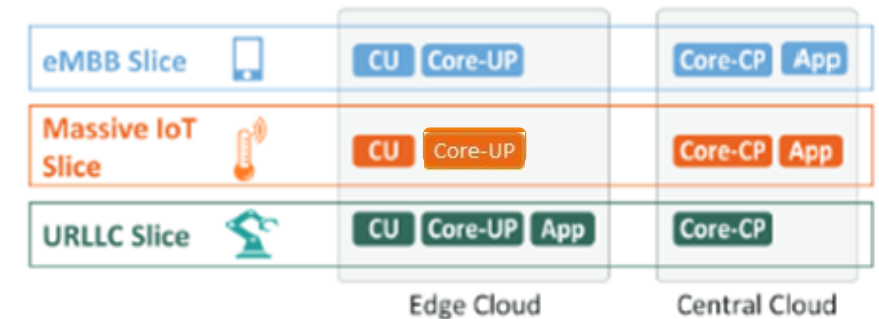
Slicing – under the hood



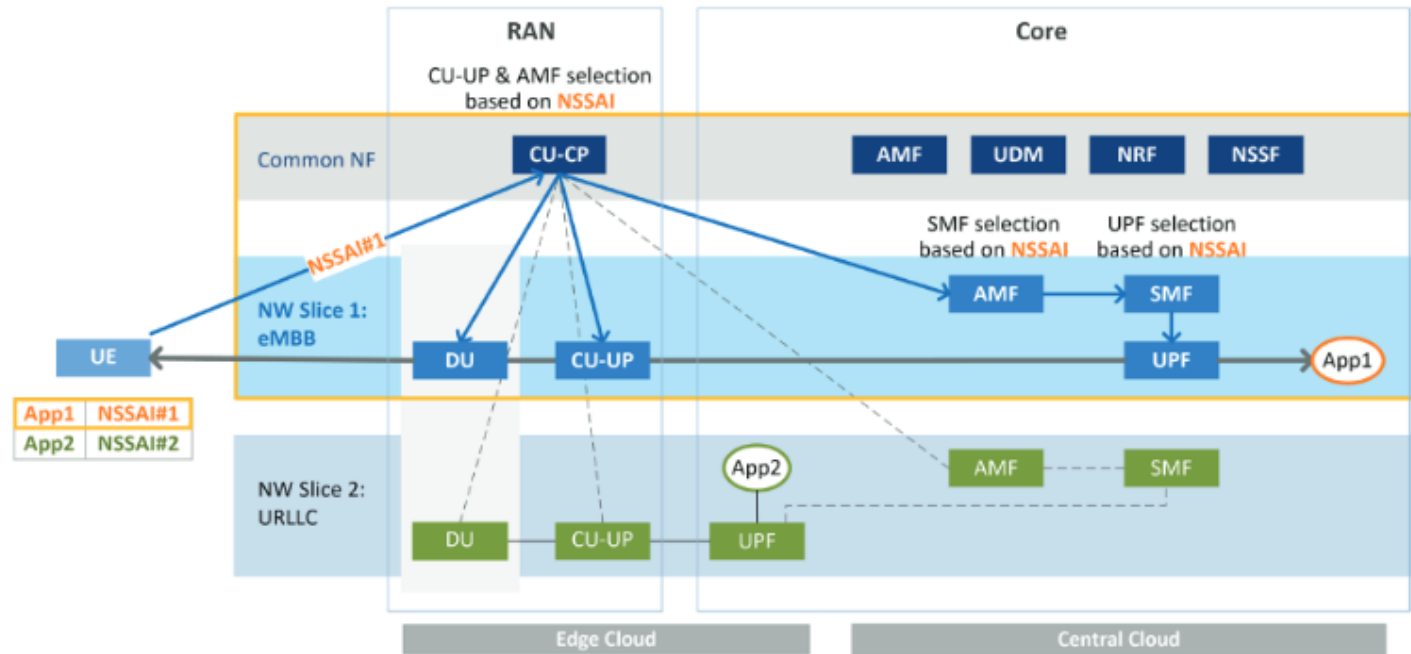
- Για URLLC slices είναι σημαντικό το UPF και app server να είναι σε μικρή απόσταση από τους χρήστες

