



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ
ΔΙΑΧΥΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

HOU-CS-PGP-2025-26

«Επισκόπηση της τεχνολογίας των Intelligent Reflecting Surfaces (IRS)»

Ευάγγελος Χριστοδούλου

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΠΟΛΙΤΙΔΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2026



**HELLENIC OPEN UNIVERSITY
SCHOOL OF SCIENCES AND TECHNOLOGY**







Πτυχιακή Εργασία HOU-CS- PGP-2025-26

Επισκόπηση της τεχνολογίας των Intelligent Reflecting Surfaces (IRS)

Ευάγγελος Χριστοδούλου



© ΕΑΠ, 2014

Η παρούσα διατριβή, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ΜΠΣ ΣΔΥ, και τα λοιπά αποτελέσματα της αντίστοιχης Πτυχιακής Εργασίας (ΠΕ) αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης και αναπαραγωγής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα και το ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε η ΠΕ καθώς και τον επιβλέποντα και την επιτροπή κρίσης.



Επισκόπηση της τεχνολογίας των Intelligent Reflecting Surfaces (IRS)

Ευάγγελος Χριστοδούλου

Ονοματεπώνυμο Επιβλέποντα	Ονοματεπώνυμο Μέλους 1	Ονοματεπώνυμο Μέλους 2
ΝΙΚΟΠΟΛΙΤΙΔΗΣ ΠΕΤΡΟΣ	ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	ΚΑΜΕΑΣ ΑΧΙΛΛΕΑΣ



Περίληψη

Η εργασία εξερευνά τις Intelligent Reflecting Surfaces ως έναν καθρέφτη τεχνολογικής φιλοδοξίας για τα μελλοντικά και ολοένα πιο απαιτητικά δίκτυα 6G. Πίσω από τον όρο κρύβεται μια απλή, σχεδόν προκλητικά απλή, ιδέα: το κανάλι δεν αποδεχόμαστε να είναι όπως το βρούμε το πλάθουμε. Οι IRS, αποτελούμενες από χιλιάδες παθητικά αλλά προγραμματιζόμενα στοιχειώδη κύτταρα, σμιλεύουν τη φάση και, κατά περίπτωση, το πλάτος ή την πόλωση ώστε τα κύματα να φτάνουν εκεί όπου χρειάζονται ή να αποφεύγουν εκεί όπου περισσεύουν.

Η μελέτη εμβαθύνει στις λεπτομέρειες: την αρχιτεκτονική των μεταεπιφανειών, τον μηχανισμό ελέγχου που οφείλει να συντονίζεται με τον σταθμό βάσης και το ζήτημα της εκτίμησης καναλιού σε μια διάταξη που δεν εκπέμπει δικό της σήμα. Το θεωρητικό υπόβαθρο εμπλουτίζεται με αλγοριθμικές προσεγγίσεις, όπως η εναλλασσόμενη βελτιστοποίηση, οι μαθηματικές χαλαρώσεις, καθώς και τεχνικές μηχανικής μάθησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα εφαρμογών που εκτείνονται από πυκνά αστικά περιβάλλοντα, όπου μια κατάλληλα τοποθετημένη IRS αποκαθιστά εναλλακτικό μονοπάτι διάδοσης σε συνθήκες μη οπτικής επαφής, έως γραμμές παραγωγής και δορυφόρους χαμηλής τροχιάς. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται κοινό μοτίβο: χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση και αξιοσημείωτη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας, σε συνδυασμό με προγραμματιζόμενη ευελιξία. Επομένως, οι IRS αναδεικνύονται όχι μόνο ως τεχνική λύση, αλλά και ως μεθοδολογική μετατόπιση προς ένα προγραμματιζόμενο ραδιοπεριβάλλον, στοιχείο που στο 6G επιτρέπει τον ευρύτερο σχεδιασμό του ίδιου του μέσου διάδοσης.

Λέξεις-κλειδιά: Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες (IRS), Επαναδιαμορφώσιμες μεταεπιφάνειες, Μεταϋλικά και meta-atoms, Δίκτυα 6G, Μοντελοποίηση και εκτίμηση καναλιού, Παθητικό beamforming και βελτιστοποίηση



Abstract

The study explores Intelligent Reflecting Surfaces as a kind of mirror of technological ambition for future and increasingly demanding 6G networks. Behind the term lies a simple, almost provocatively simple, idea: the channel is no longer something we merely accept as given; we shape it. IRS, composed of thousands of passive yet programmable elementary units, sculpt the phase and, depending on the implementation, the amplitude or polarization, so that waves reach where they are needed or avoid where they are not.

The analysis moves deeper, almost hesitantly at times, into the details: the architecture of metasurfaces, the control mechanism that must remain synchronized with the base station, the persistent puzzle of channel estimation in an entity that is, in a sense, ontologically “silent.” The theoretical foundation is further enriched with algorithmic approaches alternating optimization, mathematical relaxations, even elements of machine learning each attempting to tame a problem that does not always yield easily.

What follows are use-case scenarios that begin in urban canyons, where a well-placed “mirror” restores non-line-of-sight communication, and extend toward industrial production lines or even low-earth-orbit satellites. In each setting, a similar pattern quietly emerges: low cost, minimal power consumption, and a notable improvement in quality of service, all wrapped in a layer of programmable flexibility. In this way, IRS appear not merely as a technical solution, but as a subtle philosophical shift toward a “smart” radio environment a suggestion, perhaps, that in 6G we will not simply build networks, but reshape the very air through which they breathe.

