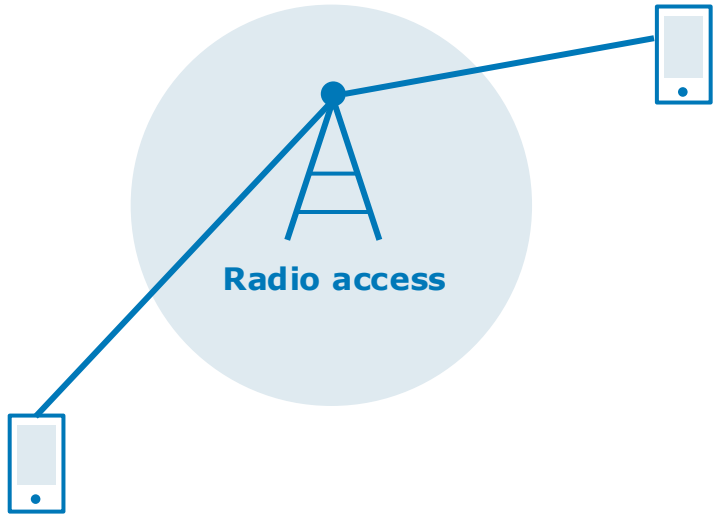
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Μ301: Παλιές και νέες προκλήσεις στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών

Διάλεξη #2 User & Control plane & Βασικές Αρχές Ασύρματων Επικοινωνιών και Δικτύων Ραδιοπρόσβασης (RAN)



Σωκράτης Μπαρμπουνάκης
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών ΕΚΠΑ
Χειμερινό εξάμηνο 2026-2027

Διάλεξη #1: τι κρατάμε

Η εξέλιξη των υπηρεσιών συναντά τους περιορισμούς του radio access

Εξέλιξη 1G-6G	Κάθε γενιά αυξάνει τις δυνατότητες του δικτύου και υποστηρίζει νέες υπηρεσίες. Η απαίτηση αφορά πλέον throughput, latency, αξιοπιστία και κατανάλωση ενέργειας.
Αρχιτεκτονική	Το UE επικοινωνεί με το RAN. Το transport συνδέει το RAN με το Core, το οποίο διαχειρίζεται πρόσβαση, mobility και sessions προς τα Data Networks.
Προκλήσεις	Coverage: πού υπάρχει πρόσβαση. Capacity: πόση κίνηση εξυπηρετούμε. QoS: με ποιες εγγυήσεις. Mobility: πώς συνεχίζεται η υπηρεσία όταν αλλάζει η θέση του UE.

> **Το διαθέσιμο spectrum και οι πόροι του RAN μοιράζονται ανάμεσα σε πολλούς χρήστες.**

Διάλεξη #2

Control & user plane	Δύο λογικές λειτουργίες πάνω στην ίδια υποδομή
Βασικές Αρχές Ασύρματων Επικοινωνιών και Δικτύων Ραδιοπρόσβασης (RAN)	Αν και το μάθημα εστιάζει στα υψηλότερα στρώματα, θα δοθούν οι βασικές αρχές που επιτρέπουν την κατανόηση των προκλήσεων (διαχρονικών και νέων)

Control Plane και User Plane

Δύο λογικές λειτουργίες πάνω στην ίδια υποδομή

CONTROL PLANE

1 **Registration** — 2 **Authentication** — 3 **Session setup**

Διατηρεί κατάσταση και ανταλλάσσει μηνύματα ελέγχου.

Παράδειγμα: το δίκτυο προετοιμάζει ένα handover.

USER PLANE

1 **IP packet** — 2 **Radio bearer** — 3 **Application**

Μεταφέρει video, voice, web ή telemetry.

Παράδειγμα: τα πακέτα μιας βιντεοκλήσης συνεχίζουν από τη νέα cell.

Το signalling οργανώνει τη σύνδεση. Τα user packets μεταφέρουν το περιεχόμενο της υπηρεσίας.

Control plane: πρόσβαση και κατάσταση σύνδεσης

Signalling για registration, authentication, sessions και mobility

1 Cell selection

2 Registration

3 Authentication

4 PDU session

5 Mobility

UE και gNB

RRC μηνύματα για σύνδεση, measurements και handover. Το UE επιλέγει αρχικά cell και αναφέρει την ποιότητα γειτονικών cells.

UE και Core

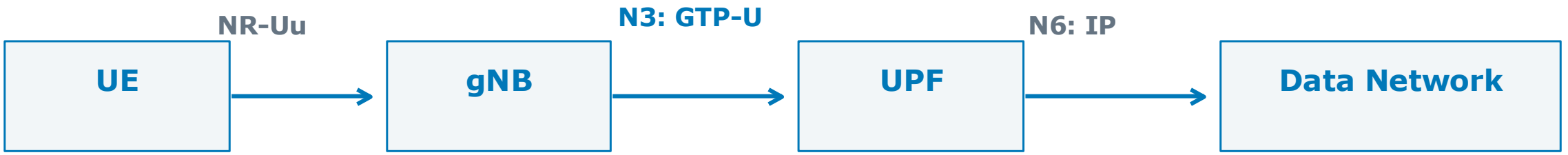
NAS signalling για πρόσβαση και sessions. Το AMF διαχειρίζεται access/mobility και το SMF το session.

Κατάσταση

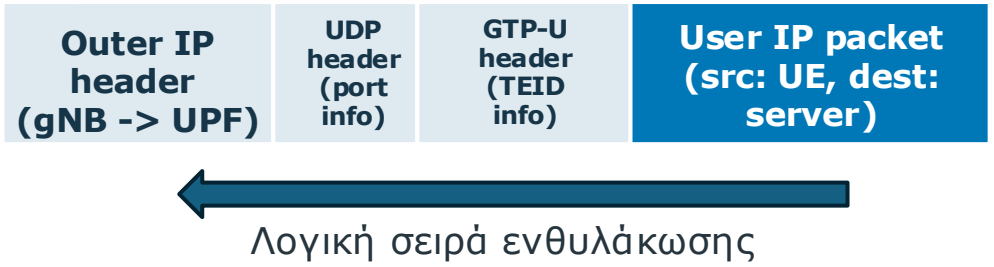
Το δίκτυο γνωρίζει ποια σύνδεση είναι ενεργή, ποιες πολιτικές ισχύουν και πού θα προωθήσει την κίνηση.

User plane: η διαδρομή ενός IP πακέτου

Ένα PDU (protocol data unit) session συνδέει το UE με το Data Network μέσω του UPF



Το radio bearer καλύπτει το τμήμα UE-gNB.
Το tunnel καλύπτει το N3 και ο UPF προωθεί τα πακέτα στο εξωτερικό IP δίκτυο.

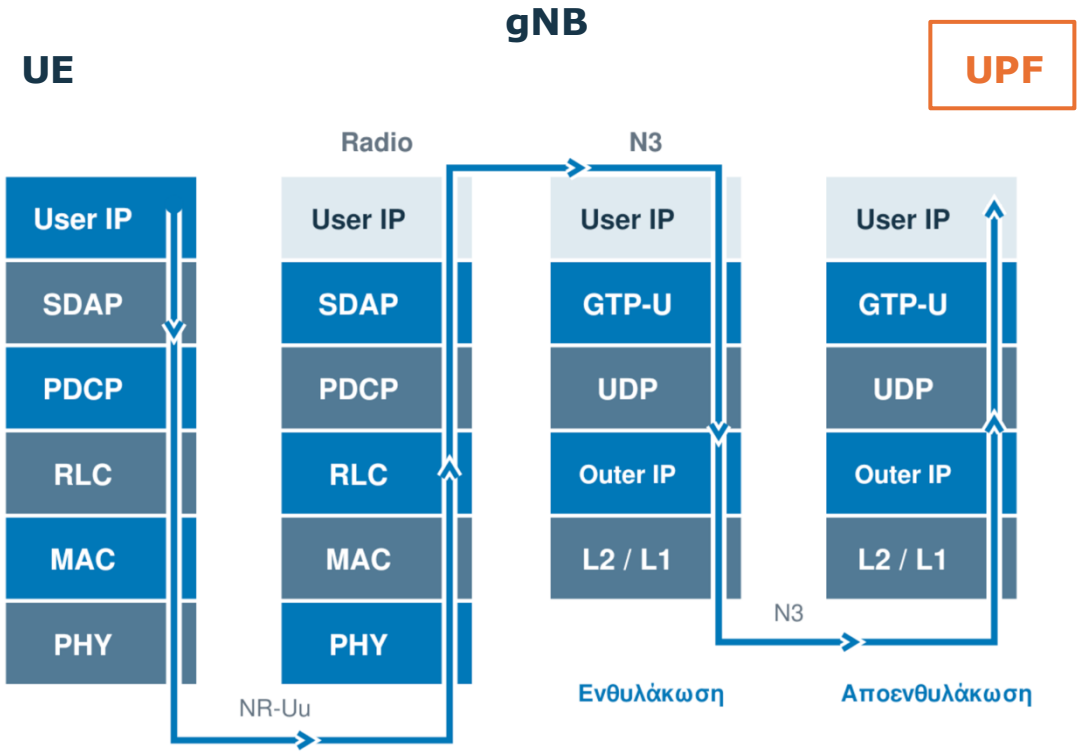


Το GTP-U μεταφέρει το αρχικό user IP packet μέσα σε ένα tunnel μεταξύ gNB και UPF.

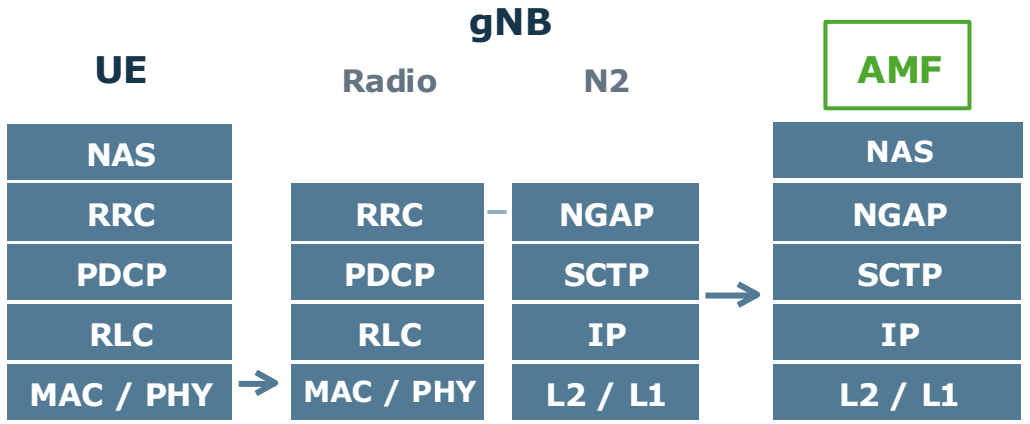
Κάθετη όψη: οι βασικές στοίβες πρωτοκόλλων 5G

Το gNB γεφυρώνει radio protocols και transport protocols προς το Core

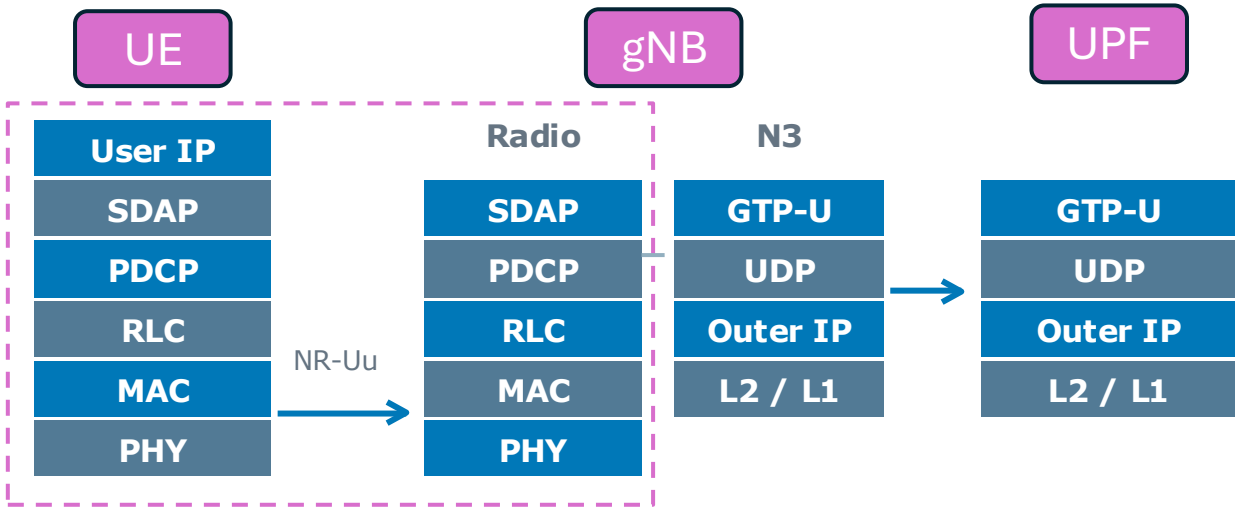
USER PLANE



CONTROL PLANE

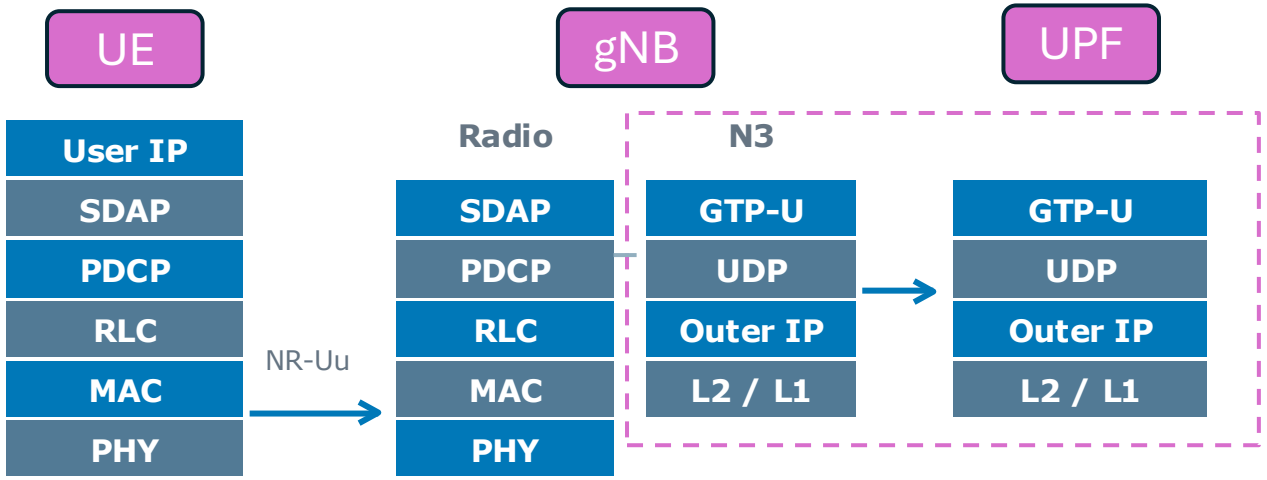


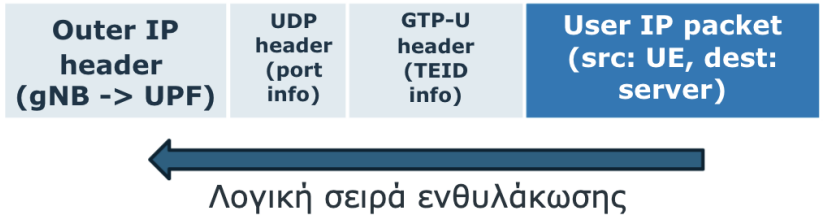
User plane - Radio stack: μεταφορά μεταξύ UE και gNB