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

- 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



Slicing – under the hood

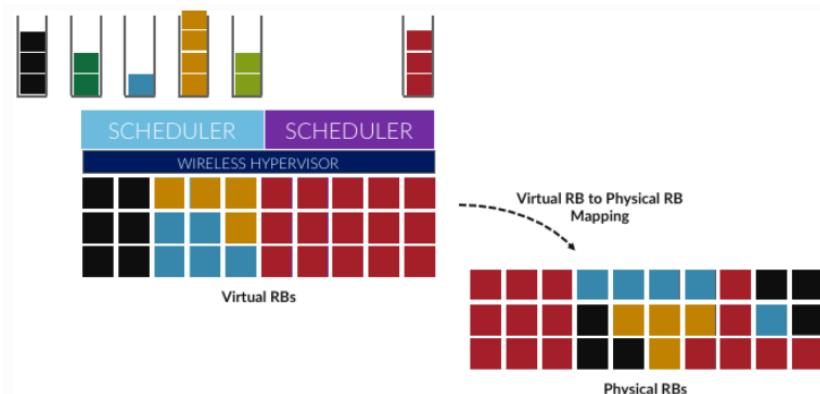


Υλοποίηση

- 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 στιγμιotypών τους και την τοποθέτηση τους στους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους

Slicing στο RAN

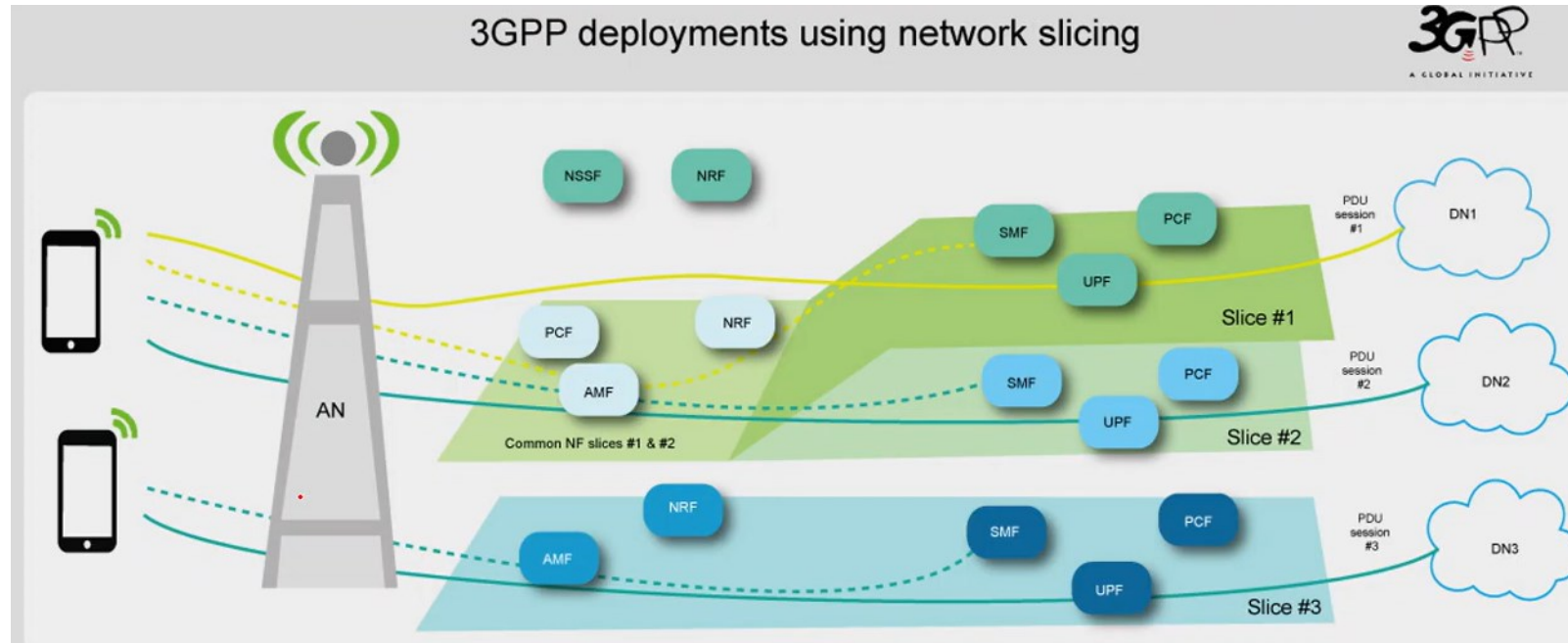
- Ο τεμαχισμός (slicing) μπορεί να γίνει με την πρόσθεση ενός επίπεδο εικονοποίησης μεταξύ του scheduler και των Resource Blocks (RBs) *
 - Το σύνολο των πραγματικών (φυσικών -physical) RB σπάει σε υπο-σύνολα εικονικών (virtual) RB, το καθένα ένα υποσύνολο δίνεται σε ένα slice
 - 2 επίπεδα ανάθεσης: 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 χρήση 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