Keywords: Intelligent Reflecting Surfaces (IRS), Reconfigurable Intelligent Surfaces, Metasurfaces and meta-atoms, 6G wireless networks, Channel modeling and estimation, Passive beamforming optimization



Overview of Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) Technology

Euangelos Christodoulou

Ονοματεπώνυμο
Επιβλέποντα στην
Αγγλική

NIKOPOLITIDIS
PETROS

Ονοματεπώνυμο
Μέλους 1 στην Αγγλική

CHORIANOPOULOS
KONSTANTINOS

Ονοματεπώνυμο
Μέλους 2 στην Αγγλική

KAMEAS
ACHILLEAS



Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	6
Εισαγωγή	11
1. Σύγχρονη ερευνητική κατάσταση και ταξινόμηση των Ευφύων Ανακλαστικών Επιφανειών	13
1.1 Παθητικές, Ημι-Παθητικές και Ενεργές IRS.....	13
1.2 Σύγκριση IRS με Relays και Massive MIMO	14
1.3 IRS ως Coverage Enhancers και Interference Controllers.....	16
1.4 Εκτίμηση Καναλιού και Αλγοριθμικές Προσεγγίσεις.....	18
1.5 IRS σε Δορυφορικά και IoT Συστήματα	20
1.6 Προκλήσεις Υλοποίησης και Ρεαλιστικοί Περιορισμοί.....	21
2. Ορισμός και Βασικές Αρχές των IRS.....	22
3. Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Πεδία Μελέτης της Τεχνολογίας IRS	24
3.1 Μεταϋλικά Στοιχεία και Αρχιτεκτονική IRS.....	25
3.2 Δυναμική Ρύθμιση Φάσης και Πλάτους.....	27
3.3 Έλεγχος, Συντονισμός και Ενσωμάτωση στο Δίκτυο	28
3.4 Μοντελοποίηση του Καναλιού IRS.....	29
3.4.1 Προσέγγιση μακρινού πεδίου και κλασική γωνιακή μοντελοποίηση	30
3.4.2 Near-Field Καθεστώς και Μετάβαση σε Beam Focusing	32
3.4.3 Μεγάλης κλίμακας IRS και χωρική μη στασιμότητα	34
3.4.4 Επιπτώσεις στην Εκτίμηση Καναλιού	35
3.5 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης και Διαχείρισης IRS	37
4. Εφαρμογές των IRS σε Διάφορα Περιβάλλοντα	41
4.1 Αστικά Περιβάλλοντα	42



4.2 Βιομηχανικά Περιβάλλοντα και Εγκαταστάσεις.....	43
4.3 Εσωτερικοί Χώροι (Κτίρια, Γραφεία, Σπίτια)	45
4.4 Κινητές Πλατφόρμες: Δορυφόροι και UAV.....	46
5. Ενεργειακή αποδοτικότητα και πράσινες επικοινωνίες με χρήση IRS	48
5.1 IRS έναντι Active Relays: Ανάλυση Κατανάλωσης και Ενεργειακής Απόδοσης.....	50
5.2 Ρόλος των IRS σε Sustainable 6G και Πράσινες Αρχιτεκτονικές.....	51
6. Πρακτικές προκλήσεις ανάπτυξης των IRS.....	52
6.1 Υπερφόρτωση CSI και εκτίμηση του αλυσιδωτού (cascaded) καναλιού.....	53
6.2 Control Signaling και Αρχιτεκτονική Δικτύου.....	54
6.3 Hardware Impairments και Μη Ιδανικότητες RF	55
6.4 Quantization Errors και Υποβάθμιση Απόδοσης.....	55
6.5 Κόστος, Κλιμάκωση και Οικονομικός Ρεαλισμός	56
6.6 Πού δεν βοηθά το IRS Όρια της Τεχνολογίας.....	57
7. Τυποποίηση και βιομηχανική προοπτική	58
7.1 IRS και Τυποποίηση: Αναφορές σε 3GPP και Τεχνολογικές Κατευθύνσεις	59
7.2 RIS έναντι Reconfigurable Intelligent Environment: Εννοιολογική και Αρχιτεκτονική Διάκριση.....	60
7.3 Γιατί οι IRS δεν έχουν ακόμη υιοθετηθεί ευρέως από τη βιομηχανία	61
7.4 Πιθανά Μοντέλα Εμπορικής Αξιοποίησης και Ρεαλιστικά Σενάρια Υιοθέτησης	62
8. Πλεονεκτήματα και Ωφέλη της Τεχνολογίας IRS	64
9. Protocol Issues και Ζητήματα MAC σε Δίκτυα με Intelligent Reflecting Surfaces	66
9.1 Cross-layer οπτική: γιατί το MAC «νοιάζεται» για το IRS.....	67
9.2 MAC Scheduling με IRS: απόφαση πόρων όταν το κανάλι είναι ρυθμιζόμενο..	67
9.3 Control signaling και ο «κρυφός λογαριασμός» του overhead	68
9.4 CSI feedback, mobility και two-timescale λογική.....	69
9.5 Random access, αρχικοποίηση σύνδεσης και “IRS-aware” πρόσβαση.....	69



9.6 HARQ timing, retransmissions και σταθερότητα καναλιού.....	70
9.7 Multi-user contention, παρεμβολή και «ποιος παίρνει» την επιφάνεια.....	70
9.8 Συνόπαρξη με OFDMA/NR scheduling και (σε άλλους κόσμους) CSMA-like μηχανισμούς.....	71
9.9 Network-layer επιπτώσεις: routing, handover, mobility management	71
9.10 QoS, slicing και προτεραιοποίηση: όταν η IRS γίνεται “programmable resource”	72
9.11 Αρχιτεκτονική ελέγχου: IRS controller, interfaces και ελάχιστες αρχές σχεδίασης.....	72
9.12 Συμπερασματική σύνθεση: τι σημαίνει “protocol issues” στην πράξη	73
10. Συμπεράσματα	73
11. Ανοιχτές Προκλήσεις και Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις	81
11.1 Κλιμακούμενη εκτίμηση καναλιού, βελτιστοποίηση και τεχνητή νοημοσύνη .	81
11.2 Λειτουργία σε near-field, μεγάλες επιφάνειες και περιορισμοί υλικού.....	83
11.3 Πολλαπλές IRS, διαστρωματικός έλεγχος και ενσωμάτωση στο δίκτυο	84
11.4 Τυποποίηση, ασφάλεια και ρυθμιστικές προϋποθέσεις.....	85
11.5 C-SWaP, βιωσιμότητα και κύκλος ζωής της τεχνολογίας.....	86
11.6 Πειραματική επαλήθευση, testbeds και μετάβαση σε πραγματικές εφαρμογές	87
Αναφορές	88



Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια δεν συνοδεύεται απλώς από αυξημένες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Συνοδεύεται και από μια ευρύτερη μετατόπιση της φιλοσοφίας σχεδιασμού των δικτύων. Η ανάγκη για καθολική κάλυψη, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και υψηλή φασματική αποδοτικότητα οδηγεί την ερευνητική κοινότητα να αναζητήσει λύσεις πέρα από τα όρια της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής πομπού–καναλιού–δέκτη. Στο πλαίσιο αυτό, τα μελλοντικά δίκτυα 6G δεν μπορούν να βασιστούν αποκλειστικά στην αύξηση του αριθμού κεραιών, σε πιο σύνθετα σχήματα διαμόρφωσης ή σε ισχυρότερους πομπούς. Απαιτείται μια θεμελιώδης διαφορετική προσέγγιση: ο έλεγχος του ίδιου του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης του σήματος [1], [2].

