Οδηγός εξαμηνιαίας εργασίας για τη διαχείριση radio πόρων

M301 | Ακαδημαϊκό έτος 2026–2027, Διδάσκων: Σωκράτης Μπαρμπουνάκης

Ατομική εργασία ή εργασία ομάδας δύο ατόμων

Σκοπός και προσδοκώμενο αποτέλεσμα

Επιλέγετε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα Radio Resource Management (RRM), μελετάτε σχετικούς μηχανισμούς από ερευνητικά papers και τεκμηριώνετε μια επιλογή για το δικό σας σενάριο. Δείχνετε με ένα μικρό αριθμητικό παράδειγμα πώς λειτουργεί ο επιλεγμένος μηχανισμός ή μια σαφώς δηλωμένη προσαρμογή του.

Δεν απαιτείται υλοποίηση, προσομοίωση ή εκπαίδευση μοντέλου. Οι αριθμητικές πράξεις μπορούν να γίνουν με το χέρι ή σε υπολογιστικό φύλλο. Δηλώνετε ποιες τιμές προέρχονται από πηγές και ποιες αποτελούν δικές σας υποθέσεις.

Η εργασία σε πέντε βήματα

1. Ορίστε σενάριο και μία συγκεκριμένη απόφαση RRM.
2. Επιλέξτε δύο ή τρία συμπληρωματικά papers: τουλάχιστον δύο του 2025 ή 2026.
3. Επιλέξτε έναν μηχανισμό από paper και περιγράψτε την εφαρμογή ή προσαρμογή του στο σενάριό σας.
4. Εφαρμόστε αριθμητικά τον μηχανισμό και μία baseline στην ίδια κατάσταση. Μεταβάλετε μία παράμετρο και επαναλάβετε.
5. Σχεδιάστε πώς θα αξιολογούσατε την πρόταση και συζητήστε τους περιορισμούς.

Το αριθμητικό παράδειγμα είναι ένα διδακτικό στιγμιότυπο. Δεν αποδεικνύει τις επιδόσεις ενός πραγματικού δικτύου.

1 Οριοθέτηση σεναρίου

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε ένα σενάριο των διαφανειών ή να επιλέξετε άλλο. Προσδιορίστε αρκετά στοιχεία ώστε να είναι σαφές ποια είναι η απόφαση και τι συγκρίνετε.

- Περιβάλλον: public ή private δίκτυο, cells, συσκευές, κινητικότητα και κατανομή χρηστών στα cells.
- Radio: UL ή DL, φορέας, bandwidth, TDD/FDD και επίπεδο απόφασης. Για TDD ορίστε το pattern αν είναι απαραίτητο ή διευκρινίστε ότι δεν το μοντελοποιείτε.
- Υπηρεσίες: endpoints, payload, χρονικά διαστήματα αφίξεων, ρυθμός και τυχόν bursts.
- Απαιτήσεις: deadline και endpoints μέτρησης, στόχοι ρυθμού και αξιοπιστίας όπου χρειάζονται.
- Συνθήκες: φορτίο, ουρές, διαθέσιμοι πόροι, κανάλι και πληροφορίες που έχει ο μηχανισμός.

Ενδεικτικό σενάριο αποθήκης

Private 5G SA με 12 AMRs, δύο cells NR n78, TDD, κεντρική συχνότητα 3,75 GHz και bandwidth 20 MHz, local UPF και edge server. Κάθε AMR λαμβάνει DL control 200 bytes ανά 20 ms: 200 × 8 / 0,02 = 80 kbps ανά AMR ή 0,96 Mbps για 12 AMRs. Υποθετικός στόχος παράδοσης server έως εφαρμογή AMR: 30 ms.

Η UL telemetry 300 bytes ανά 100 ms αντιστοιχεί σε 24 kbps ανά AMR. Τέσσερις ενεργές κάμερες των 4 Mbps παράγουν 16 Mbps UL video payload. Οι ρυθμοί δεν περιλαμβάνουν overhead ή επαναμεταδόσεις. Όλες οι τιμές αποτελούν παραδοχές.

Παράδειγμα απόφασης: DL scheduling σε ένα cell μεταξύ control και πρόσθετης DL κίνησης, π.χ. ενημερώσεων χαρτών. Εναλλακτικά, εξετάστε UL telemetry και video. Η σύγκριση UL και DL απαιτεί ρητό μοντέλο κατανομής χρόνου TDD. Το application deadline δεν ταυτίζεται αυτομάτως με το 5QI Packet Delay Budget.