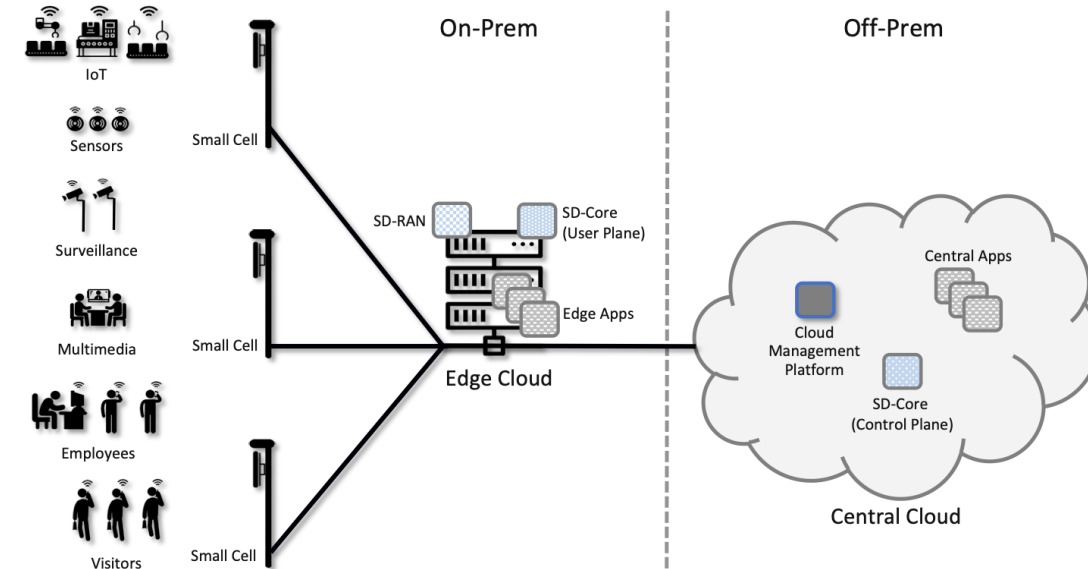
Για την υποστήριξη slicing πέρα από το RAN απαιτείται και slicing του Mobile Core