Στο πλαίσιο αυτό αναδύεται η τεχνολογία των Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) ή Έξυπνων Ανακλαστικών Επιφανειών. Οι IRS αποτελούν προγραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες, οι οποίες απαρτίζονται από πλήθος παθητικών μεταϋλικών στοιχείων ικανών να ρυθμίζουν δυναμικά τη φάση και το πλάτος των προσπίπτοντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με τον τρόπο αυτό, το ασύρματο κανάλι παύει να αντιμετωπίζεται ως ανεξέλεγκτος παράγοντας και μετατρέπεται σε σχεδιάσιμο και ελεγχόμενο τμήμα του δικτύου [1], [6].

Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης που περιορίζονται στους ενεργούς κόμβους όπως το beamforming στον σταθμό βάσης ή οι πολύπλοκοι δέκτες στον χρήστη οι IRS εισάγουν έναν νέο βαθμό ελευθερίας: τον παθητικό, αλλά εξαιρετικά αποδοτικό, έλεγχο της διάδοσης του κύματος στον χώρο. Το αποτέλεσμα είναι η δυνατότητα δημιουργίας



έξυπνων ασύρματων περιβαλλόντων (Smart Radio Environments), όπου τα σήματα μπορούν να ανακλώνται επιλεκτικά, να ενισχύονται σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις ή ακόμη και να ακυρώνονται, μειώνοντας παρεμβολές και νεκρές ζώνες κάλυψης [2], [6]. Η προσέγγιση αυτή έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τόσο την φασματική όσο και την ενεργειακή αποδοτικότητα των δικτύων, χωρίς την ανάγκη για επιπλέον ενεργά συστήματα μετάδοσης [1], [9].

Η σημασία των IRS δεν περιορίζεται μόνο στη βελτίωση της ποιότητας σήματος. Επεκτείνεται στη συνολική φιλοσοφία των δικτύων 6G, όπου επιδιώκεται η υλοποίηση ενός ολιστικού, προγραμματιζόμενου ραδιοπεριβάλλοντος. Όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία, οι IRS αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο για τη μετάβαση από τα «έξυπνα δίκτυα» στα «έξυπνα περιβάλλοντα», όπου κτίρια, τοίχοι και επιφάνειες συμμετέχουν ενεργά στη διαδικασία επικοινωνίας [2], [4]. Η δυνατότητα ελέγχου του καναλιού διάδοσης καθιστά εφικτή την αντιμετώπιση θεμελιωδών προβλημάτων των σημερινών δικτύων, όπως η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, το κόστος πυκνής ανάπτυξης σταθμών βάσης και η έντονη παρεμβολή σε αστικά περιβάλλοντα [3], [6].

Παράλληλα, η τεχνολογία IRS συνδέεται στενά με σύγχρονα ερευνητικά πεδία όπως η εκτίμηση καναλιού σε πολύπλοκα περιβάλλοντα [8], η βελτιστοποίηση παθητικού beamforming [9], η εφαρμογή σε IoT και SWIPT δίκτυα [7], καθώς και η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης για την αποδοτική διαχείριση των μεταεπιφανειών [10]. Η πολυπλοκότητα και ο πλούτος των εφαρμογών τους αναδεικνύουν ότι δεν πρόκειται για μια απομονωμένη τεχνολογία, αλλά για έναν οριζόντιο μηχανισμό βελτίωσης που διαπερνά πολλούς τομείς των ασύρματων επικοινωνιών.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της τεχνολογίας των IRS, βασισμένη αποκλειστικά σε σύγχρονες επιστημονικές μελέτες υψηλού κύρους. Αρχικά παρουσιάζεται ο ορισμός και οι βασικές αρχές λειτουργίας των IRS. Στη συνέχεια αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και τα κύρια ερευνητικά πεδία που τις συνοδεύουν: η αρχιτεκτονική των μεταεπιφανειών, η δυναμική ρύθμιση φάσης και πλάτους, ο συντονισμός με τα δίκτυα, η μοντελοποίηση του καναλιού και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης [1], [2], [8]. Έπειτα εξετάζονται πρακτικές εφαρμογές σε διαφορετικά περιβάλλοντα αστικά, βιομηχανικά, εσωτερικά και κινητές πλατφόρμες όπου οι IRS αποδεικνύουν την πρακτική τους αξία [3], [5]. Τέλος, συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας και συζητείται ο ρόλος της στα δίκτυα 6G, μαζί με τις εναπομείνουσες τεχνολογικές και ερευνητικές προκλήσεις που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση.



1. Σύγχρονη ερευνητική κατάσταση και ταξινόμηση των Ευφών Ανακλαστικών Επιφανειών

Η έννοια των Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) εντάσσεται σε ένα ευρύτερο όραμα που στη διεθνή βιβλιογραφία αποκαλείται “smart radio environment” ένα περιβάλλον στο οποίο το ίδιο το φυσικό μέσο διάδοσης παύει να θεωρείται παθητικός και ανεξέλεγκτος παράγοντας και μετατρέπεται σε ενεργό, προγραμματιζόμενο πόρο του δικτύου [2], [9]. Η μετατόπιση αυτή είναι βαθιά. Για δεκαετίες, η ασύρματη επικοινωνία σχεδιαζόταν με δεδομένο ότι το κανάλι είναι στοχαστικό, συχνά εχθρικό, και ότι η μόνη άμυνα είναι η αύξηση της ισχύος, η χρήση πολλαπλών κεραιών ή η αξιοποίηση της διαφοροποίησης. Με τις IRS, το περιβάλλον δεν απλώς “υφίσταται” τη μετάδοση τη διαμορφώνει.