2 Papers και μεταφορά μηχανισμού στο σενάριο

Επιλέξτε τρία κύρια συμπληρωματικά papers. Τουλάχιστον δύο πρέπει να έχουν δημοσιευθεί το 2025 ή το 2026· το τρίτο μπορεί να είναι παλαιότερο. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε πρόσθετες πηγές.

- Κεντρικό paper: ένας μηχανισμός κοντά στο τεχνικό ερώτημα.
- Δεύτερο paper: εναλλακτική προσέγγιση σε συγκρίσιμο επίπεδο απόφασης.
- Τρίτο paper: κρίσιμη συμπληρωματική διάσταση, π.χ. fairness, generalization ή υπολογιστικό κόστος.

Για κάθε paper καταγράψτε πρόβλημα, σενάριο, απόφαση, εισόδους, μέθοδο, παραδοχές, baselines, KPIs και συνθήκες αξιολόγησης. Παραπέμψτε στο συγκεκριμένο σχήμα ή πείραμα που στηρίζει κάθε σημαντικό ισχυρισμό. Μη συγκρίνετε ποσοστά από διαφορετικά papers σαν να προέρχονται από το ίδιο πείραμα.

Τι μεταφέρετε στο δικό σας case

Επιλέξτε συγκεκριμένο μηχανισμό από ένα paper και προσδιορίστε την εξίσωση, τον κανόνα ή τα βήματα αλγορίθμου που θα χρησιμοποιήσετε. Αντιστοιχίστε τα στοιχεία του paper στις συσκευές, τις ροές, τους πόρους και τους στόχους του σεναρίου σας. Δηλώστε τι διατηρείτε, τι απλοποιείτε και τι προσθέτετε. Η εισήγηση και η αριθμητική εφαρμογή πρέπει να αφορούν τον ίδιο μηχανισμό ή τη δηλωμένη προσαρμογή του.

Περιγράψτε: πού και πότε εκτελείται, διαθέσιμες εισόδους και ηλικία τους, ενέργειες, στόχο, περιορισμούς και τι συμβαίνει όταν δεν προκύπτει έγκαιρη απόφαση. Μην εξισώνετε slice allocation, packet scheduling και admission control: μπορεί να λειτουργούν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες.

Για optimization ορίστε μεταβλητές, objective και constraints. Για RL περιγράψτε observation/state, action, reward και χρονική σχέση με το περιβάλλον. Μια ποινή στο reward δεν αποτελεί από μόνη της εγγύηση τήρησης deadline.

3 Η αριθμητική εφαρμογή που παραδίδετε

- Επιλέξτε ένα μικρό στιγμιότυπο του σεναρίου σας, με λίγα flows και πόρους.
- Ορίστε αριθμητικά όλες τις εισόδους που απαιτούν ο μηχανισμός και η baseline. Δηλώστε μονάδες και παραδοχές.
- Εφαρμόστε τον επιλεγμένο μηχανισμό και δείξτε βήμα προς βήμα πώς προκύπτει η απόφαση.
- Εφαρμόστε μια baseline στο ίδιο επίπεδο απόφασης και στις ίδιες συνθήκες. Δείξτε τα αποτελέσματα και τον συμβιβασμό.
- Αλλάξτε μία παράμετρο, π.χ. υπολειπόμενο deadline, backlog ή ποσότητα payload ανά μονάδα, και επαναλάβετε.
- Εξηγήστε τι δείχνει και τι δεν δείχνει το παράδειγμα.

Οι αριθμητικές τιμές μπορεί να είναι υποθετικές και πρέπει να είναι συνεπείς με το σενάριο. Αν χρησιμοποιείτε αφηρημένες μονάδες πόρου, μην τις παρουσιάζετε ως συγκεκριμένο πλήθος NR PRBs ή ως υπολογισμό που προκύπτει από το bandwidth. Ορίστε αν ένα deadline είναι στόχος που αξιολογείται ή hard constraint που όλες οι εφικτές λύσεις πρέπει να τηρούν.

Για ένα μικρό optimization μπορείτε να ελέγξετε όλες τις υποψήφιες κατανομές με το χέρι. Για σύνθετη μέθοδο μπορείτε να εφαρμόσετε ένα σαφώς προσδιορισμένο συστατικό, εφόσον συνδέεται με την πρότασή σας. Στο RL, ο υπολογισμός reward για δύο αποτελέσματα βοηθά να κατανοηθεί η συνάρτηση ανταμοιβής, αλλά δεν δείχνει τι θα επιλέξει η εκπαιδευμένη policy. Χρησιμοποιήστε για το υποχρεωτικό παράδειγμα υπολογίσιμο μηχανισμό ή συστατικό που έχει εγκριθεί στην πρόταση.