- **SDAP** - Service Data Adaptation Protocol: αντιστοιχίζει τα **QoS flows στους κατάλληλους Data Radio Bearers**, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κίνησης.
- **PDCP** - Packet Data Convergence Protocol: υποστηρίζει **κρυπτογράφηση**, **συμπίεση** headers και επαναφορά της σειράς των πακέτων στον δέκτη.
- **RLC** - Radio Link Control: **τεμαχίζει** τα δεδομένα ώστε να χωρούν στις διαθέσιμες μεταδόσεις και τα επανασυναρμολογεί. Στο Acknowledged Mode (AM) υποστηρίζει **επαναμεταδόσεις**.
- **MAC** - Medium Access Control: οργανώνει τα δεδομένα σε transport blocks και διαχειρίζεται την πρόσβαση στους radio resources μέσω **scheduling** και γρήγορων **επαναμεταδόσεων** HARQ.
- **PHY** - Physical Layer: εφαρμόζει channel **coding** και **modulation** για τη μετάδοση των δεδομένων ως ασύρματο σήμα.

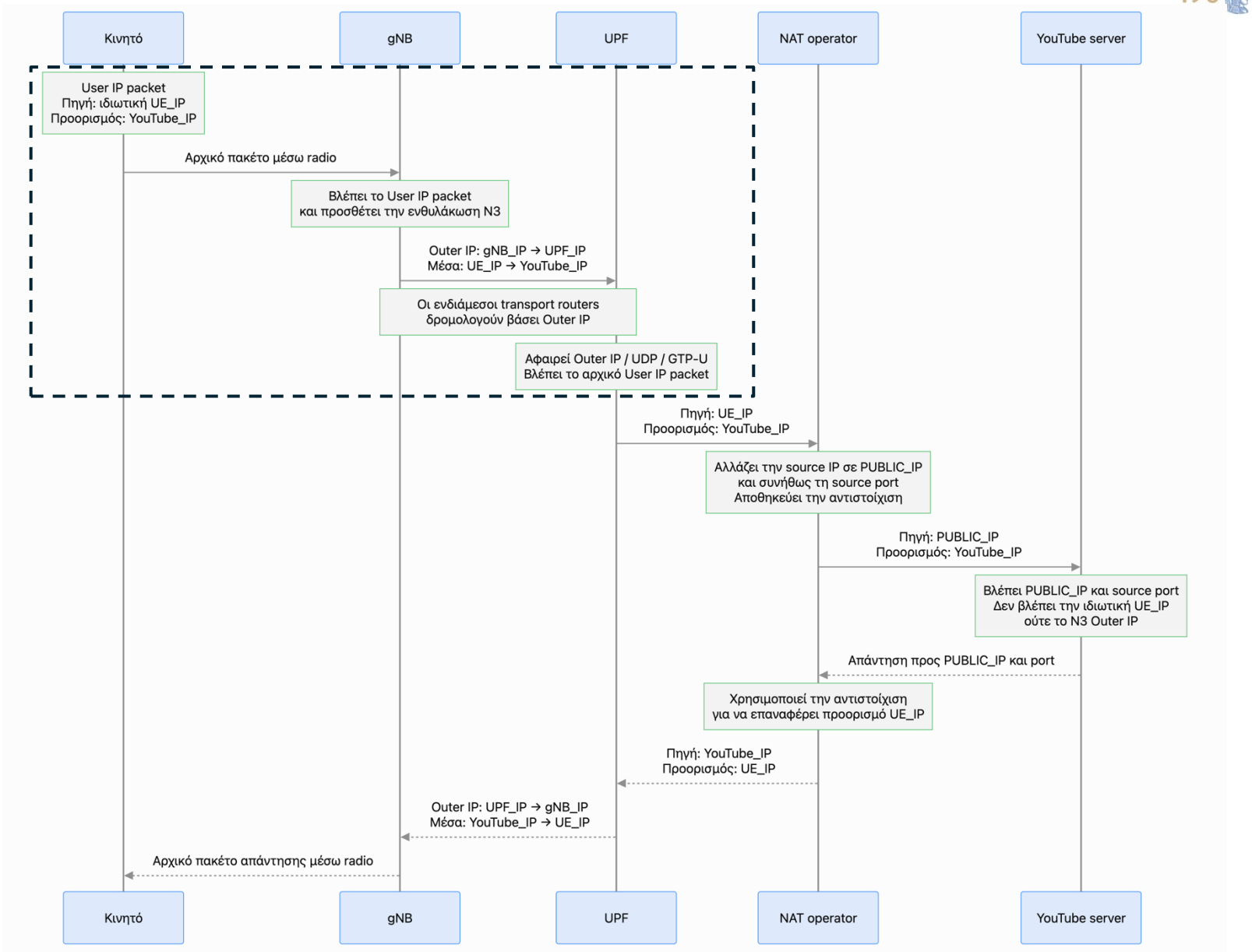
User plane - Δεύτερο stack του gNB: μεταφορά προς το UPF





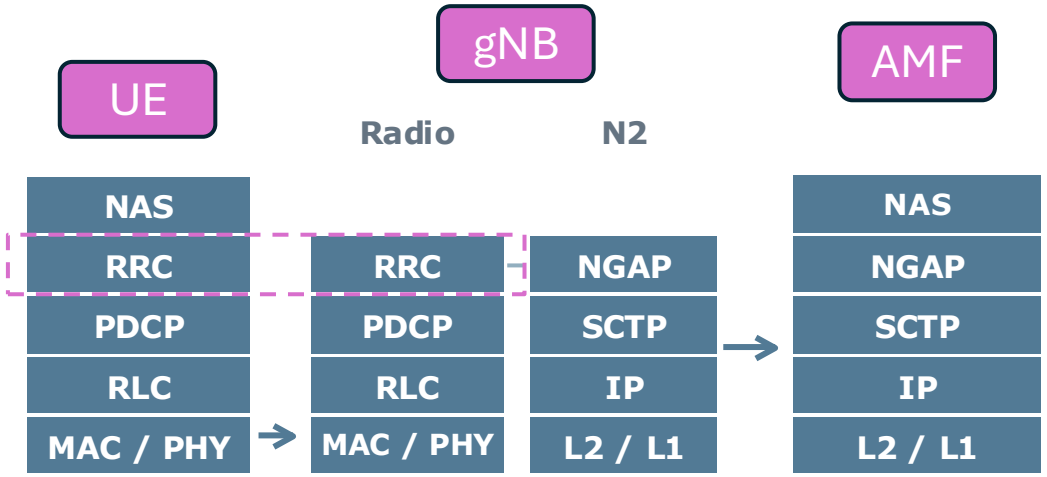
- Το gNB ανακτά το αρχικό user IP packet από το radio stack και το ενθυλακώνει σε GTP-U / UDP / Outer IP.
- Το Outer IP είναι η εξωτερική IP επικεφαλίδα που προσθέτει το gNB για να μεταφέρει το πακέτο μέσα στο δίκτυο του operator, προς τον UPF.
- Το GTP-U αναγνωρίζει το tunnel, ενώ το Outer IP επιτρέπει τη δρομολόγηση μεταξύ gNB και UPF μέσω του transport δικτύου.

User plane MSC



Control plane - Radio stack: σηματοδοσία μεταξύ UE και gNB

1837-2027 190 ΧΡΟΝΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών

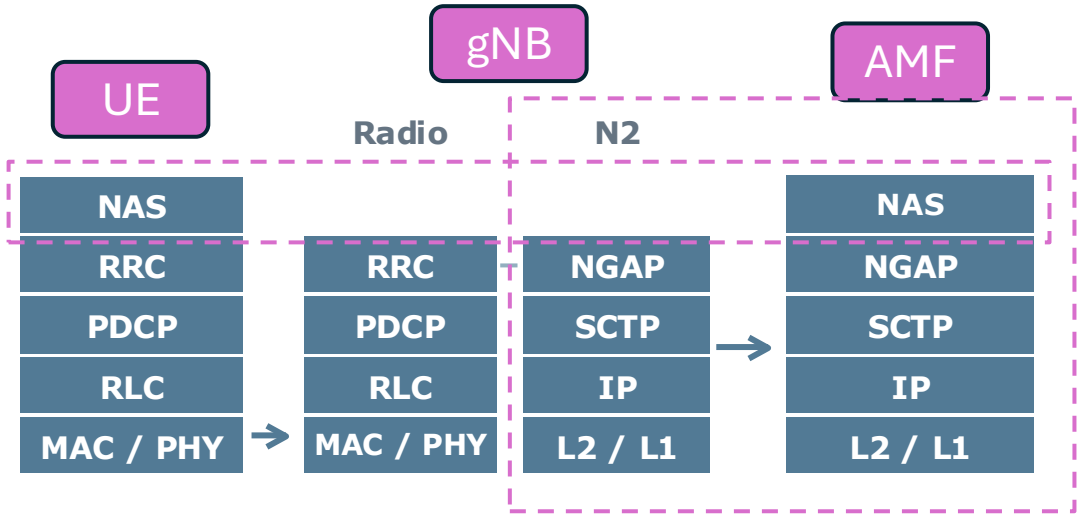


- **RRC - Radio Resource Control:** εγκαθιστά και διαχειρίζεται την ασύρματη σύνδεση, ρυθμίζει τους **radio bearers** και τις **μετρήσεις** του UE και υποστηρίζει διαδικασίες **handover**.
  - **Τερματίζει στο gNB.**

- **PDCP - Packet Data Convergence Protocol:** προστατεύει τα μηνύματα σηματοδοσίας με **κρυπτογράφηση** και **έλεγχο ακεραιότητας** και υποστηρίζει τη **σωστή σειρά** παράδοσής τους.

- **RLC / MAC / PHY:** αναλαμβάνουν τον τεμαχισμό και την επανασυναρμολόγηση, την πρόσβαση στους radio resources και την ασύρματη μετάδοση της σηματοδοσίας.

Control plane - N2 stack: σηματοδοσία μεταξύ gNB και AMF



- **NGAP – NG Application Protocol (gNB <->AMF):** μεταφέρει μηνύματα για τη διαχείριση του UE, την εγκατάσταση πόρων και την κινητικότητα. Μεταφέρει επίσης NAS μηνύματα μεταξύ gNB και AMF.

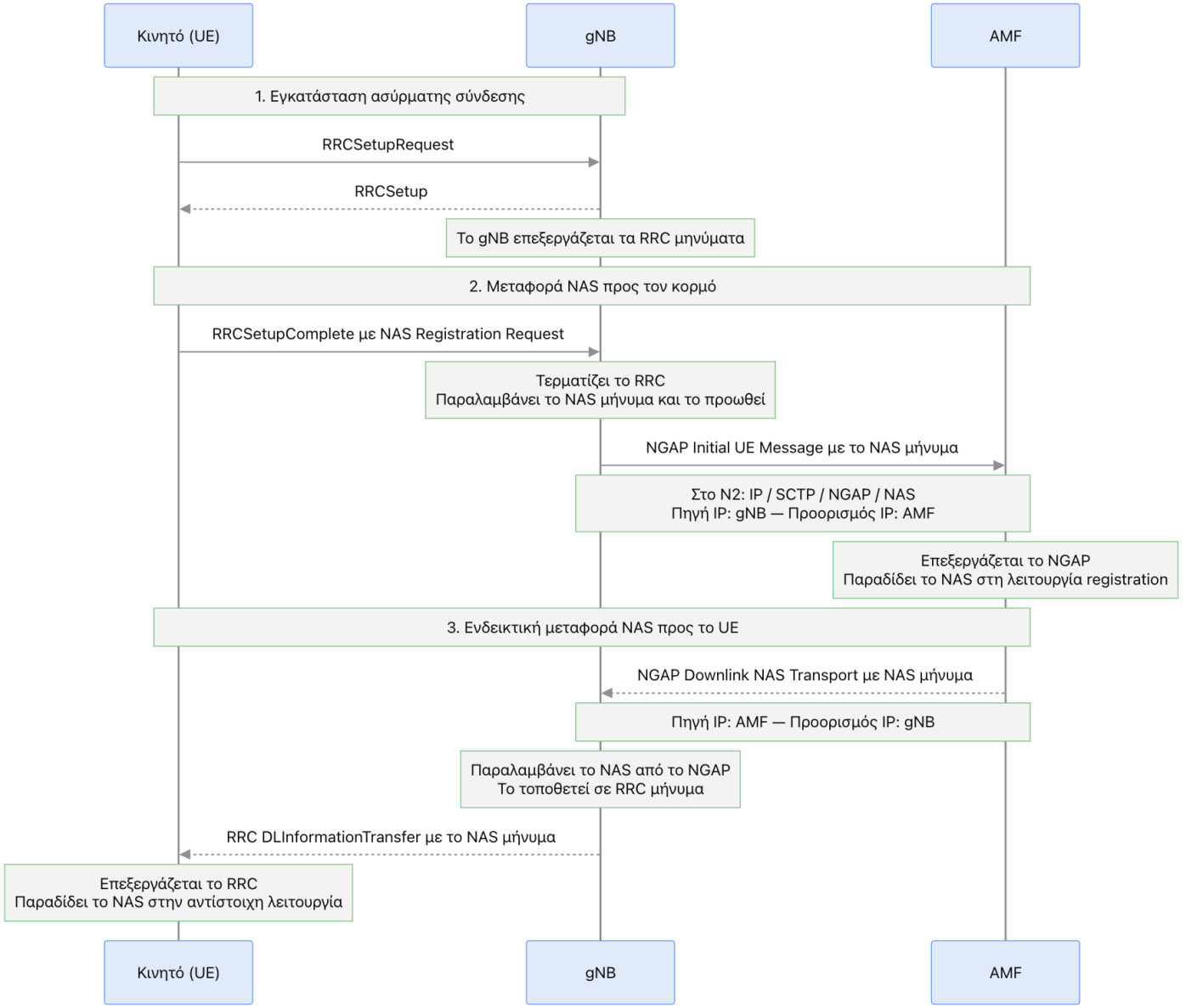
- **SCTP – Stream Control Transmission Protocol:** παρέχει αξιόπιστη μεταφορά των NGAP μηνυμάτων, με αναγνώριση απωλειών και επαναμεταδόσεις.