Οι πρώτες συστηματικές θεωρητικές θεμελιώσεις της τεχνολογίας αυτής παρουσιάστηκαν σε εμβληματικές εργασίες που όρισαν το πλαίσιο λειτουργίας, τα βασικά μαθηματικά μοντέλα και τις δυνατότητες συνεκτικής ανάκλασης μεγάλου αριθμού στοιχείων [1], [2]. Εκεί τεκμηριώθηκε ότι μια επαναδιαμορφώσιμη μεταεπιφάνεια μπορεί, υπό ιδανικές συνθήκες ευθυγράμμισης φάσεων, να προσφέρει σημαντική ενίσχυση ισχύος στον δέκτη μέσω συλλογικής συμβολής των επιμέρους στοιχείων. Το θεωρητικό όφελος κλιμακώνεται με το πλήθος των στοιχείων και μεταβάλλει δραστικά τη θεώρηση της σχέσης μεταξύ απόστασης, εξασθένισης και ρυθμού μετάδοσης [1], [9].

Παράλληλα, η έννοια των “Smart Radio Environments” επεκτείνει τη συζήτηση πέρα από τη βελτίωση ενός μεμονωμένου συνδέσμου. Το περιβάλλον μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά σε πολλαπλούς χρήστες, να επηρεάζει τη χωρική κατανομή της ισχύος και να συνεργάζεται με ενεργό beamforming από τον σταθμό βάσης [2]. Η IRS, επομένως, δεν είναι απλώς ένα πρόσθετο παθητικό στοιχείο αποτελεί τμήμα μιας ολιστικής αρχιτεκτονικής όπου ο πομπός, ο δέκτης και το περιβάλλον συν-βελτιστοποιούνται.

1.1 Παθητικές, Ημι-Παθητικές και Ενεργές IRS

Η κυρίαρχη μορφή IRS στη βιβλιογραφία είναι η παθητική επαναδιαμορφώσιμη επιφάνεια. Στην υλοποίηση αυτή, κάθε μετα-στοιχείο (meta-atom) επιβάλλει ελεγχόμενη φασική μετατόπιση στο προσπίπτον κύμα, χωρίς να ενισχύει ενεργά το σήμα. Η επιφάνεια δεν διαθέτει



ενισχυτές RF ούτε δικούς της πομποδέκτες απαιτεί μόνο περιορισμένη ισχύ για τον έλεγχο των στοιχείων [1], [9]. Η παθητική φύση συνεπάγεται εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση και απουσία πρόσθετου θερμικού θορύβου, χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί ριζικά τις IRS από τους κλασικούς ενεργούς αναμεταδότες.

Η μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας τους βασίζεται στο άθροισμα των επιμέρους συνεισφορών όλων των στοιχείων. Υπό συνθήκες γραμμικής περιοχής και ιδανικής ευθυγράμμισης φάσεων, η συνολική λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να κλιμακώνεται τετραγωνικά με τον αριθμό των στοιχείων, ένα αποτέλεσμα που έχει αναλυθεί διεξοδικά στη θεμελιώδη βιβλιογραφία [1]. Ωστόσο, η πραγματική απόδοση εξαρτάται από το επίπεδο κβαντοποίησης φάσης, τις απώλειες των στοιχείων και τη γεωμετρία του καναλιού.

Πέραν των πλήρως παθητικών υλοποιήσεων, έχουν προταθεί και ημι-παθητικές ή υβριδικές προσεγγίσεις. Σε αυτές, η επιφάνεια διατηρεί την παθητική ανάκλαση για τη μετάδοση, αλλά ενσωματώνει περιορισμένες δυνατότητες λήψης ή αισθητήρων για την εκτίμηση καναλιού. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η καθαρά παθητική IRS δεν μπορεί να εκτιμήσει άμεσα το BS-IRS και IRS-user κανάλι χωρίς εξωτερική βοήθεια [12]. Προοδευτικές μέθοδοι εκτίμησης καναλιού με διακριτές μετατοπίσεις φάσης και iterative refinement έχουν αναπτυχθεί για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα [12].

Στον αντίποδα, οι ενεργές IRS αποτελούν μια πιο πρόσφατη και αμφιλεγόμενη κατηγορία. Εδώ, τα στοιχεία ενσωματώνουν μικρούς ενισχυτές ή ενεργά κυκλώματα που μπορούν να ενισχύουν το ανακλώμενο σήμα. Αν και η ενεργή ενίσχυση αντισταθμίζει εν μέρει τις απώλειες διπλής διαδρομής, εισάγει κατανάλωση ισχύος και πιθανή προσθήκη θορύβου, προσεγγίζοντας λειτουργικά τις έννοιες των relays. Η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι το όφελος των ενεργών IRS πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά υπό περιορισμούς κατανάλωσης και πολυπλοκότητας [2].

Η ταξινόμια αυτή δεν είναι απλώς τεχνική. Αντανακλά διαφορετικές φιλοσοφίες σχεδιασμού: απόλυτα παθητική τροποποίηση περιβάλλοντος, υβριδική υποβοήθηση με ελάχιστη ενεργή υποστήριξη, έως πλήρη σύγκλιση με ενεργές αναμεταδοτικές αρχιτεκτονικές.

1.2 Σύγκριση IRS με Relays και Massive MIMO

Η σύγκριση των Intelligent Reflecting Surfaces με τις κλασικές τεχνολογίες relaying και massive MIMO αποτελεί κεντρικό ζήτημα στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Συχνά οι IRS περιγράφονται ως “παθητικοί αναμεταδότες”. Ο χαρακτηρισμός αυτός είναι κατανοητός,



αλλά εν μέρει παραπλανητικός. Ένας συμβατικός relay λαμβάνει, αποκωδικοποιεί ή ενισχύει και επανεκπέμπει το σήμα. Εισάγει δικό του θόρυβο, απαιτεί ενεργά RF front-ends και καταναλώνει σημαντική ισχύ. Αντίθετα, μια παθητική IRS δεν εκτελεί καμία ενεργή επεξεργασία σήματος επιβάλλει μόνο ελεγχόμενη φασική μετατόπιση και, σε ορισμένες υλοποιήσεις, περιορισμένη τροποποίηση πλάτους [1], [9].