Η ηλικία CQI μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεταβολή μόνο αν οριστεί μοντέλο που συνδέει την παλαιότητα με την εκτίμηση καναλιού ή την απόφαση.

4 Λυμένο παράδειγμα μεταφοράς από paper

Το paper των Seliem et al. (2025), ενότητα III-C, ορίζει metric $M_i = U_i / \bar{R}_i$, όπου $U_i = \alpha_i D_i + \beta_i G_i + \gamma_i P_i$. Η χρησιμότητα συνδυάζει επείγον καθυστέρησης, GBR και προτεραιότητα, ενώ $\bar{R}_i$ είναι ιστορικός μέσος ρυθμός. Τα ενεργά flows ταξινομούνται κατά το metric.

Παρακάτω δίνεται δική μας απλοποίηση, όχι αναπαραγωγή της πλήρους υλοποίησης ή των αποτελεσμάτων του paper. Εξετάζουμε ένα cell, ένα DL interval 1 ms και τέσσερις αφηρημένες μονάδες. Το A είναι control προς AMR και το B ενημέρωση χάρτη προς άλλο AMR.

Είσοδος	A control	B χάρτης
Εκκρεμές payload	200 bytes	Τουλάχιστον 1.200 bytes
Payload ανά μονάδα	100 bytes	300 bytes
Υπολειπόμενος χρόνος	1 ms	Χωρίς deadline
Ιστορικός ρυθμός	0,08 Mbps	0,04 Mbps
Προτεραιότητα P	1	1

Για το A, το 1 ms μπορεί ενδεικτικά να προκύπτει από application deadline 30 ms, μείον 5 ms για άλλα τμήματα της διαδρομής και 24 ms αναμονής. Υποθέτουμε ότι η μετάδοση ολοκληρώνεται επιτυχώς στο τέλος του interval, χωρίς overhead, λάθη, retransmissions ή νέες αφίξεις.

Θέτουμε α = 0,8, β = 0, γ = 0,2, παραλείποντας τον όρο GBR. Ορίζουμε D = 1 ms / υπολειπόμενο χρόνο για θετικό υπολειπόμενο χρόνο και D = 0 για flow χωρίς deadline. Οι ρυθμοί εισάγονται σε Mbps. Υπολογίζουμε την κατάταξη μία φορά στην αρχή και εξυπηρετούμε κάθε flow μέχρι να αδειάσει η ουρά του ή να εξαντληθούν οι πόροι.

M_A = (0,8 × 1 + 0,2 × 1) / 0,08 = 12,5
M_B = (0,8 × 0 + 0,2 × 1) / 0,04 = 5

Το A προηγείται. Χρειάζεται 200 / 100 = 2 μονάδες. Οι δύο υπόλοιπες πηγαίνουν στο B. Η baseline μέγιστου payload δίνει και τις τέσσερις μονάδες στο B, καθώς αποδίδει 300 έναντι 100 bytes ανά μονάδα και έχει αρκετό backlog.

5 Αποτελέσματα και μεταβολή

Αποτέλεσμα	Προσαρμοσμένος μηχανισμός	Μέγιστο payload
Μονάδες A / B	2 / 2	0 / 4
Payload A / B	200 / 600 bytes	0 / 1.200 bytes
Συνολικό payload	800 bytes	1.200 bytes
Deadline A	Τηρείται	Ένα miss
Ρυθμός payload στο interval	6,4 Mbps	9,6 Mbps

Η baseline μεταφέρει περισσότερο payload στο συγκεκριμένο interval, αλλά δεν παραδίδει εγκαίρως το A. Εδώ το deadline αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης. Αν ήταν hard constraint και για τις δύο μεθόδους, η κατανομή 0/4 θα ήταν μη εφικτή.

Αλλάζουμε μία παραδοχή

Αυξάνουμε μόνο τον υπολειπόμενο χρόνο του A από 1 σε 10 ms. Τότε $D_A = 0,1$ και $M_A = (0,8 \times 0,1 + 0,2) / 0,08 = 3,5$. Καθώς $3,5 < 5$, προηγείται το B και λαμβάνει και τις τέσσερις μονάδες. Το A δεν εξυπηρετείται σε αυτό το interval, αλλά δεν έχει ακόμη λήξει το deadline του. Δεν γνωρίζουμε τι θα συμβεί στα επόμενα intervals.