- **IP / L2 / L1:** αναλαμβάνουν τη δρομολόγηση και τη μεταφορά της σηματοδοσίας στο transport network.

NAS - Non-Access Stratum (UE<->AMF): σηματοδοσία μεταξύ UE και AMF για registration, διαχείριση πρόσβασης, ασφάλεια και κινητικότητα. Το gNB προωθεί τα NAS μηνύματα, ενώ το AMF τα επεξεργάζεται.

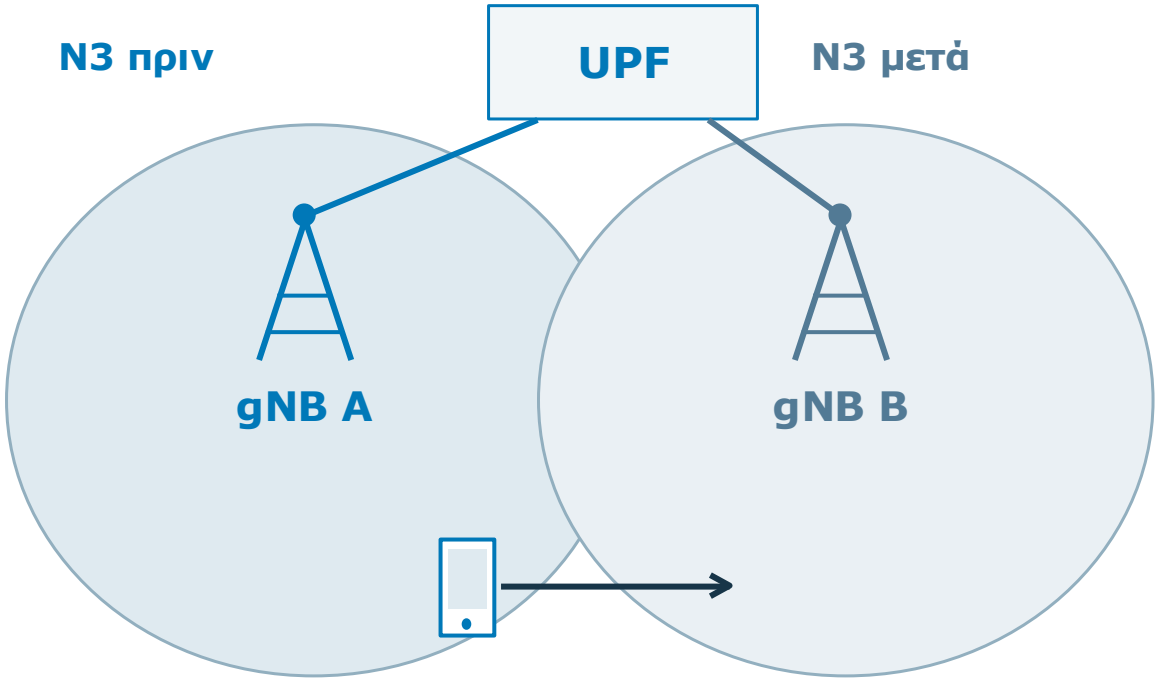
NAS τερματίζει στο AMF.

Control plane MSC



Mobility και handover

Η αλλαγή serving cell μπορεί να αλλάξει και το N3 tunnel



Απλοποιημένο handover με κοινό UPF. Η ακριβής διαδικασία εξαρτάται από το σενάριο.

Μετρήσεις

Το UE μετρά serving και neighbour cells και στέλνει measurement reports στο δίκτυο.

Απόφαση

Σε RRC_CONNECTED το δίκτυο αποφασίζει το handover με thresholds και χρονικά κριτήρια για να αποφεύγει περιττές εναλλαγές.

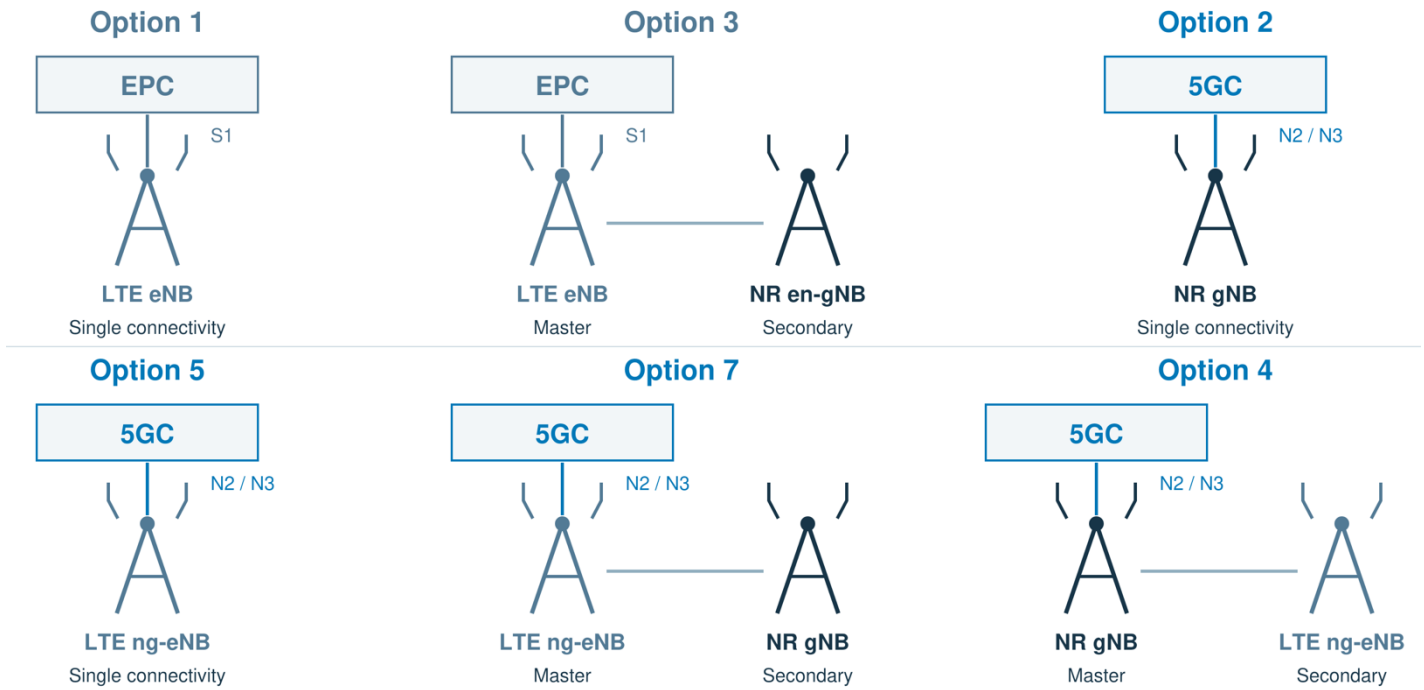
Path switch

Το UE συνδέεται στο gNB B και το δίκτυο ενημερώνει τη διαδρομή user plane. Το UPF προωθεί πλέον τα δεδομένα προς το νέο gNB μέσω του αντίστοιχου N3 tunnel.

Παράδειγμα με σταθερό UPF: πριν UE-gNB A-UPF, μετά UE-gNB B-UPF.

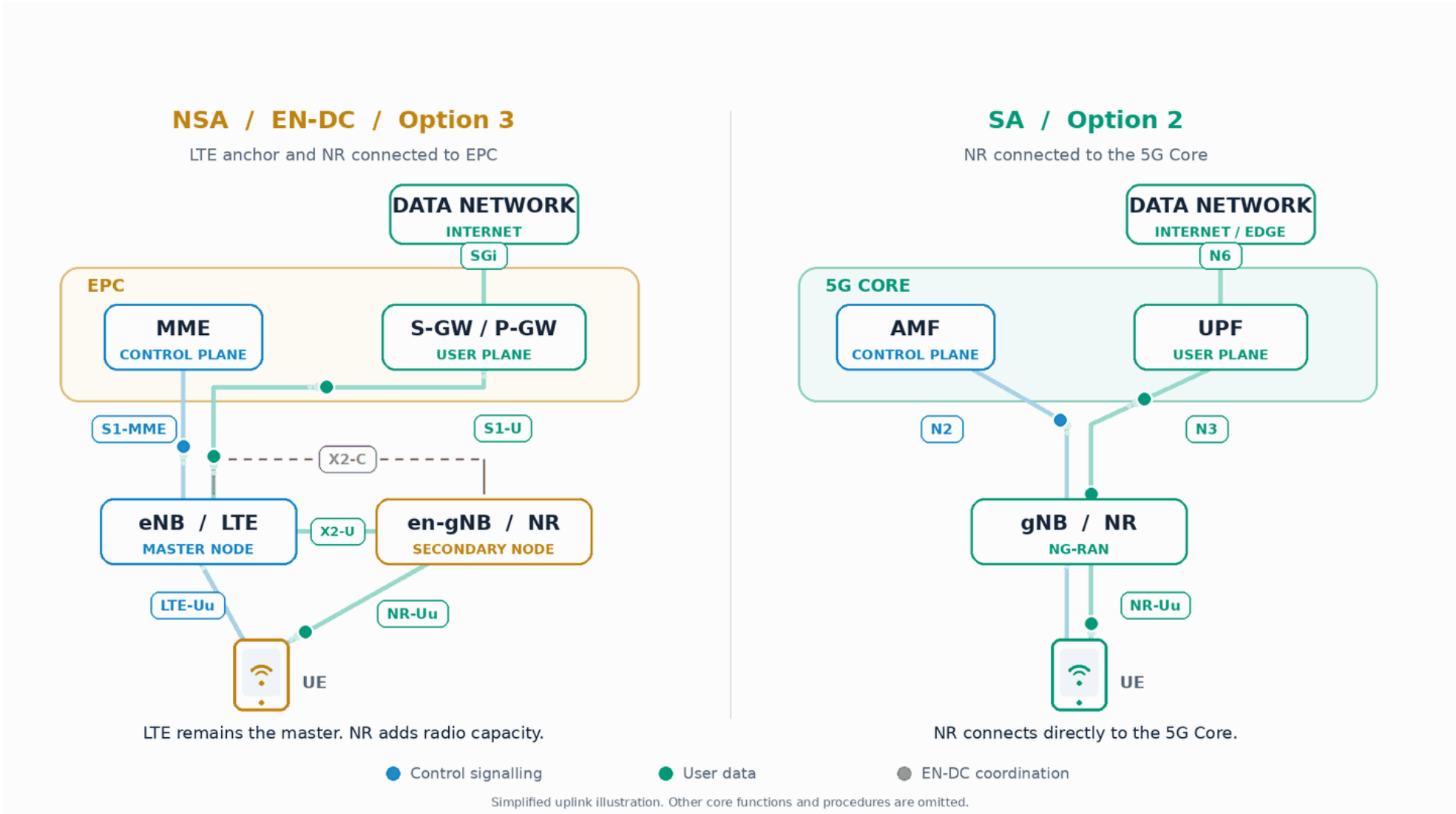
4G/5G Deployment options

Option	Radio access	Core	Master node	Περιγραφή
1	LTE	EPC	LTE eNB	Κλασικό 4G: UE–eNB–EPC
2	NR	5GC	NR gNB	5G NR Standalone: UE–gNB–5GC
3 / 3a / 3x*	LTE + NR	EPC	LTE eNB	NSA / EN-DC: LTE ως control anchor, NR για πρόσθετη radio capacity
4 / 4a	NR + LTE	5GC	NR gNB	NSA / NE-DC: NR ως master, LTE ως secondary
5	LTE	5GC	LTE ng-eNB	LTE Standalone πρόσβαση με 5G Core
7 / 7a / 7x*	LTE + NR	5GC	LTE ng-eNB	NSA / NGEN-DC: LTE ως master, NR ως secondary



*Παραλλαγή	Διαδρομή user plane
3a	Το EPC συνδέεται απευθείας και με LTE και με NR.
3x	Το EPC συνδέεται με το NR, το οποίο μπορεί να διαμοιράζει δεδομένα και προς το LTE.
7a	Το 5GC συνδέεται απευθείας και με LTE και με NR.
7x	Το 5GC συνδέεται με το NR, το οποίο μπορεί να διαμοιράζει δεδομένα και προς το LTE.