Η διαφορά αυτή έχει ουσιώδεις επιπτώσεις. Σε relay συστήματα τύπου amplify-and-forward, η διπλή διέλευση του σήματος συνοδεύεται από διπλή προσθήκη θορύβου. Στις IRS, η διπλή διαδρομή δεν συνοδεύεται από επιπλέον θερμικό θόρυβο, γεγονός που οδηγεί σε διαφορετική κλιμάκωση του SNR [1]. Από την άλλη πλευρά, οι relays μπορούν να προσφέρουν ενεργή ενίσχυση, ενώ οι παθητικές IRS περιορίζονται από την παθητική ανακλαστική τους φύση και τις απώλειες διάδοσης.

Η σύγκριση με massive MIMO είναι πιο λεπτή. Στα massive MIMO συστήματα, ο σταθμός βάσης διαθέτει μεγάλο αριθμό ενεργών κεραιών και ελέγχει πλήρως το beamforming μέσω ψηφιακής επεξεργασίας. Το κέρδος προκύπτει από ενεργό διαμόρφωση της εκπεμπόμενης δέσμης. Στις IRS, το beamforming είναι "παθητικό": η επιφάνεια διαμορφώνει το προσπίπτον κύμα που ήδη έχει εκπεμφθεί από τον σταθμό βάσης. Η συνεργασία active και passive beamforming είναι θεμελιώδης και οδηγεί σε μεικτά προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως έχει αναλυθεί σε εργασίες joint resource allocation και passive beamforming [10], [11].

Σημαντική διαφορά έγκειται επίσης στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Massive MIMO απαιτεί μεγάλο αριθμό RF chains, DAC/ADC και επεξεργαστικών μονάδων. Η IRS, εφόσον παραμένει παθητική, απαιτεί μόνο κυκλώματα ελέγχου χαμηλής κατανάλωσης [1], [9]. Αυτό την καθιστά ελκυστική ως συμπληρωματική τεχνολογία και όχι ως αντικατάσταση του massive MIMO. Στην πράξη, οι δύο προσεγγίσεις προτείνονται να λειτουργούν συνεργατικά: ο σταθμός βάσης παρέχει χωρικό βαθμό ελευθερίας μέσω ενεργών κεραιών, ενώ η IRS αναδιαμορφώνει το περιβάλλον ώστε να ενισχύει ή να ανακατευθύνει τη διάδοση [2].

Ωστόσο, η IRS δεν είναι πανάκεια. Έχει επισημανθεί ότι όταν οι χρήστες βρίσκονται σε παρόμοιες γωνιακές θέσεις ως προς την επιφάνεια, η χωρική ιδιοδιάσταση του καναλιού ενδέχεται να είναι περιορισμένη, μειώνοντας τον βαθμό πολυπλεξίας σε multi-user σενάρια [2]. Το ζήτημα αυτό παραμένει ενεργό πεδίο έρευνας, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με OFDMA και QoS περιορισμούς [10], [11].



1.3 IRS ως Coverage Enhancers και Interference Controllers

Ένα από τα πιο σημαντικά επιχειρήματα υπέρ των IRS είναι ότι προσφέρουν βελτιωμένη κάλυψη χωρίς να απαιτείται πυκνωση της πόλης με νέους ενεργούς σταθμούς βάσης. Η ελεγχόμενη ανάκλαση, δηλαδή η δυνατότητα της επιφάνειας να μεταβάλλει την κατεύθυνση των κυμάτων, επιτρέπει επιτόπου παράκαμψη εμποδίων, ενίσχυση σε περιοχές με ελλιπή κάλυψη, καθώς και δυναμική διαμόρφωση της χωρικής κατανομής της ισχύος [9]. Στο πλαίσιο του programmable wireless environment, η βελτίωση δεν προκύπτει από ενίσχυση του πομπού, αλλά από τροποποίηση του ίδιου του περιβάλλοντος διάδοσης [2].

Παρά την, εκ πρώτης όψεως, μη αναμενόμενη φύση της προσέγγισης, η επίδραση είναι περισσότερο αρχιτεκτονική παρά αμιγώς τεχνική. Στα κλασικά κυψελωτά δίκτυα, η κάλυψη βελτιώνεται μέσω πυκνωσης σταθμών βάσης, εγκατάστασης αναμεταδοτών (relays) ή αύξησης της εκπεμπόμενης ισχύος. Κάθε επιλογή συνεπάγεται κόστος εγκατάστασης, αυξημένη κατανάλωση και πολυπλοκότητα στη διαχείριση παρεμβολών. Η IRS, αντιθέτως, λειτουργεί παθητικά εντός του περιβάλλοντος, χωρίς απαίτηση backhaul ή ολοκληρωμένων RF αλυσίδων. Έτσι, η κάλυψη παύει να αποτελεί ζήτημα ισχύος πομποδεκτών και μετατρέπεται σε πρόβλημα γεωμετρίας και χωρικής διαμόρφωσης της διάδοσης [1].

Σε mmWave και υπο-THz ζώνες, όπου ακόμη και ένα επιφανειακά μικρό εμπόδιο μπορεί να διακόψει τη ζεύξη, η ύπαρξη εναλλακτικών διαδρομών στο κανάλι αποκτά κρίσιμη σημασία. Μια προσεκτικά τοποθετημένη επιφάνεια ανακατευθύνει την ενέργεια, αποκαθιστώντας συνδέσεις που διαφορετικά θα θεωρούνταν χαμένες. Η λειτουργία της είναι ανάλογη με αυτή ενός επαναδιαμορφώσιμου ανακλαστήρα: δεν προσθέτει θόρυβο, απλώς αναδιανέμει την υπάρχουσα ενέργεια [9].

Η έννοια του programmable wireless environment υποδηλώνει μια μεταβολή στη φιλοσοφία σχεδιασμού. Το κανάλι παύει να αντιμετωπίζεται ως περιορισμός και αξιοποιείται ως πόρος. Η μεταβαλλόμενη χωρική κατανομή ισχύος, ανάλογα με τη θέση των χρηστών, τις απαιτήσεις QoS ή τον φόρτο, αποτελεί μια ριζική προσέγγιση, η οποία ωστόσο ωριμάζει σταθερά στη βιβλιογραφία [2].