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

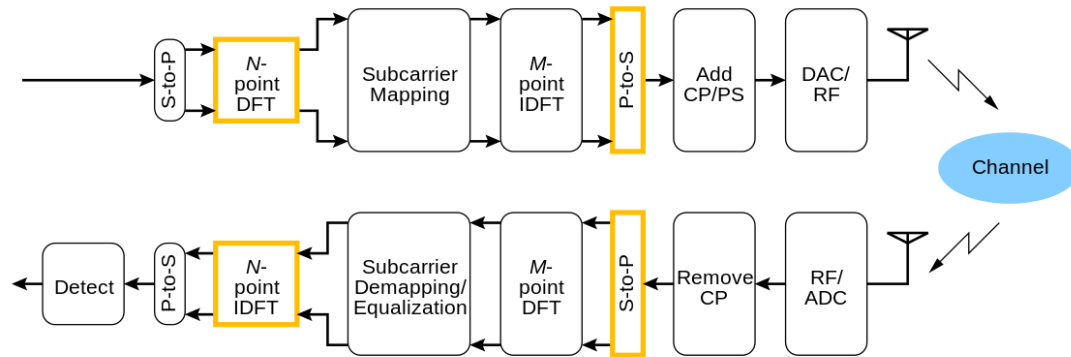
Ιδιωτικά 5G δίκτυα

- 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: ☐ + ☐

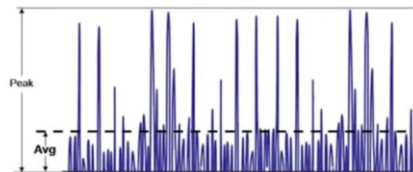
OFDMA: ☐

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**.

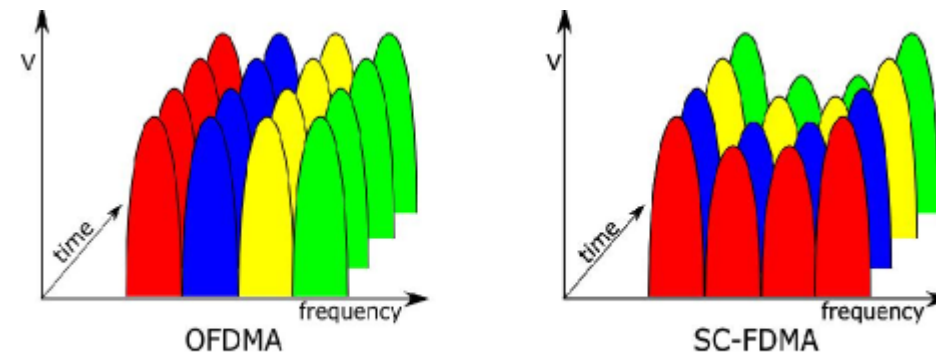
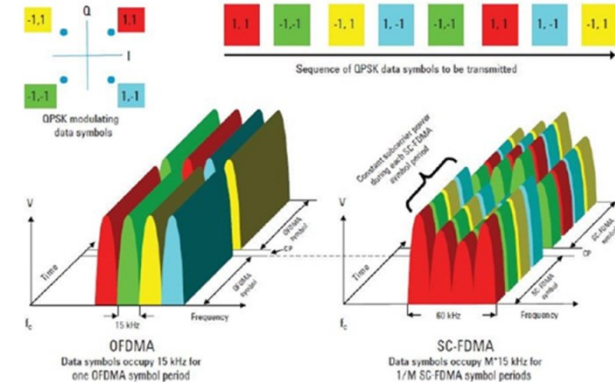
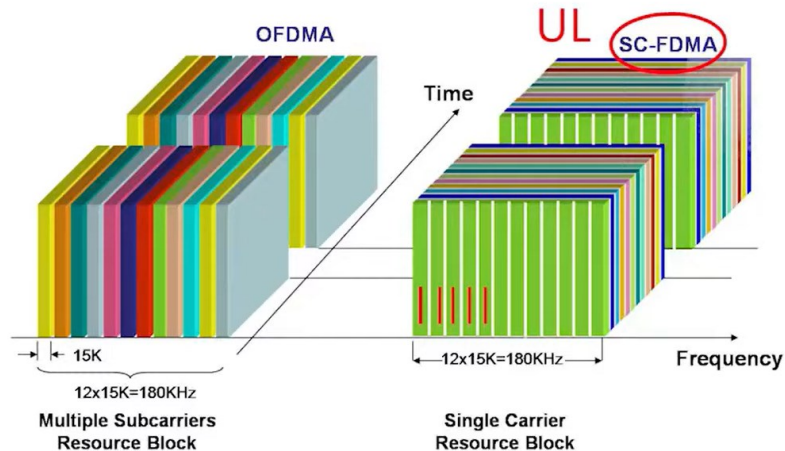