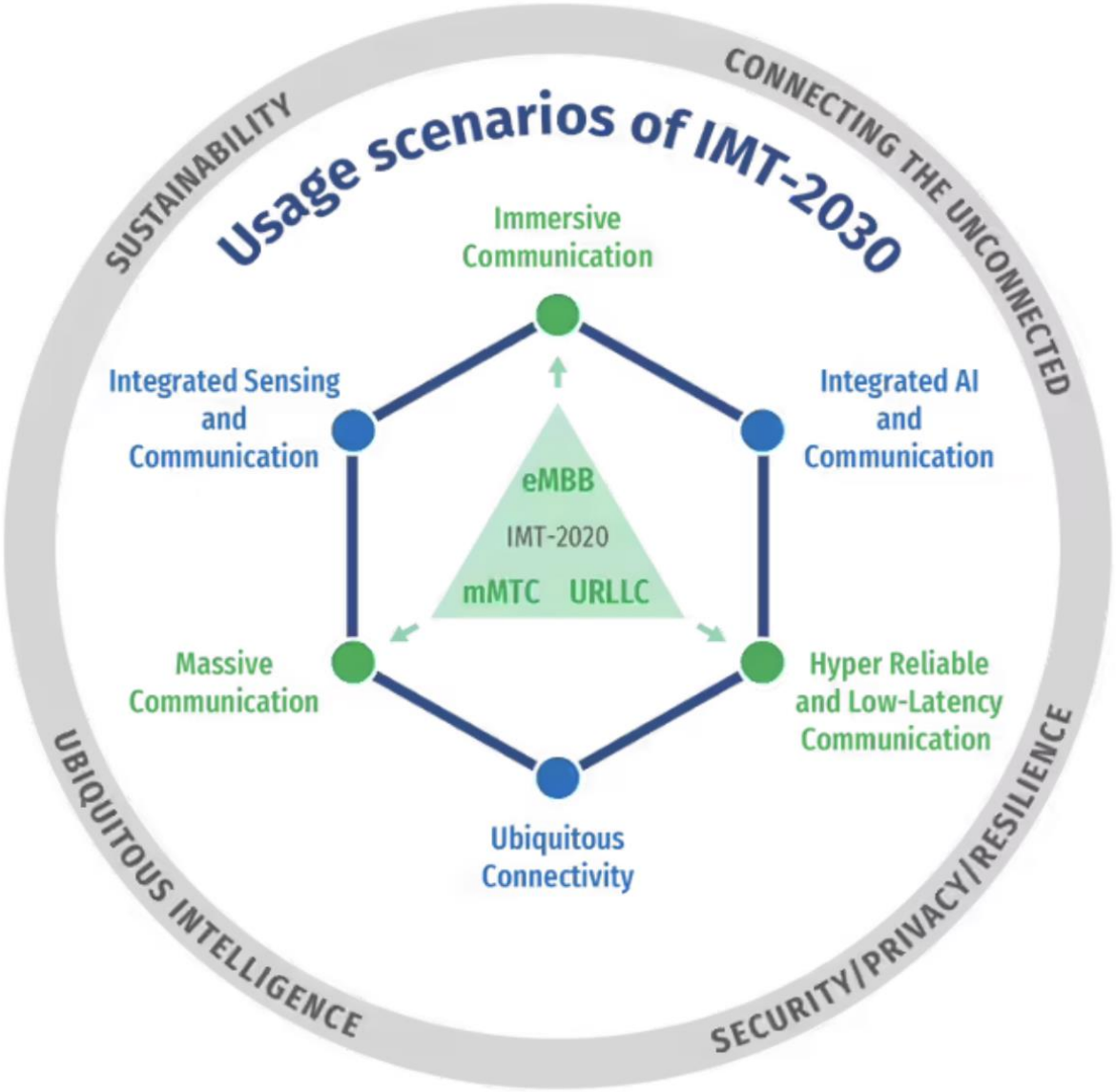
5G NSA (Option 3) και 5G SA (option 2): οι 2 βασικές περιπτώσεις για το 5G



Το οικοσύστημα του mobile network

Φορέας	Ρόλος	Outputs
ITU - International Telecommunication Union	ITU-R καθορίζει το πλαίσιο IMT – International Mobile Telecommunications, όπως το IMT-2020 για το 5G, IMT-2030 για 6G	Στόχοι και απαιτήσεις για γενιές κινητών
3GPP - 3rd Generation Partnership Project	Radio, Core και protocol specifications	NR, 5GS, interfaces και διαδικασίες
Vendors	Υλοποίηση εξοπλισμού και λογισμικού	gNB, Core functions, management platforms
Operators	Deployment και λειτουργία δικτύου	Coverage planning, capacity, QoS policies
Service providers	Εφαρμογές και υπηρεσίες	Video, enterprise connectivity, IoT

IMT-2030


Usage scenarios of IMT-2030
SUSTAINABILITY
CONNECTING THE UNCONNECTED
UBIQUITOUS INTELLIGENCE
SECURITY/PRIVACY/RESILIENCE
Immersive Communication
Integrated Sensing and Communication
Integrated AI and Communication
eMBB
IMT-2020
mMTC URLLC
Massive Communication
Hyper Reliable and Low-Latency Communication
Ubiquitous Connectivity

Wireless & RAN Fundamentals

01 **Cells και sectors**

Πού υπάρχει κάλυψη και πώς χωρίζεται γεωγραφικά η πρόσβαση.

02 **Propagation και spectrum**

Πώς band, απόσταση, εμπόδια και multipath μεταβάλλουν το λαμβανόμενο σήμα.

03 **Interference και link quality**

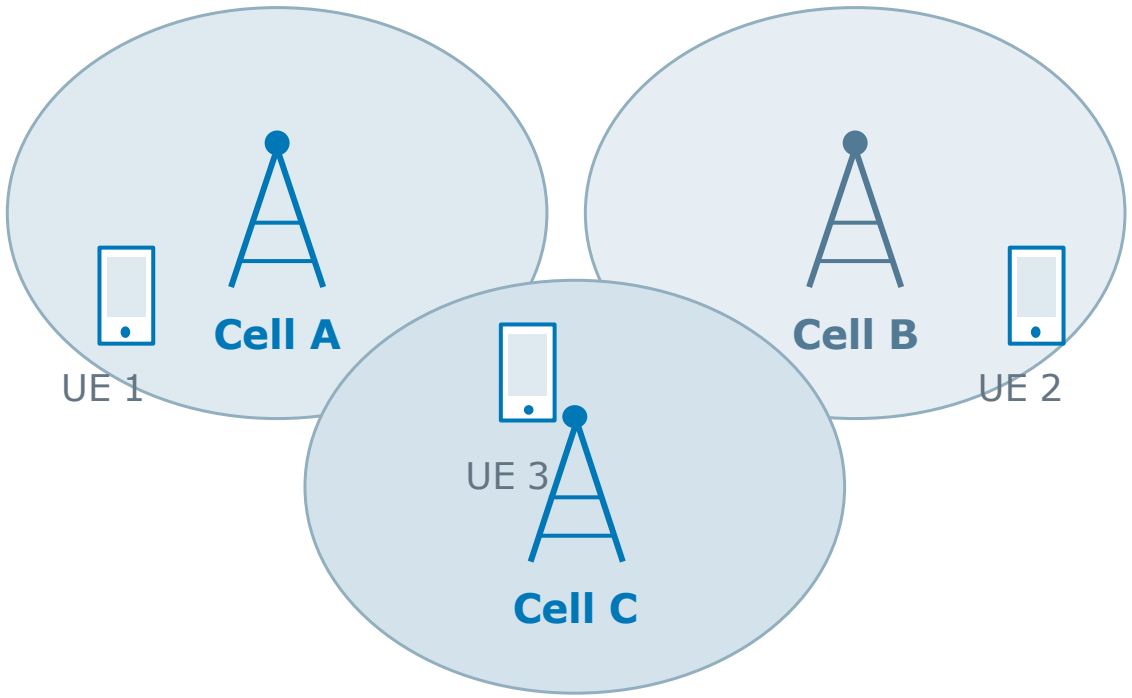
Πώς RSRP, RSRQ και SINR περιγράφουν διαφορετικές πλευρές της radio σύνδεσης.

04 **Κατανομή πόρων**

Πώς PRBs, scheduling, MCS και spatial processing μοιράζουν τους διαθέσιμους πόρους.

Cells: το βασικό δομικό στοιχείο του RAN

Μια cell παρέχει radio resources σε UEs μιας περιοχής



Σχηματικές περιοχές κάλυψης. Ένα UE μπορεί επίσης να χρησιμοποιεί carrier aggregation ή dual connectivity.

Serving cell

Το cell που εξυπηρετεί το UE για συγκεκριμένη σύνδεση. Ο **scheduler** κατανέμει radio resources.

Neighbour cells

Οι γειτονικές cells παρέχουν υποψήφιες επιλογές για mobility και μπορούν να δημιουργούν interference.

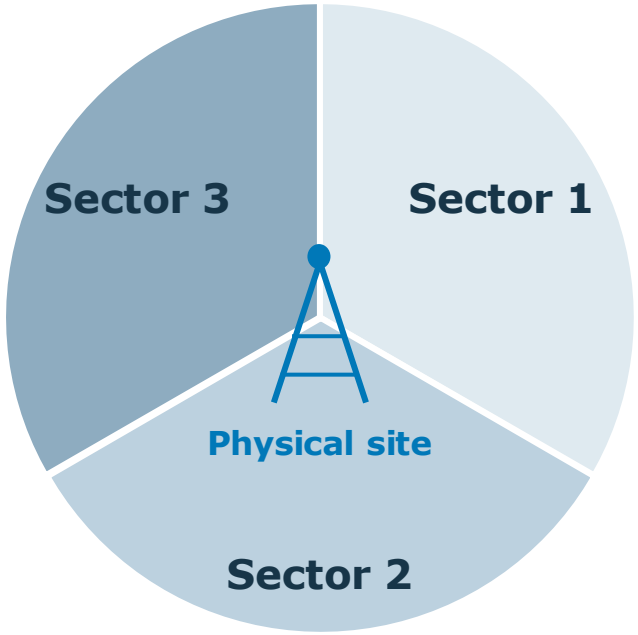
Coverage overlap

Στην περιοχή επικάλυψης το UE λαμβάνει περισσότερα από ένα σήματα. Η ισχυρότερη cell μπορεί να αλλάζει με τη θέση.

Τα πραγματικά όρια κάλυψης εξαρτώνται από propagation, ισχύ, κεραίες και περιβάλλον.

Sectors: κατευθύνσεις κάλυψης ενός site

Directional antennas δημιουργούν cells με διαφορετικό προσανατολισμό



Γεωμετρική απεικόνιση sectors, όχι πραγματικό radiation pattern.

Τρεις sectors

Ένα συνηθισμένο macro site χρησιμοποιεί τρεις κεραίες με διαφορετικό azimuth, συχνά 120°.

Ξεχωριστό load

Κάθε sector μπορεί να έχει διαφορετικούς χρήστες, διαθέσιμους πόρους και παρεμβολές.

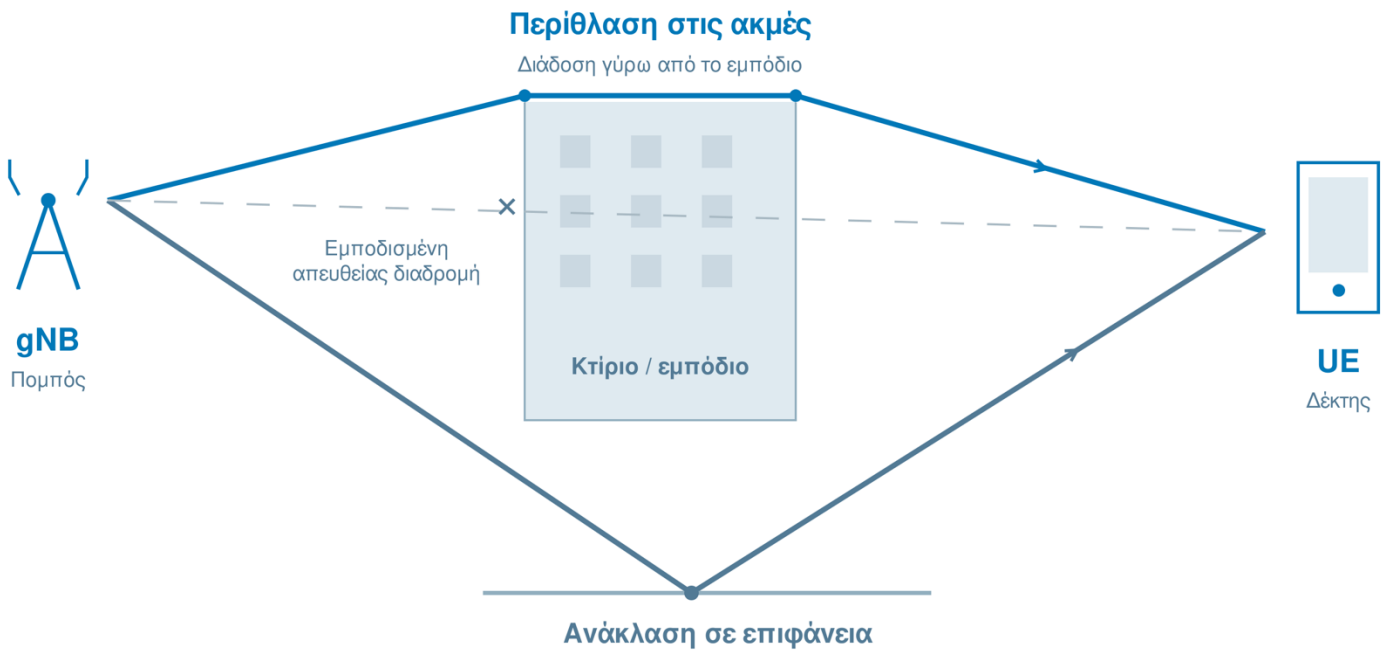
Περισσότερα cells

Ένα sector μπορεί να προσφέρει πολλαπλά cells σε διαφορετικές bands ή carriers. Το antenna pattern δεν έχει τέλεια όρια.

> **Physical site, sector και cell είναι διαφορετικές έννοιες.**

Wireless challenges και πολλαπλές διαδρομές

Στο radio link οι συνθήκες μετάδοσης αλλάζουν με τη θέση και τον χρόνο



Path loss

Η μέση ισχύς μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από τον πομπό.