Ένα επιπλέον ζήτημα αφορά τη διαχείριση παρεμβολών. Με κατάλληλη επιλογή φάσεων, η IRS μπορεί ταυτόχρονα να ενισχύει το επιθυμητό σήμα και να αποδυναμώνει επιλεγμένες κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό έχει μελετηθεί σε σενάρια SWIPT IoT, όπου το beamforming βελτιστοποιεί ταυτόχρονα ρυθμό μετάδοσης και ενεργειακή απόδοση [3].



Ανάλογα ευρήματα προκύπτουν σε multi-user διατάξεις με αυστηρά κριτήρια QoS, οι οποίες συνήθως διατυπώνονται σε δύο χρονικές κλίμακες βελτιστοποίησης [11]. Η IRS δεν αίρει το σύνολο των περιορισμών παρεμβολών, μειώνει ωστόσο σημαντικά το ενεργειακό bottleneck που συχνά περιορίζει τις επιδόσεις.

Σε πυκνά αστικά πεδία το SINR γίνεται πιο σημαντικό. Μια IRS στρέφει την ακτινοβολία εκεί ακριβώς που χρειάζεται, αφήνοντας τα υπόλοιπα κελιά ήσυχα. Το ωραίο είναι ότι αυτό συμβαίνει χωρίς αύξηση της συνολικής ισχύος. Συν-βελτιστοποίηση ενεργού-παθητικού beamforming; Ναι, περίπλοκη, αλλά οι μελέτες δείχνουν ότι δουλεύει [11].

Σε προοπτικές ανάπτυξης 5G, 6G και επόμενων γενεών, η χωρική επαναχρησιμοποίηση φάσματος αποκτά καθοριστική σημασία. Όταν χρήστες που γειτνιάζουν εξυπηρετούνται από διαφορετικούς σταθμούς, μια IRS μπορεί να ευνοήσει μια συγκεκριμένη σύνδεση, μειώνοντας τη χωρική διαρροή προς γειτονικές κατευθύνσεις και περιορίζοντας την ανάγκη για περίπλοκο συντονισμό μεταξύ κυψελών.

Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η διαφάνεια ως προς τα τερματικά. Οι επιφάνειες ενσωματώνονται παθητικά στη δομή του δικτύου, χωρίς να απαιτείται από τον χρήστη αναβάθμιση εξοπλισμού ή υιοθέτηση νέου πρωτοκόλλου. Από τη σκοπιά του δέκτη, η μόνη εμφανής επίπτωση είναι η βελτίωση των συνθηκών καναλιού. Αυτή η μη επεμβατική υιοθέτηση καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική [1], [4].

Όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, μια παθητική IRS προσφέρει υψηλότερο SINR χωρίς πρόσθετη κατανάλωση από ενεργές RF αλυσίδες. Σε σενάρια όπου το όριο εκπεμπόμενης ισχύος αποτελεί ρυθμιστικό περιορισμό για λόγους υγείας ή περιβαλλοντικής πολιτικής, η τροποποίηση του περιβάλλοντος διάδοσης αντί της αύξησης ισχύος του πομπού αποτελεί προφανή σχεδιαστική επιλογή.

Δεν θα επιμείνω, αλλά αξίζει να αναφερθεί: η εστιασμένη ενίσχυση αυξάνει και τη φυσική ασφάλεια. Λιγότερη χωρική διαρροή σημαίνει μικρότερη πιθανότητα υποκλοπής χώρια που το περιβάλλον γίνεται κάνει το κρυφτό λίγο πιο δύσκολο για τους ακούσιους ακροατές.

Συνολικά, οι IRS μετατρέπουν τη διαχείριση κάλυψης και παρεμβολών από παθητική αντιμετώπιση τυχαίων φαινομένων σε ενεργό, γεωμετρικό σχεδιασμό. Δεν αντικαθιστούν τις τεχνικές massive MIMO ούτε τους αλγορίθμους κατανομής πόρων, αλλά λειτουργούν συμπληρωματικά, ως εργαλείο χαμηλού κόστους και υψηλής ευελιξίας [1], [2], [4]. Η ουσιαστικότερη συνεισφορά τους δεν περιορίζεται στα dB κέρδους, αλλά εκτείνεται στη



δυνατότητα συστηματικής χαρτογράφησης και αναδιαμόρφωσης του ραδιοπεριβάλλοντος ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου.

1.4 Εκτίμηση Καναλιού και Αλγοριθμικές Προσεγγίσεις

Η λειτουργική αξιοποίηση των IRS εξαρτάται κρίσιμα από την εκτίμηση καναλιού. Σε αντίθεση με τα massive MIMO, όπου οι ενεργές κεραίες επιτρέπουν άμεση μέτρηση CSI, η παθητική IRS δεν διαθέτει RF chains για παρατήρηση του σήματος. Το πρόβλημα εκτίμησης του διπλού καναλιού (BS-IRS και IRS-user) είναι ιδιαίτερα απαιτητικό.

Η δυσκολία προκύπτει από το γεγονός ότι η IRS παρεμβάλλεται παθητικά μεταξύ πομπού και δέκτη. Δεν διαθέτει δυνατότητα τοπικής μέτρησης του σήματος για υπολογισμό του καναλιού ούτε μπορεί να μεταδώσει πιλότους με την κλασική έννοια. Συνεπώς, η εκτίμηση γίνεται έμμεσα, μέσω συντονισμένων μεταβολών της επιφάνειας και παρατηρήσεων στο άκρο της ζεύξης. Η διαδικασία αυτή αυξάνει σημαντικά το training overhead, ιδιαίτερα όταν ο αριθμός των στοιχείων N είναι μεγάλος, καθώς οι άγνωστοι συντελεστές κλιμακώνονται αναλογικά με το μέγεθος της επιφάνειας [12].