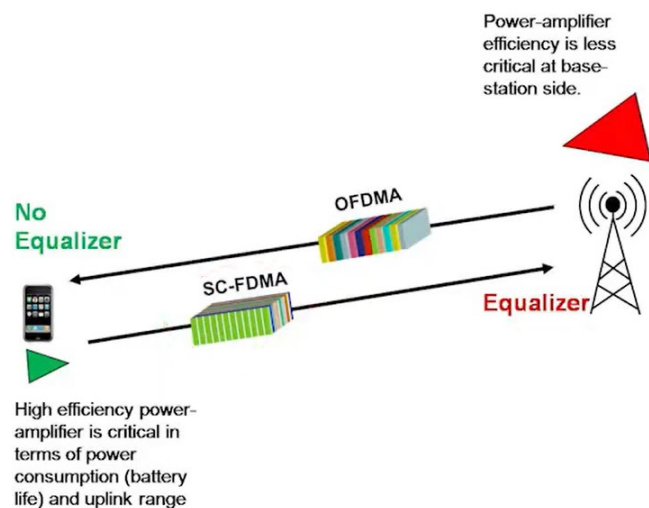
Fig.1. Comparison between OFDMA and SC-FDMA

SC-FDMA vs. OFDMA

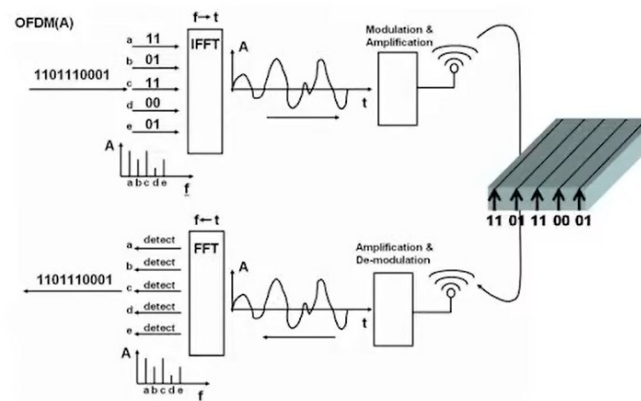


LTE Uplink & SC-FDMA

Downlink OFDMA and Uplink SC-FDMA

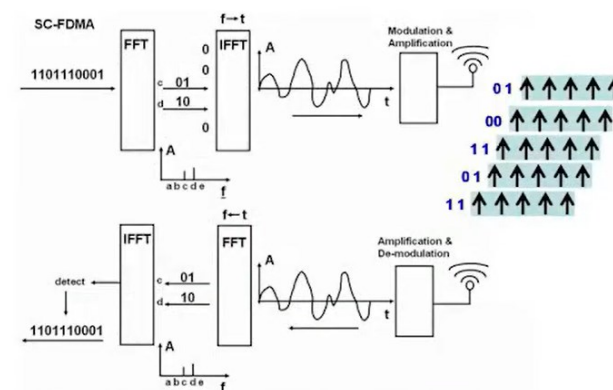


OFDM Generation



- 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.

Terminology for Open-eCPRI functional splits (O-RAN WG4)

7-3/7-2x Cat-C UL functional split not considered by 3GPP. Our understanding:
- chest in radio
- IRC in radio
- beam mngt in radio
Lowest possible throughput with IQ sample interface.
Uncertainty on PRACH details,, etc..