Shadowing

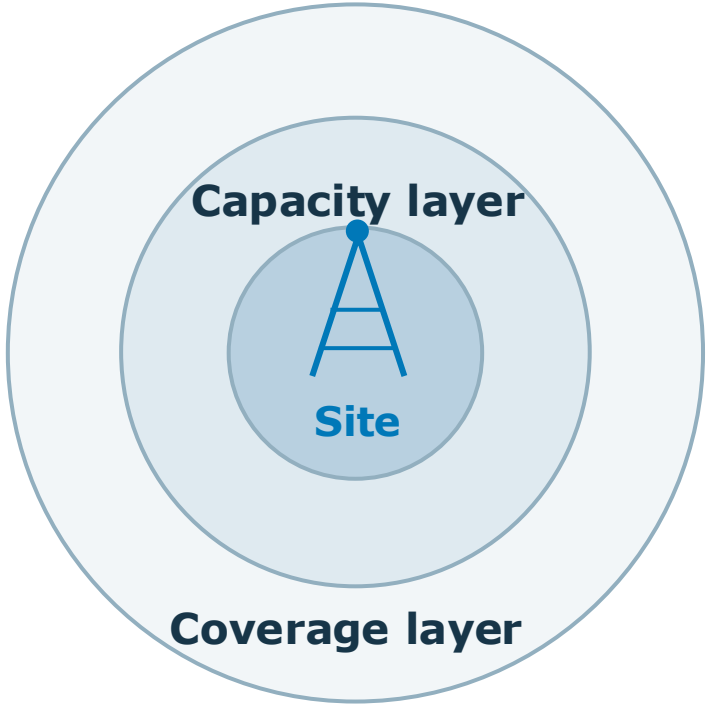
Κτίρια και μεγάλα εμπόδια αλλάζουν τη μέση λαμβανόμενη ισχύ.

Multipath fading

Διαδρομές με διαφορετική καθυστέρηση και φάση δημιουργούν γρήγορες διακυμάνσεις.

Οι διαφορετικές διαδρομές αθροίζονται στον δέκτη και μπορούν να ενισχύουν ή να αποδυναμώνουν το σήμα.

Coverage-Capacity trade-off



Σχηματική layered coverage. Οι κύκλοι δεν δείχνουν πραγματικές ακτίνες συγκεκριμένων bands.

Η κάλυψη

Χρειάζεται επαρκές received power και κατάλληλο link budget. Η πυκνότητα sites και το indoor περιβάλλον έχουν μεγάλο ρόλο.

Η χωρητικότητα

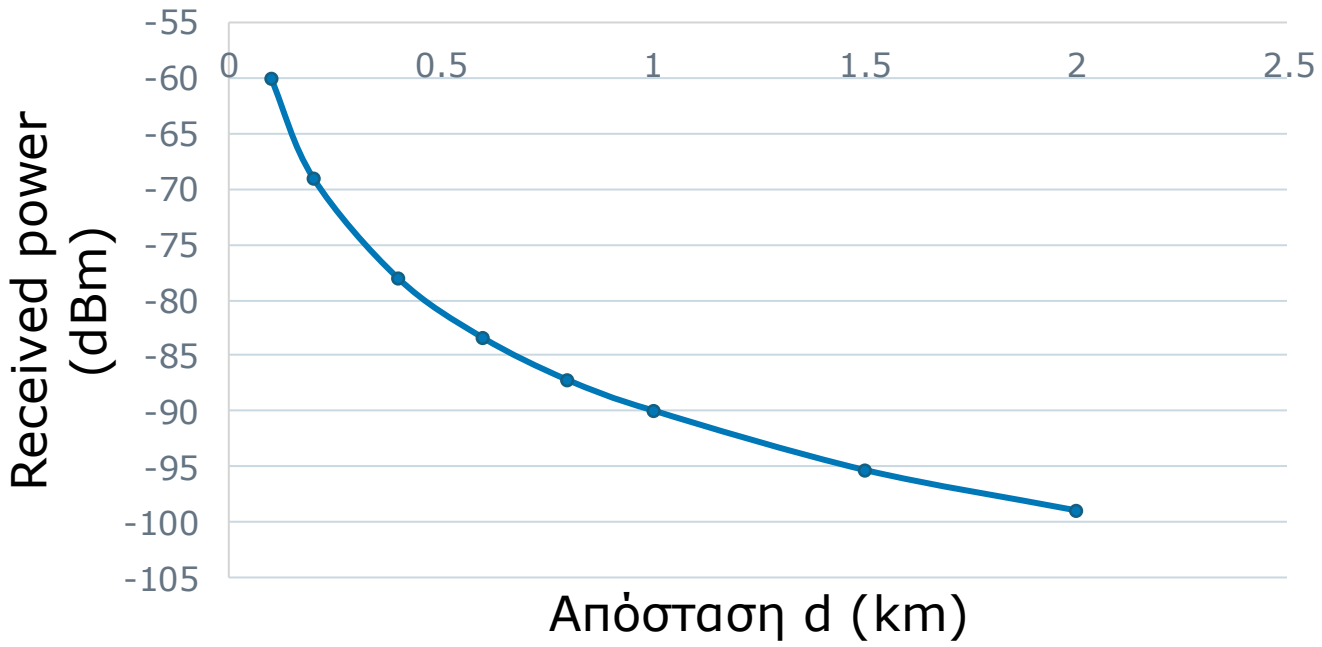
Εξαρτάται από bandwidth, SINR, MIMO layers και από το πόσοι χρήστες μοιράζονται τους πόρους.

Low-band για συνέχεια πρόσβασης. Mid-band για αστική κίνηση. High-band για συγκεκριμένα σημεία υψηλής ζήτησης.

Ο σχεδιασμός συνδυάζει coverage layers και capacity layers για να εξυπηρετήσει διαφορετικά σημεία.

Path loss

Η απώλεια διάδοσης εκφράζει εξασθένηση ισχύος, όχι απώλεια πακέτων



Μοντέλο αναφοράς

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

- $PL(d)$: path loss στην απόσταση d, σε **dB**.
- d_0: απόσταση αναφοράς, όπου γνωρίζουμε ή υποθέτουμε το $PL(d_0)$.
- n: εκθέτης απωλειών διάδοσης. Μεγαλύτερο n σημαίνει ταχύτερη εξασθένηση με την απόσταση.
- d/d_0: πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η απόσταση από την απόσταση αναφοράς. Οι δύο αποστάσεις πρέπει να έχουν **ίδιες μονάδες**.

Παράδειγμα

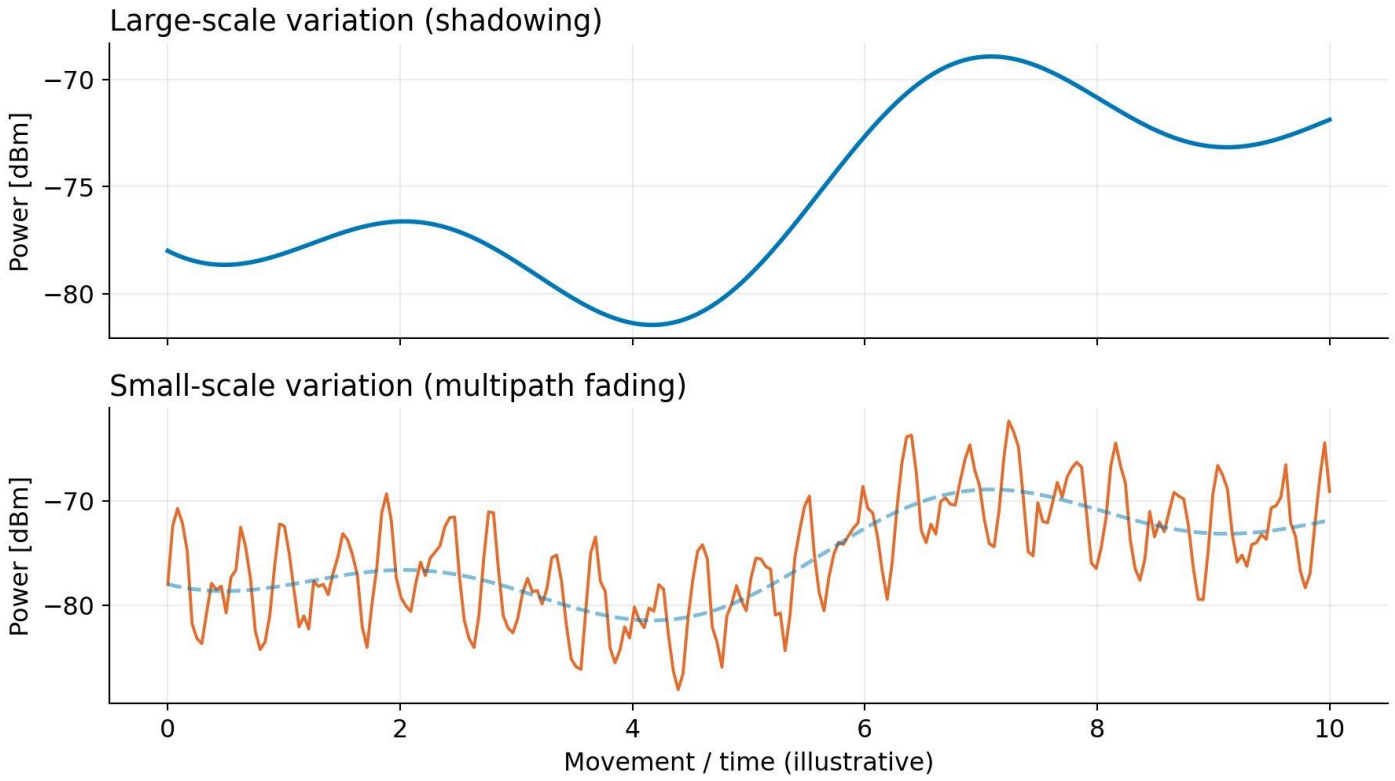
Για n = 3, αύξηση από 100 m σε 1 km (log(d/d0)=1), προσθέτει 30 dB απώλειας, δηλαδή μείωση της ισχύος στο 1 1/1000 της αρχικής.

Αναλυτικό παράδειγμα με n = 3. Δεν είναι dataset ή εκτίμηση για συγκεκριμένο 5G deployment.

> **Σε log-distance model, δεκαπλάσια απόσταση προσθέτει 10n dB path loss.**

Shadowing και multipath fading

Μεγάλες μετακινήσεις και μικρές μετακινήσεις επηρεάζουν διαφορετικά το κανάλι



Shadowing

Αργή μεταβολή της τοπικής μέσης ισχύος καθώς μεγάλα εμπόδια αλλάζουν την ορατότητα και τη διάδοση.

Multipath fading

Ταχύτερη μεταβολή από συμβολή πολλών διαδρομών. Μικρή αλλαγή θέσης αλλάζει τις σχετικές φάσεις.

Συνέπεια για το RAN

Οι μετρήσεις χρειάζονται φιλτράρισμα. Scheduling και link adaptation πρέπει να ανταποκρίνονται σε μεταβαλλόμενο κανάλι.

Το ίδιο UE μπορεί να έχει σημαντικά διαφορετικό link quality ακόμη και σε κοντινά σημεία.

Radio measurements: RSRP, RSRQ και SINR

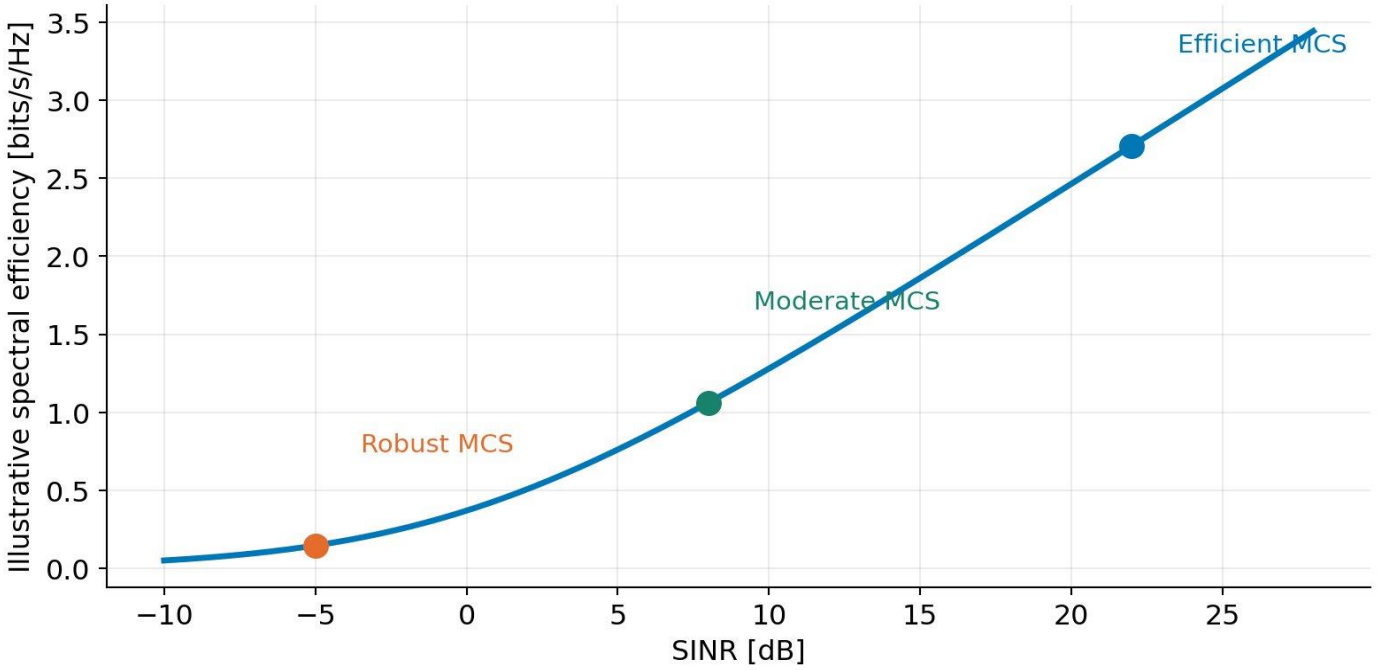
Μετράμε ισχύ, ποιότητα και σχέση προς interference/noise

Δείκτης	Τι περιγράφει	Πώς τον χρησιμοποιούμε
RSRP Reference Signal Received **Power**	Ισχύς των reference signals. Συνήθως σε dBm. Στο NR υπάρχει SS-RSRP (synchronisation signal) ή CSI-RSRP (channel state information).	Εκτίμηση κάλυψης, cell και beam measurements
RSRQ Reference Signal Received **Quality** $RSRQ = \frac{N \cdot RSRP}{RSSI}$	Συγκρίνει την ισχύ του σήματος αναφοράς με τη συνολική λαμβανόμενη ισχύ, η οποία περιλαμβάνει και παρεμβολές και θόρυβο.	**Συμπληρωματική ένδειξη** radio quality που επηρεάζεται από **interference και load**
SINR Signal-to-Interference plus-Noise **Ratio**	Λόγος επιθυμητής ισχύος προς παρεμβολές και θόρυβο. Σε dB ή γραμμική κλίμακα.	Link quality, δυνατότητα MCS και spectral efficiency

Δυνατό RSRP μπορεί να συνυπάρχει με χαμηλό SINR όταν είναι ισχυρές και οι παρεμβολές.