Προοδευτικές τεχνικές εκτίμησης με διακριτές μετατοπίσεις φάσης και iterative refinement έχουν παρουσιαστεί για να αντιμετωπίσουν τη διακριτή φύση των στοιχείων [12]. Η βασική ιδέα είναι ότι η IRS εφαρμόζει διαδοχικά γνωστά πρότυπα φάσεων, επιτρέποντας στον σταθμό βάσης ή στον χρήστη να εκτιμήσει το ισοδύναμο κανάλι από τη μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος. Με επαναληπτική βελτίωση, η εκτίμηση συγκλίνει σε αποδεκτή ακρίβεια, χωρίς να απαιτείται πλήρης εξαντλητική σάρωση όλων των πιθανών συνδυασμών.

Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή αντιμετωπίζει περιορισμούς σε σενάρια μεγάλης κλίμακας. Όταν N είναι της τάξης εκατοντάδων ή χιλιάδων στοιχείων, η πλήρης εκτίμηση καθίσταται χρονικά δαπανηρή. Ιδίως σε περιβάλλοντα με κινητικότητα, όπου το κανάλι μεταβάλλεται γρήγορα, η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται συχνά. Αυτό δημιουργεί μια ένταση μεταξύ ακρίβειας εκτίμησης και καθυστέρησης προσαρμογής.

Σε mmWave περιβάλλοντα, όπου το κανάλι χαρακτηρίζεται από αραιή δομή στο γωνιακό πεδίο, έχουν προταθεί μέθοδοι συμπιεσμένης εκτίμησης καναλιού με υποβοήθηση βαθιών νευρωνικών δικτύων, μειώνοντας το overhead εκπαίδευσης [5]. Οι μέθοδοι αυτές εκμεταλλεύονται τη χαμηλή διάσταση του καναλιού και τη δομή sparsity, επιτρέποντας ανακατασκευή του καναλιού με περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Η χρήση deep denoising



architectures βελτιώνει περαιτέρω την ανθεκτικότητα σε θόρυβο και ατελείς μετρήσεις, καθιστώντας τη διαδικασία πιο πρακτική σε υψηλές συχνότητες.

Στο επίπεδο βελτιστοποίησης, τα προβλήματα joint active-passive beamforming διατυπώνονται ως μη κυρτά προβλήματα με διακριτές μεταβλητές. Οι φάσεις της IRS είναι συχνά περιορισμένες σε συγκεκριμένα επίπεδα ποσοτικοποίησης, γεγονός που εισάγει συνδυαστική πολυπλοκότητα. Η από κοινού βελτιστοποίηση με τους ενεργούς συντελεστές εκπομπής του σταθμού βάσης οδηγεί σε μεικτά προβλήματα συνεχών και διακριτών μεταβλητών, τα οποία δεν επιλύονται αναλυτικά.

Προσεγγίσεις δύο χρονικών κλιμάκων (two-timescale optimization) έχουν προταθεί για multi-user περιβάλλοντα με QoS περιορισμούς, επιτυγχάνοντας πρακτική σύγκλιση χωρίς εξαντλητική αναζήτηση [11]. Η βασική ιδέα είναι ότι οι μεταβλητές που αλλάζουν αργά, όπως οι φάσεις της IRS, ενημερώνονται σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, ενώ οι ενεργές μεταβλητές του σταθμού βάσης προσαρμόζονται ταχύτερα. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το υπολογιστικό κόστος και επιτυγχάνεται ρεαλιστική υλοποίηση σε πραγματικά δίκτυα.

Παράλληλα, η βιβλιογραφία έχει εξετάσει τη συμπερίληψη ατελειών υλικού πομποδέκτη, επιδεικνύοντας ότι η απόδοση IRS επηρεάζεται σημαντικά από μη ιδανικές RF αλυσίδες [8]. Οι παραμορφώσεις φάσης, οι μη γραμμικότητες και τα σφάλματα συγχρονισμού μπορούν να περιορίσουν το θεωρητικό κέρδος. Συνεπώς, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης πρέπει να λαμβάνουν υπόψη ρεαλιστικά μοντέλα υλικού και όχι ιδανικές υποθέσεις.

Σε πολυχρηστικά περιβάλλοντα OFDMA, η από κοινού κατανομή πόρων και παθητικό beamforming απαιτεί ολοκληρωμένη αντιμετώπιση τόσο στο πεδίο συχνότητας όσο και στο πεδίο χώρου [10]. Η βελτιστοποίηση δεν περιορίζεται πλέον στη χωρική φάση της IRS, αλλά επεκτείνεται σε κατανομή υποφερόντων, ισχύος και χρονικών πόρων. Αυτό ενισχύει τον διατομεακό χαρακτήρα του προβλήματος, το οποίο συνδυάζει φυσικό επίπεδο και διαχείριση πόρων.

Η σύγχρονη τάση δείχνει προς την ενσωμάτωση μηχανικής μάθησης για ταχεία προσαρμογή, ιδιαίτερα σε δυναμικά περιβάλλοντα, αν και η πλήρης αντικατάσταση αναλυτικών μεθόδων παραμένει ανοιχτό ερευνητικό ερώτημα [4], [5]. Η ενισχυτική μάθηση και τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να μάθουν αντιστοιχίσεις μεταξύ καταστάσεων καναλιού και βέλτιστων ρυθμίσεων φάσης, μειώνοντας τον χρόνο υπολογισμού. Ωστόσο, η ανάγκη για μεγάλο όγκο δεδομένων εκπαίδευσης και η περιορισμένη ερμηνευσιμότητα των μοντέλων δημιουργούν νέα ζητήματα.



Η εκτίμηση καναλιού και η βελτιστοποίηση σε συστήματα IRS συνιστούν κεντρικό ερευνητικό πεδίο. Η πρόκληση δεν έγκειται μόνο στην επίτευξη υψηλού SNR ή throughput, αλλά στην επίτευξη αυτών των στόχων με περιορισμένο overhead, ρεαλιστικά μοντέλα υλικού και δυνατότητα προσαρμογής σε πραγματικό χρόνο. Καθώς τα μεγέθη των επιφανειών αυξάνονται και τα δίκτυα γίνονται πιο δυναμικά, η αλγοριθμική αποδοτικότητα και η κλιμάκωση καθίστανται εξίσου σημαντικές με το θεωρητικό κέρδος απόδοσης.