Ο αρχικός υπολογισμός και η μεταβολή είναι αριθμητικές εφαρμογές μιας συγκεκριμένης προσαρμογής. Δεν τεκμηριώνουν μακροχρόνιο throughput, p95/p99, fairness ή deadline miss ratio και δεν προβλέπουν επιδόσεις πραγματικής εγκατάστασης.

Βιβλιογραφική πηγή παραδείγματος

M. Seliem, U. Roedig, C. Sreenan, D. Pesch, “QoS-Aware Proportional Fairness Scheduling for Multi-Flow 5G UEs: A Smart Factory Perspective,” MSWiM 2025, doi:10.1109/MSWiM67937.2025.11309032. Διαθέσιμο κείμενο: https://arxiv.org/html/2508.21783v1

6 Σχέδιο αξιολόγησης χωρίς πείραμα

Περιγράψτε πώς θα μπορούσε να αξιολογηθεί η εισήγηση σε μελλοντικό πείραμα. Δεν απαιτείται να εκτελέσετε simulation ή να παράγετε πειραματικά αποτελέσματα.

- Baselines: τουλάχιστον μία εναλλακτική στο ίδιο επίπεδο απόφασης και αιτιολόγηση της επιλογής.
- Δίκαιη σύγκριση: κοινό traffic, radio περιβάλλον, πληθυσμός χρηστών, διαθέσιμη πληροφορία, χρονικός ορίζοντας και συνθήκες εκκίνησης.
- Μεταβολές: φορτίο, bursts, ποιότητα καναλιού ή αριθμός UEs. Εξηγήστε πότε η πρότασή σας μπορεί να αποτύχει.
- Υπόθεση: ποιο KPI αναμένεται να βελτιωθεί, ποιο κόστος μπορεί να εμφανιστεί και ποιο αποτέλεσμα θα σας έκανε να αναθεωρήσετε.

Ορισμός KPIs

- Throughput / goodput: επίπεδο μέτρησης, χρήσιμα ή συνολικά bytes, ανά flow ή aggregate, χρονικό παράθυρο.
- Delay p95: endpoints, δείγμα packets, χρονικό παράθυρο και αντιμετώπιση χαμένων ή εκπρόθεσμων packets.
- Deadline miss ratio: μη έγκαιρα packets προς packets με deadline· διευκρινίστε τον χειρισμό χαμένων και απορριφθέντων.
- Fairness: τι συγκρίνεται ανά UE ή flow, π.χ. throughput ή ικανοποίηση στόχου, και ο σχετικός ορισμός.
- Κόστος απόφασης: χρόνος επίλυσης ή inference και υπολογιστικοί πόροι σε σχέση με τη διαθέσιμη χρονική κλίμακα.

Επιλέξτε KPIs κατάλληλα για την υπηρεσία. Υψηλό aggregate throughput μπορεί να συνυπάρχει με πολλές παραβιάσεις deadline σε ένα flow.

7 Δομή παραδοτέων και αξιολόγηση

Πρόταση θέματος

Υποβάλετε σενάριο, υπηρεσίες, ερώτημα, απόφαση RRM, τρία papers και τον συμπληρωματικό τους ρόλο. Προσδιορίστε τον μηχανισμό που θα μεταφέρετε στο σενάριο, την εξίσωση ή τα βήματα που προτίθεστε να χρησιμοποιήσετε, μια baseline και τις αρχικές αριθμητικές παραδοχές. Η καταλληλότητα του παραδείγματος εξετάζεται κατά την έγκριση του θέματος.

Τελική εργασία

- Πρόβλημα, απαιτήσεις υπηρεσιών και endpoints.
- Συγκριτική τεχνική ανάλυση των τριών papers και τεκμηριωμένη επιλογή.
- Αντιστοίχιση μηχανισμού και σεναρίου, απλοποιήσεις, είσοδοι, απόφαση, περιορισμοί και trade-offs.
- Αριθμητική εφαρμογή του επιλεγμένου μηχανισμού και baseline, με αλλαγή μίας παραμέτρου.
- Σχέδιο αξιολόγησης, KPIs, περιορισμοί, συμπεράσματα και βιβλιογραφία.

Παρουσίαση και συζήτηση

Παρουσιάστε το πρόβλημα, τον μηχανισμό, το αριθμητικό παράδειγμα και το βασικό trade-off. Να είστε σε θέση να εξηγήσετε τις παραδοχές, την προέλευση των τεχνικών ισχυρισμών και μία συνθήκη που θα μπορούσε να αλλάξει την εισήγησή σας. Σε ομάδες δύο ατόμων και τα δύο μέλη πρέπει να μπορούν να εξηγήσουν την κοινή εργασία.