Από το SINR στο επιτεύξιμο data rate

To link quality επηρεάζει πόσα information bits χωρούν σε κάθε radio resource



*Το MCS - Modulation and Coding Scheme καθορίζει τον **συνδυασμό διαμόρφωσης και ρυθμού κωδικοποίησης** που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων.*

Χαμηλό SINR

Χρειάζεται πιο ανθεκτικό MCS. Μεταφέρουμε λιγότερα information bits ανά resource και μειώνουμε την πιθανότητα λανθασμένης λήψης.

Υψηλό SINR

Μπορεί να επιτρέψει μεγαλύτερη τάξη modulation και υψηλότερο coding rate, υπό κατάλληλες συνθήκες.

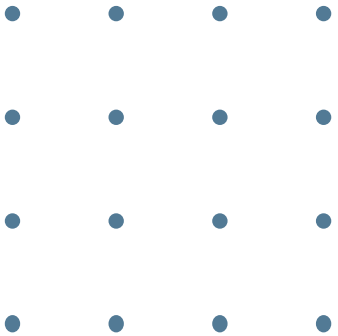
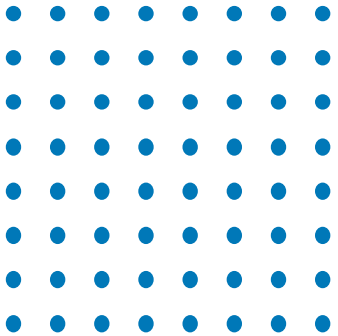
Πραγματικό throughput

Εξαρτάται επιπλέον από allocated PRBs, MIMO layers, control overhead, retransmissions και τον χρόνο εξυπηρέτησης.

Η link adaptation επιλέγει MCS με ισορροπία spectral efficiency και πιθανότητας σφάλματος.

Link adaptation και MCS

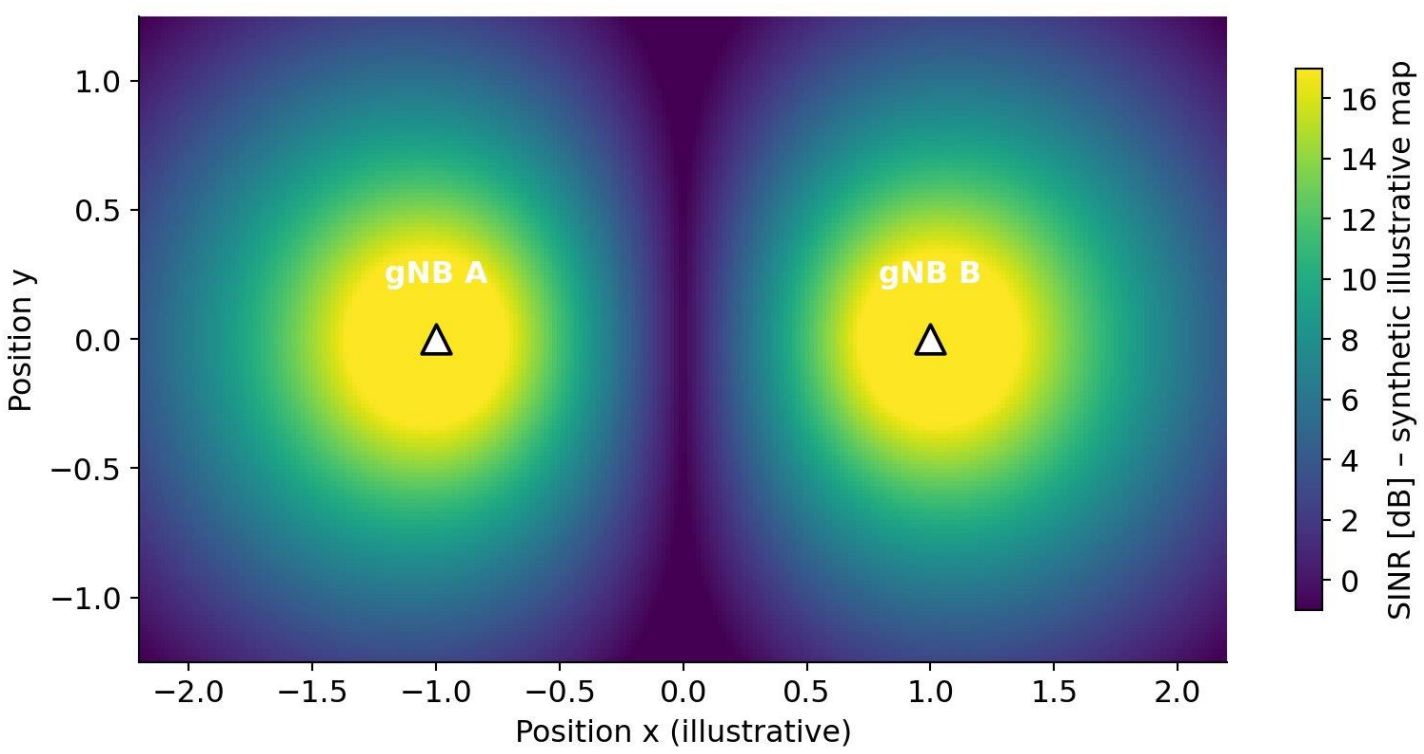
Ο scheduler αποφασίζει MCS μαζί με την κατανομή πόρων

Χαμηλή ποιότητα	Ενδιάμεση ποιότητα	Υψηλή ποιότητα
		
QPSK / robust coding	**Ενδιάμεσο MCS**	**Higher-order modulation**
Λιγότερα bits/resource	Ισορροπία rate και errors	Περισσότερα bits/resource

Αν το feedback καθυστερεί, ένα επιθετικό MCS μπορεί να αυξήσει errors και retransmissions.

Inter-cell interference και cell edge

Το desired signal και η γειτονική μετάδοση μπορεί να έχουν συγκρίσιμη ισχύ



Co-channel transmissions

Όταν neighbour cells εκπέμπουν ταυτόχρονα στους ίδιους time-frequency resources, η γειτονική μετάδοση συνεισφέρει interference.

Γιατί το edge δυσκολεύει

Η serving cell είναι πιο μακριά, ενώ η neighbour cell μπορεί να είναι σχεδόν εξίσου κοντά. Το SINR περιορίζεται.

Επιπτώσεις

Πιο ανθεκτικό MCS, πιθανές retransmissions και μεγαλύτερη κατανάλωση resources για το ίδιο payload.

Στο cell edge το πρόβλημα συχνά είναι η σχέση S/(I+N), όχι μόνο η χαμηλή ισχύς S.

Frequency reuse και spectrum

Reuse-3 στο ιδεατό hexagonal model και reuse-1 στα σύγχρονα cellular δίκτυα



Ιδεατό hexagonal reuse-3. Τα χρώματα αντιστοιχούν σε frequency groups F1, F2 και F3.

Κλασικό reuse-3

Το συνολικό spectrum χωρίζεται σε 3 groups. Κάθε cell χρησιμοποιεί μία group. Ίδια group εμφανίζεται ξανά σε μεγαλύτερη απόσταση.

Το κόστος

Ανά cell είναι διαθέσιμο μόνο μέρος του συνολικού spectrum. Η μεγαλύτερη απόσταση co-channel cells περιορίζει interference.

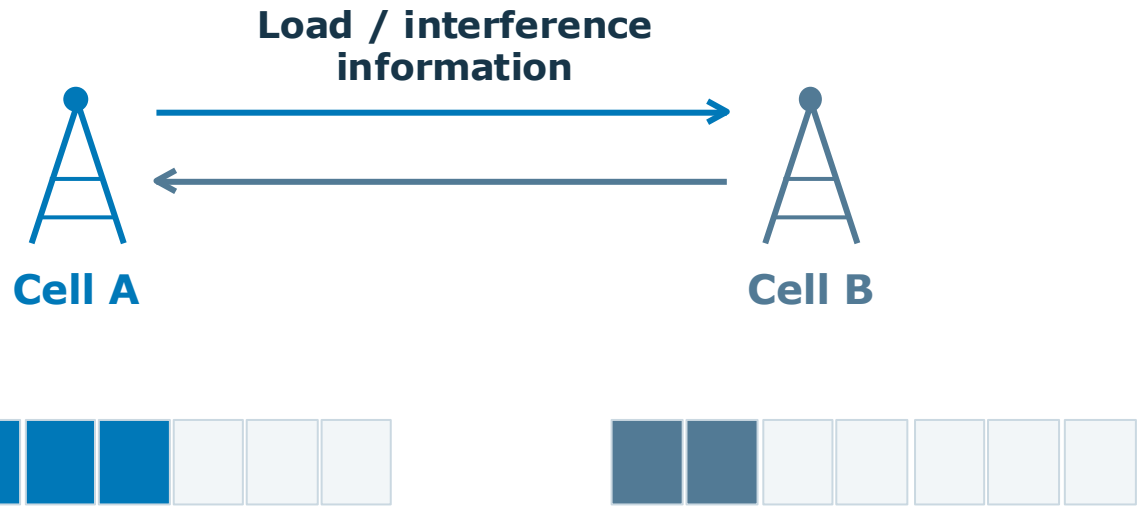
Reuse-1 σε LTE / NR

Κάθε cell μπορεί να χρησιμοποιεί το ίδιο carrier. Coordination, power control και beams βοηθούν στη διαχείριση interference.

Reuse-3: οι άμεσα γειτονικές cells έχουν διαφορετική frequency group.

Interference coordination και load balancing

Οι cells ανταλλάσσουν πληροφορίες για αποφάσεις με μικρότερη αλληλοπαρεμβολή



Παράδειγμα coordination σε διαθεσιμότητα DL/UL PRBs

Το **LOAD INFORMATION** μπορεί να περιέχει:

- **UL Interference Overload Indication:** επίπεδο παρατηρούμενης uplink παρεμβολής ανά PRB.
- **Relative Narrowband Tx Power — RNTP:** ένδειξη για το αν η downlink ισχύς ανά PRB βρίσκεται κάτω από συγκεκριμένο threshold.

Interference coordination

Τα γειτονικά cells μπορούν να συντονίζουν resource use, ισχύ ή spatial transmission για προστασία ευάλωτων UEs.

Load balancing

Μεταφορά ή προτίμηση πρόσβασης προς λιγότερο φορτωμένο cell, όταν το radio link επιτρέπει εξυπηρέτηση.

Ο συμβιβασμός

Η coordination μπορεί να βελτιώνει edge performance αλλά περιορίζει προσωρινά τη χρήση πόρων μιας cell.

Capacity, throughput και spectral efficiency

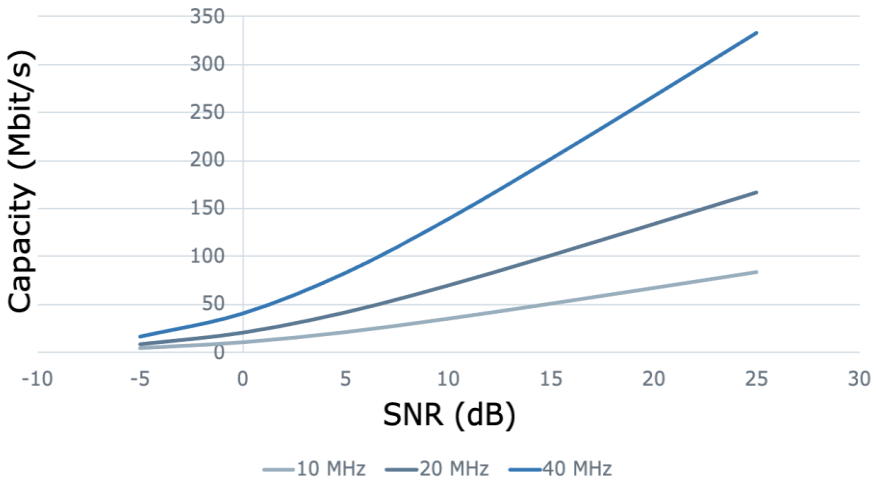
Οι όροι περιγράφουν διαφορετικά επίπεδα απόδοσης

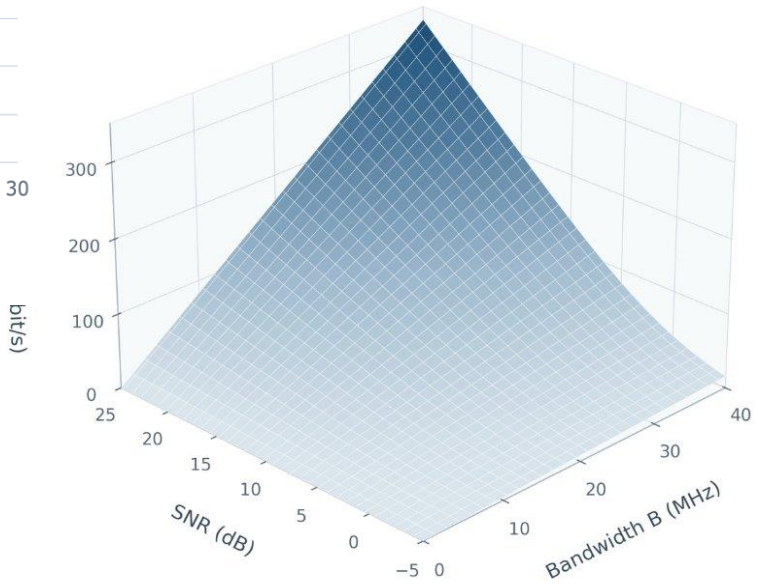
Capacity	**Δυνατότητα** μεταφοράς πληροφορίας υπό συγκεκριμένο μοντέλο και περιορισμούς. Μπορεί να αφορά ένα link ή ένα σύστημα, όχι τον ρυθμό που τελικά βλέπει κάθε χρήστης.
Throughput	**Πραγματικός ρυθμός** επιτυχώς παραδιδόμενων δεδομένων, σε bit/s. Radio, IP και application throughput **διαφέρουν** λόγω overhead, retransmissions και του **σημείου μέτρησης**.
Spectral efficiency	**Ρυθμός πληροφορίας ανά μονάδα bandwidth**, σε **bit/s/Hz**. Για 100 Mbit/s μέσα σε 20 MHz, η αντίστοιχη μέση τιμή είναι 5 bit/s/Hz, στο ίδιο επίπεδο μέτρησης.

> **Η σύγκριση αποτελεσμάτων χρειάζεται κοινό επίπεδο μέτρησης, ίδιες μονάδες και σαφείς παραδοχές.**

Bandwidth και link quality

Η θεωρητική σχέση $C = B \log_2(1 + SNR)$ δείχνει τη διαφορετική επίδρασή τους (τύπος χωρητικότητας Shannon–Hartley: περιγράφει τον θεωρητικό μέγιστο ρυθμό αξιόπιστης μετάδοσης σε κανάλι με προσθετικό λευκό Gaussian θόρυβο)





Περισσότερο bandwidth

Περισσότερα frequency resources, εφόσον spectrum, RF hardware και deployment το επιτρέπουν.

Καλύτερο SNR / SINR

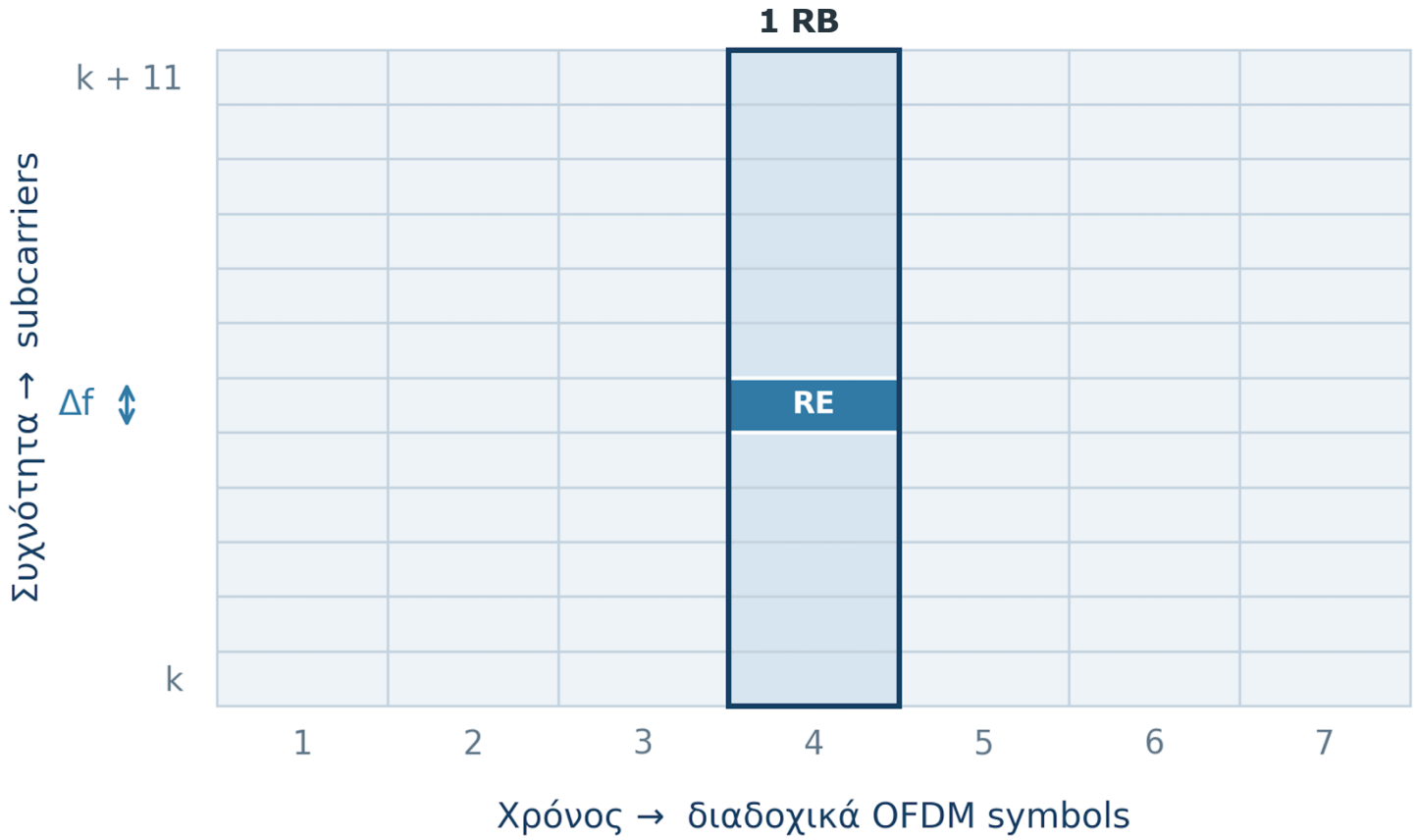
Περισσότερα information bits ανά Hz.

Πρακτικός περιορισμός

Αν αυξάνει το bandwidth με σταθερή συνολική transmit power, το SNR μπορεί να αλλάξει. Το user throughput έχει επιπλέον overhead και sharing.

Σε σταθερό SNR, το θεωρητικό capacity αυξάνεται γραμμικά με το bandwidth.

Time-frequency grid και Resource Elements



Frequency domain

Το διαθέσιμο bandwidth χωρίζεται σε subcarriers. Το subcarrier spacing διαμορφώνει τη γεωμετρία του grid.

1 Resource Element (RE) είναι μία μικρή θέση με δύο διαστάσεις:

- **Στη συχνότητα:** ένας συγκεκριμένος subcarrier.
- **Στον χρόνο:** η διάρκεια ενός συγκεκριμένου OFDM symbol

1 RB = 12 subcarriers

Time domain

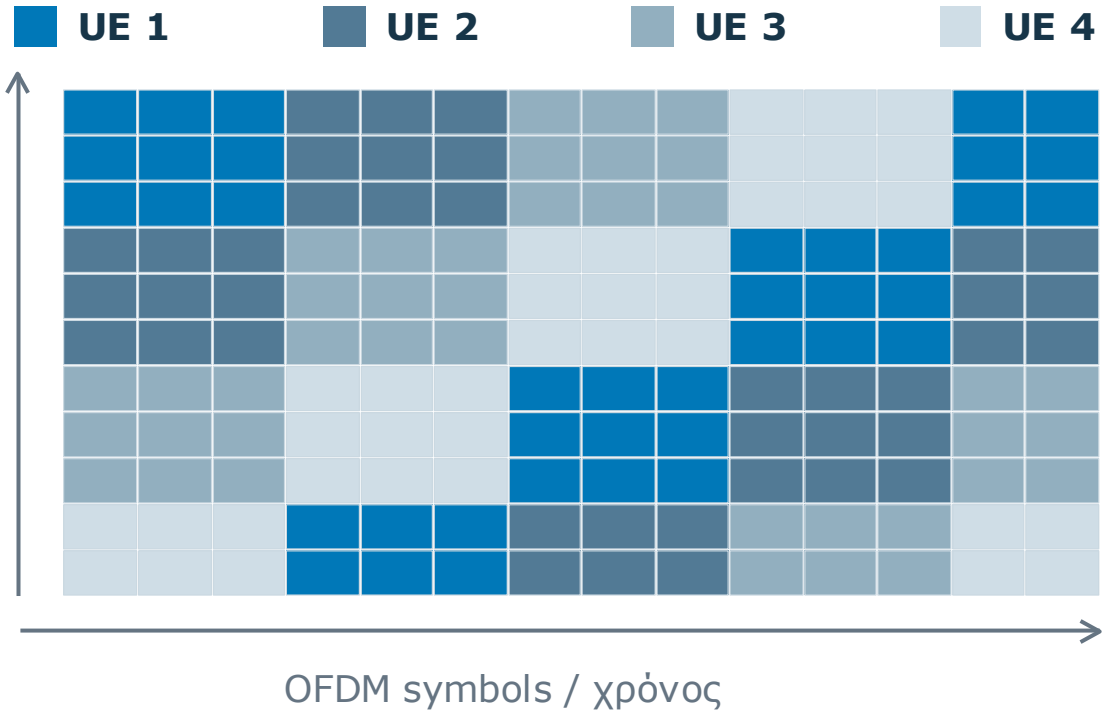
Η μετάδοση εξελίσσεται σε OFDM symbols. Symbols σχηματίζουν slots σύμφωνα με τη numerology (1 slot=0,5 ms, κάθε slot περιέχει 14 OFDM symbols με 30 kHz subcarrier spacing).

Το radio grid μετατρέπει bandwidth και χρόνο σε συγκεκριμένους πόρους μετάδοσης.

Time-frequency grid και Resource Elements

Channel bandwidth	Spacing Δf	Μέγιστο πλήθος RB	Subcarriers στο πλέγμα	Εύρος πλέγματος
10 MHz	15 kHz	52	624	9,36 MHz
20 MHz	15 kHz	106	1.272	19,08 MHz
20 MHz	30 kHz	51	612	18,36 MHz
20 MHz	60 kHz	24	288	17,28 MHz
50 MHz	30 kHz	133	1.596	47,88 MHz
100 MHz	30 kHz	273	3.276	98,28 MHz
100 MHz	60 kHz	135	1.620	97,20 MHz

Scheduling: χρήστες στο time-frequency grid



Ορθογώνιοι πόροι

Στη βασική OFDMA απεικόνιση, οι UEs μιας cell χρησιμοποιούν διαφορετικούς frequency resources στην ίδια χρονική περίοδο.

Μεταβαλλόμενη allocation

Η κατανομή αλλάζει καθώς αλλάζουν channel quality, ουρές δεδομένων και service priorities.

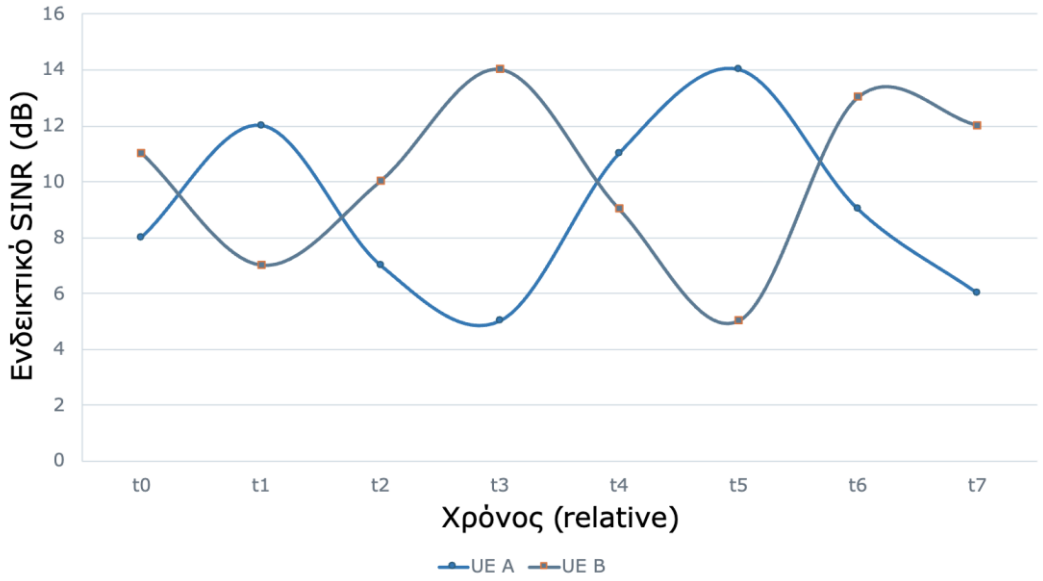
Spatial dimension

Με MU-MIMO διαφορετικοί UEs μπορούν **υπό συνθήκες να εξυπηρετούνται στους ίδιους time-frequency resources.**

Κάθε allocation έχει θέση στον χρόνο και στη συχνότητα, μαζί με επιλογή MCS.

Channel-dependent scheduling

Το radio channel και η ουρά δεδομένων αλλάζουν με τον χρόνο



CQI	Modulation	Code rate	Αποδοτικότητα[1]
1	QPSK	78/1024 ≈ 0,076	0,15
4	QPSK	308/1024 ≈ 0,301	0,60
7	16-QAM	378/1024 ≈ 0,369	1,48
9	16-QAM	616/1024 ≈ 0,602	2,41
10	64-QAM	466/1024 ≈ 0,455	2,73
12	64-QAM	666/1024 ≈ 0,650	3,90
15	64-QAM	948/1024 ≈ 0,926	5,55

Channel quality

CQI / CSI βοηθούν στην εκτίμηση της αποδοτικότητας της μετάδοσης στους διαθέσιμους πόρους.

Traffic state

Buffer occupancy και χρόνος αναμονής δείχνουν πόσα δεδομένα εκκρεμούν και ποια deadlines πλησιάζουν.

Service policy

QoS priority και fairness αλλάζουν την επιλογή. Ο scheduler μπορεί να εξυπηρετήσει ένα επείγον UE με χαμηλότερο CQI.