Συνιστώσα	Βαρύτητα	Κύρια κριτήρια
Πρόταση θέματος	10%*	Σενάριο, ερώτημα, papers και εφικτή αριθμητική εφαρμογή
Τελική εργασία	40%*	Τεχνική ανάλυση, σύνθεση, παράδειγμα και τεκμηρίωση
Παρουσίαση και συζήτηση	50%*	Σαφήνεια, κατανόηση και απαντήσεις

***Το 100% της εργασίας αντιστοιχεί στο 40% του τελικού βαθμού του μαθήματος**. Η ολοκλήρωσή της προγραμματίζεται για **22/01/2027**, πριν από την εξέταση του μαθήματος. Οι παρουσιάσεις θα προγραμματιστούν κατόπιν συνεννόησης.

Πηγές έμπνευσης σεναρίων:

Siemens Manufacturing Karlsruhe – Private 5G for intralogistics
Πραγματική εγκατάσταση private industrial 5G με autonomous mobile robots. Είναι καλή αφετηρία για σενάρια αποθήκης, παραγωγής και κινητών ρομπότ.

Nokia – ARENA2036 research factory
Περιγράφει το ερευνητικό εργοστάσιο ARENA2036 και το private wireless δίκτυο της Nokia. Χρήσιμο για σενάρια ευέλικτης παραγωγής, βιομηχανικών συστημάτων και κινητών αυτόνομων συσκευών.

Nokia και Boldyn – Private 5G στο Callio FutureMINE
Παρουσιάζει την εγκατάσταση private 5G στο υπόγειο ορυχείο Callio Pyhäjärvi στη Φινλανδία. Χρήσιμο ως αφετηρία για σενάρια οχημάτων, τηλεχειρισμού και κάλυψης σε στοές.

Πρόσθετες πηγές

Πηγή	Τι μπορεί να αξιοποιηθεί στην εργασία
5G-ACIA – Key 5G Use Cases and Requirements	Βιομηχανικά use cases και απαιτήσεις επικοινωνίας. Καλή αφετηρία για να επιλέξουν εφαρμογή και να εξηγήσουν γιατί έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις.
5G-ACIA – A 5G Traffic Model for Industrial Use Cases · Απευθείας PDF	**Ιδιαίτερα χρήσιμο για την άσκηση:** periodic, aperiodic και burst traffic, με παραδείγματα αισθητήρων, controllers, καμερών και software updates. Βοηθά στον ορισμό αφίξεων και traffic profiles.
5G-ACIA – 5G QoS for Industrial Automation	Πώς το 5G QoS υποστηρίζει διαφορετικές βιομηχανικές εφαρμογές. Χρήσιμο για να συνδέσουν τις απαιτήσεις υπηρεσιών με τη διαφοροποίηση της εξυπηρέτησης.
5G-ACIA – Performance Testing of 5G Systems for Industrial Automation	Χρήσιμο για το **σχέδιο αξιολόγησης**: πώς διατυπώνουμε τι θέλουμε να μετρήσουμε και σε ποιες συνθήκες.
5G-ACIA – Service-Level Specifications for Connected Industries	Πώς περιγράφονται οι απαιτήσεις μιας υπηρεσίας και οι προδιαγραφές μέτρησης. Χρήσιμο για τη διάκριση μεταξύ απαιτήσεων εφαρμογής και δεικτών απόδοσης.
5G-ACIA – NPNs for Industrial Scenarios	Εναλλακτικές αναπτύξεις non-public networks και βιομηχανικά παραδείγματα, μεταξύ άλλων AGVs και mobile inspection robots. Βοηθά στην περιγραφή της αρχιτεκτονικής του σεναρίου.
5G-ACIA – Industrial 5G Edge Computing	Use cases και αρχιτεκτονική με edge computing. Χρήσιμο όταν η εφαρμογή επικοινωνεί με local edge server και οι φοιτητές πρέπει να ορίσουν τα endpoints του latency.
6G-IA – European 6G Vision White Paper, v2.0	Ευρύτερη επισκόπηση πιθανών 6G use cases, όπως συνεργαζόμενα ρομπότ, XR, παραγωγή και μεταφορές. Το προτείνω κυρίως για **έμπνευση και ερευνητικό πλαίσιο**· θα χρειαστούν πιο συγκεκριμένη πηγή ή παραδοχές για την αριθμητική εφαρμογή.

Οι αριθμητικές τιμές των ενδεικτικών σεναρίων είναι διδακτικές παραδοχές και δεν αποδίδονται ως μετρήσεις στις πηγές αυτές.