[1] Ονομαστικά **information bits ανά data RE, ανά layer**, πριν από τα υπόλοιπα overheads. Υπολογίζεται ως: bits του modulation × code rate. Το **code rate** δείχνει τι ποσοστό των bits που μεταδίδονται αντιστοιχεί σε πληροφορία, αφού προστεθεί η κωδικοποίηση προστασίας από λάθη.

Ενδεικτικά scheduling policies: απόδοση και fairness

Η πολιτική ορίζει ποια συμπεριφορά επιδιώκει ο scheduler

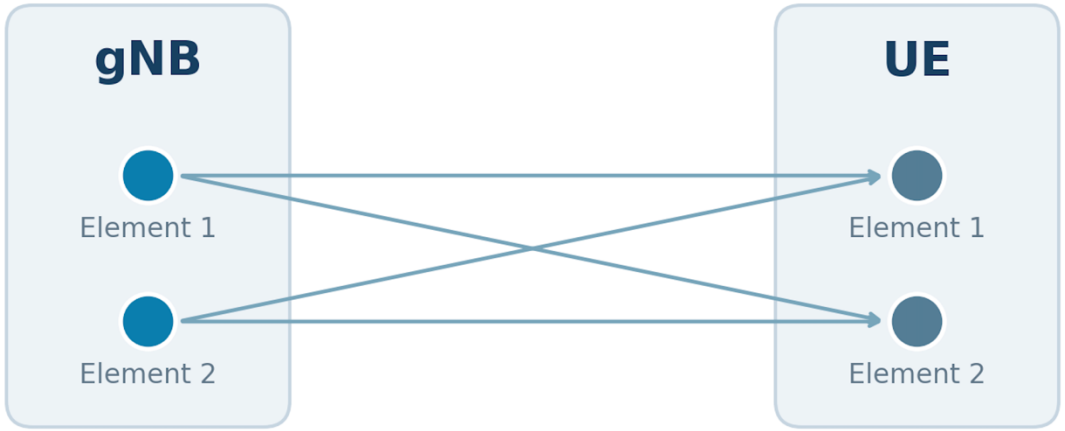
Policy	Κανόνας επιλογής	Πλεονέκτημα	Συμβιβασμός
Round Robin	Εναλλαγή ενεργών UEs με σειρά	Απλή και προβλέψιμη πρόσβαση σε resources	Δεν αξιοποιεί πάντα τις καλές στιγμές του channel
Max-CQI	Προτίμηση στο καλύτερο instantaneous channel	Μεγάλο potential sum throughput	Κίνδυνος συστηματικής υποεξυπηρέτησης edge UEs
Proportional Fair	Σύγκριση instant rate με past average rate	Συνδυάζει channel opportunities και σχετική fairness	Δεν εγγυάται από μόνο του deadlines ή ίσους ρυθμούς

Στην απλή PF μορφή, το metric είναι $r_i(t) / R_{avg,i}(t)$. **Ένα UE αποκτά προτεραιότητα όταν η τρέχουσα ευκαιρία είναι καλή σε σχέση με τον προηγούμενο μέσο ρυθμό του.**

Οι πραγματικοί schedulers συνδυάζουν heuristics με QoS, buffers, channel state και περιορισμούς.

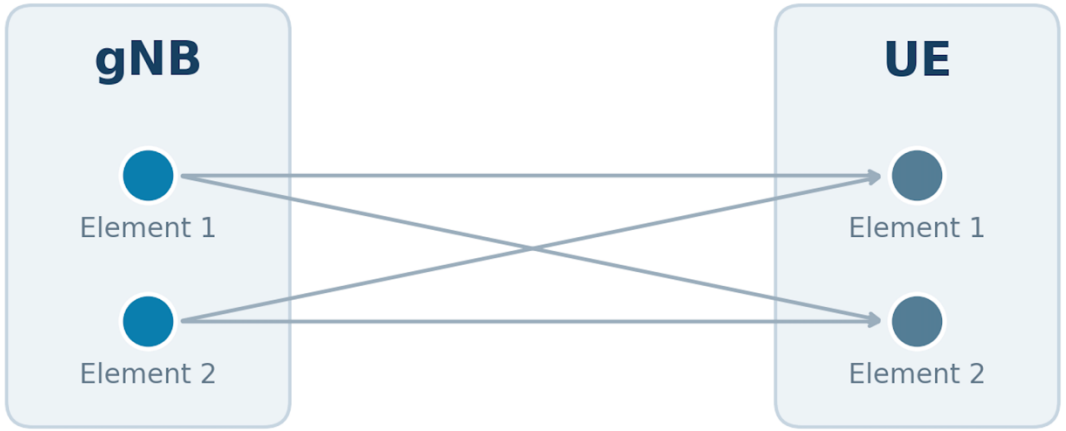
MIMO: diversity και spatial multiplexing

Multiple Input Multiple Output: πολλαπλές κεραίες στον πομπό και στον δέκτη



Ο UE συνδυάζει τις παρατηρήσεις
για να ανακτήσει την πληροφορία A.

Στόχος: robustness και reliability.
Οι διαφορετικές διαδρομές μειώνουν τον κίνδυνο να χαθεί όλη η πληροφορία από ένα deep fade.

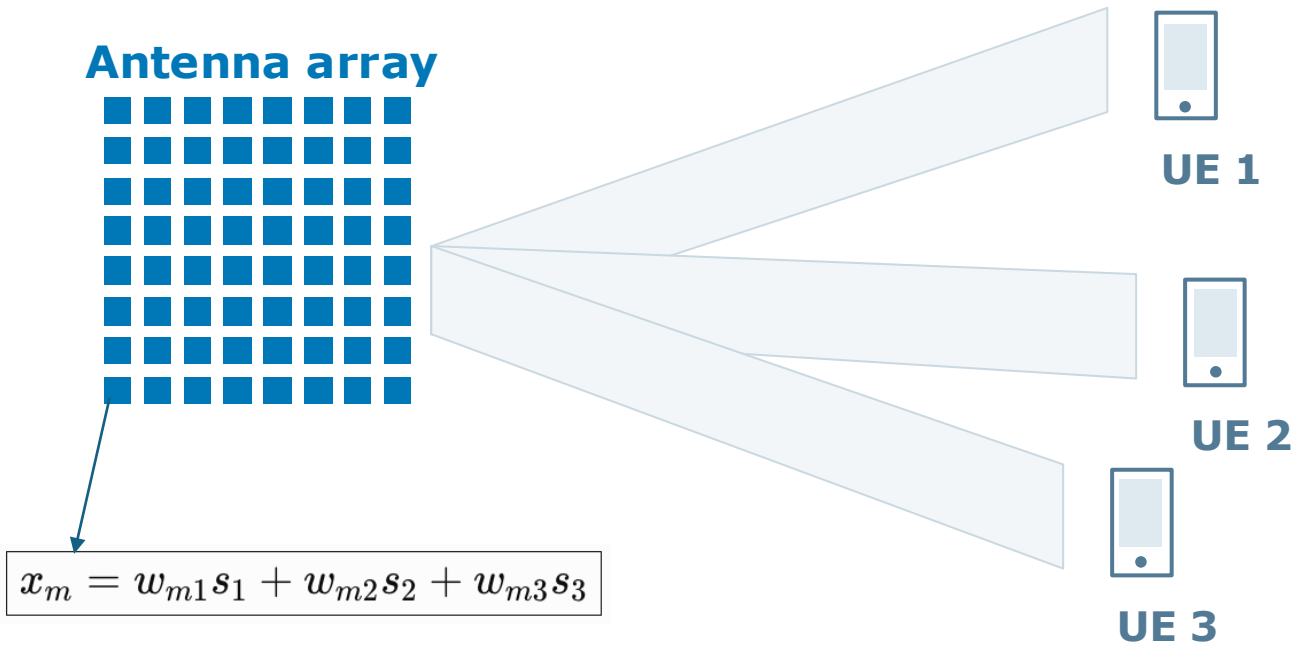


Οι κεραίες του UE λαμβάνουν μίγματα A + B.
Η επεξεργασία MIMO διαχωρίζει τα streams.

Στόχος: υψηλότερη απόδοση μέσα από περισσότερα data streams. Χωρίς spatial multiplexing, στέλνουμε ένα modulation symbol A σε αυτή τη θέση χρόνου-συχνότητας.
Με spatial multiplexing δύο layers, στέλνουμε δύο διαφορετικά modulation symbols, A και B, στην ίδια ακριβώς θέση.

Ο αριθμός χρήσιμων spatial streams εξαρτάται από channel rank, signal quality και capabilities του UE.

Massive MIMO: antenna arrays και πολλοί UEs



Όπου ***s*** τα modulation symbols για κάθε UE και ***w*** τα **precoding** weights του element για κάθε χρήστη (τα w είναι μιγαδικοί που ρυθμίζουν τόσο το πλάτος όσο και τη φάση).

Για κάθε antenna element **με κατάλληλο precoding, το σήμα που εκπέμπει μπορεί να περιέχει συνδυασμό δεδομένων για περισσότερους χρήστες.**

Χωρική εξυπηρέτηση

Το gNB μπορεί να κατευθύνει μετάδοση και να συνδυάζει πολλούς UEs στους ίδιους resources όταν τα channels διαχωρίζονται επαρκώς.

Channel State Information

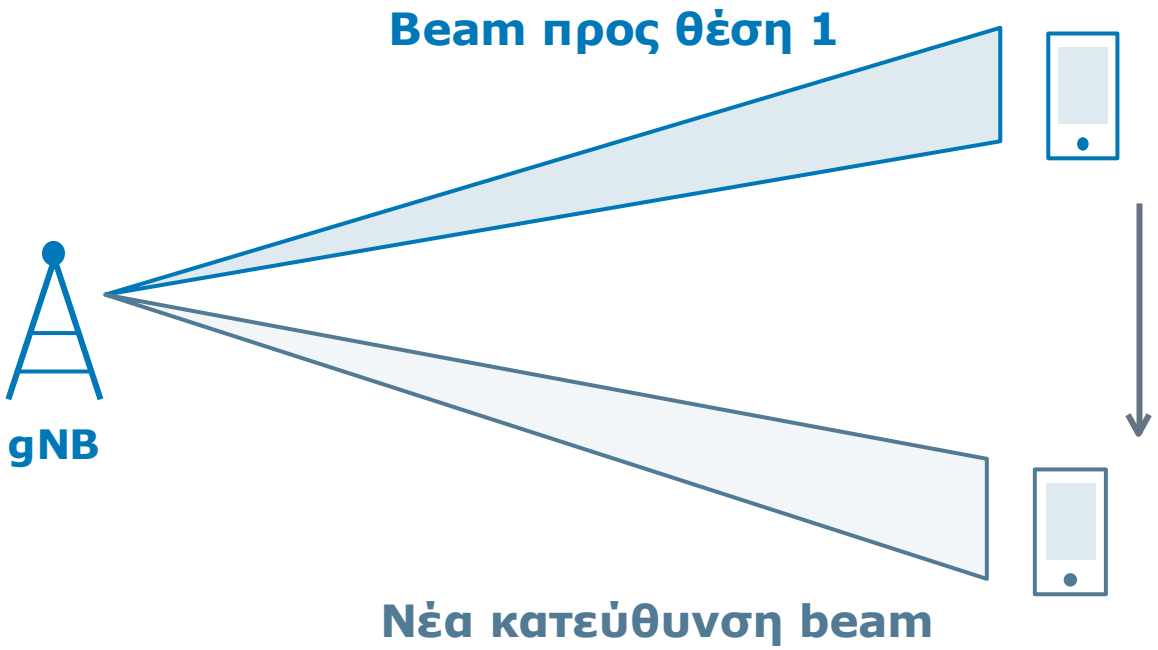
Το CSI περιγράφει το κανάλι. Estimation, feedback και reciprocity calibration* υποστηρίζουν κατάλληλο spatial processing.

Κόστος λειτουργίας

Περισσότερη processing complexity, hardware και ενέργεια. Η επιλογή ενεργών στοιχείων και beams γίνεται μέρος του RRM.

**Το reciprocity calibration είναι η βαθμονόμηση των αλυσίδων εκπομπής και λήψης του gNB, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιεί τις μετρήσεις του uplink για να υπολογίζει σωστά το downlink beamforming. Η ιδέα αφορά κυρίως το TDD, όπου uplink και downlink χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.*

Beamforming κατά το mobility



Array gain

Η χωρική συγκέντρωση ενέργειας μπορεί να αυξήσει το useful signal στη ζητούμενη κατεύθυνση.

Interference control

Το spatial processing μπορεί να μειώσει την επίδραση σε άλλες κατευθύνσεις, ανάλογα με channel και constraints.

Beam management

Beam measurements, selection και tracking βοηθούν το UE και το gNB να διατηρούν κατάλληλη σύνδεση.

Radio Resource Management και Intelligent RAN

Οι αποφάσεις χρειάζονται measurements, στόχο και περιορισμούς



Classical RRM

Thresholds, rules και heuristics επιλέγουν allocation, MCS, power και mobility actions.

Optimization / learning / AI

Optimization συνδυάζει στόχους. Learning μπορεί να προβλέπει load, channel ή mobility και να προτείνει πολιτική.

Η learning-based πολιτική αξιολογείται ως προς QoS, fairness, energy και σταθερότητα, όχι μόνο throughput.

Case study: οι αποφάσεις του scheduler

To resource allocation συνδυάζει channel, traffic και **service priorities**

UE / υπηρεσία	Είσοδος στην απόφαση	Ενδεικτική ενέργεια
Video	Μεγάλο buffer, καλό SINR, sustained-rate ανάγκη	Περισσότερα PRBs όταν υπάρχουν πόροι και αποδοτικό MCS
Voice	Μικρό packet, αυστηρό delay budget	Έγκαιρη allocation. Αποφυγή μεγάλης αναμονής, ακόμη και με λιγότερα PRBs
Telemetry	Μικρό περιοδικό payload, χαμηλό duty cycle	Προσαρμογή allocation στο traffic pattern και έλεγχος signalling overhead

Αν ο voice UE μετακινηθεί στο cell edge, ποια ενέργεια προτιμάμε; Περισσότερους πόρους, πιο robust MCS, interference coordination ή handover;

Ευχαριστώ για την προσοχή σας!