1.5 IRS σε Δορυφορικά και IoT Συστήματα

Η αξιοποίηση μη επίγειων υποδομών δεν αποτελεί νέα ιδέα. Η παθητική αναδιαμόρφωση που εισάγουν οι Intelligent Reflecting Surfaces, ωστόσο, διαφοροποιεί ορισμένες από τις βασικές παραδοχές των σχετικών σχεδιασμών.

Σε δορυφορικές uplink ζεύξεις, όπου το σήμα υφίσταται σημαντική εξασθένιση ελεύθερου χώρου πριν φτάσει στον δορυφόρο, μια επίγεια IRS μπορεί να λειτουργήσει ως παθητικός ενδιάμεσος κόμβος. Δεν εκπέμπει νέο σήμα, αλλά ανακατευθύνει το υπάρχον. Το αποτέλεσμα είναι η προσθήκη μερικών dB SNR στον δορυφορικό δέκτη, ικανών να διατηρήσουν τη λειτουργικότητα μιας οριακής ζεύξης [6]. Η βελτίωση είναι ποσοτικά περιορισμένη, αλλά σε συνθήκες οριακής λειτουργίας μπορεί να αποδειχθεί καθοριστική.

Στις εφαρμογές Internet of Things η κλίμακα διαφέρει σημαντικά. Οι αισθητήρες λειτουργούν με αυστηρά περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα και η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης είναι κρίσιμη. Η παρουσία μιας IRS κοντά σε αυτούς επιτρέπει μετάδοση με μικρότερη ισχύ και αντίστοιχη επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Σε σενάρια SWIPT, όπου ταυτόχρονα μεταφέρονται πληροφορία και ενέργεια, η ανακλαστική δέσμη επιτελεί διπλό ρόλο: βελτιώνει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και αυξάνει την ενέργεια που φτάνει στους συλλέκτες [3]. Με τον τρόπο αυτό, η τεχνολογία αποκτά διπλή χρησιμότητα, τόσο τηλεπικοινωνιακή όσο και ενεργειακή.

Στη συνέχεια εξετάζονται τα non-terrestrial networks, δηλαδή υβριδικά οικοσυστήματα όπου επίγειες κυψέλες, δορυφόροι LEO και πλατφόρμες υψηλής τροχιάς συνυπάρχουν. Σε τέτοιες ετερογενείς αρχιτεκτονικές, οι IRS μπορούν να λειτουργήσουν ως ευέλικτοι κόμβοι που εξασφαλίζουν συνεκτικότητα μεταξύ επίγειου και διαστημικού τμήματος. Τα πρώτα αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν σημαντική βελτίωση τόσο της κάλυψης όσο και της φασματικής αποδοτικότητας [2], [6]. Παρότι η έρευνα βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο, κυρίως θεωρητικό στάδιο, η κατεύθυνση αξιολογείται ως ιδιαίτερα ελπιδοφόρα.



Η ανάπτυξη αυτή υποδεικνύει ότι οι δυνατότητες των IRS εκτείνονται πέρα από τα όρια των κλασικών κεραιών και ενσύρματων διασυνδέσεων. Οι IRS επεκτείνουν την έννοια της προγραμματιζόμενης επιφάνειας σε χώρους όπου οι κλασικές τεχνικές παρουσιάζουν εγγενείς περιορισμούς, όπως οι δορυφορικές επικοινωνίες και οι συσκευές πολύ χαμηλής ισχύος. Το πεδίο αυτό ανοίγει νέες ερευνητικές κατευθύνσεις, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις αλλά και αξιόλογες δυνατότητες.

1.6 Προκλήσεις Υλοποίησης και Ρεαλιστικοί Περιορισμοί

Παρά τα εντυπωσιακά θεωρητικά αποτελέσματα, η μετάβαση από το ιδανικό μοντέλο στην πρακτική υλοποίηση συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις.

Πρώτον, οι απώλειες υλικού και οι μη ιδανικότητες των μεταϋλικών στοιχείων περιορίζουν την ιδανική “τετραγωνική” κλιμάκωση κέρδους με το πλήθος των στοιχείων. Η ύπαρξη ατελειών πομποδέκτη και μη γραμμικοτήτων μπορεί να μειώσει την πραγματική απόδοση σε σύγκριση με τις θεωρητικές προβλέψεις [8]. Η επίδραση hardware impairments δεν είναι αμελητέα, ιδιαίτερα σε mmWave ζώνες.

Δεύτερον, η εκτίμηση καναλιού παραμένει κομβικό πρόβλημα. Αν και έχουν προταθεί τεχνικές προοδευτικής εκτίμησης με διακριτές φάσεις [12] και μέθοδοι βασισμένες σε βαθιά νευρωνικά δίκτυα για mmWave περιβάλλοντα [5], το overhead εκπαίδευσης αυξάνεται σημαντικά με τον αριθμό στοιχείων. Σε πολύ μεγάλες επιφάνειες, η κλιμάκωση γίνεται πρακτικά δύσκολη.

Τρίτον, η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ γειτονικών στοιχείων (mutual coupling) και τα φαινόμενα κοντινού πεδίου σε μεγάλες επιφάνειες δεν αποτυπώνονται πλήρως σε απλά στατιστικά μοντέλα καναλιού. Η ανάγκη ενοποίησης της θεωρίας πληροφορίας με τη φυσική των Maxwell εξισώσεων έχει επισημανθεί ως απαραίτητη για τη θεμελιώδη κατανόηση των IRS [2], [7]. Η προσέγγιση αυτή μετακινεί τη συζήτηση από απλές αναλογίες “έξυπνου καθρέφτη” σε αυστηρά φυσικά μοντέλα διάδοσης.

Τέλος, το ζήτημα κλιμάκωσης σε χιλιάδες στοιχεία εγείρει τόσο αλγοριθμικά όσο και αρχιτεκτονικά ερωτήματα. Οι two-timescale βελτιστοποιήσεις [11] και οι joint resource allocation τεχνικές [10] προσφέρουν υποσχόμενες κατευθύνσεις, αλλά η πρακτική ενσωμάτωσή τους σε πραγματικό χρόνο παραμένει ανοιχτό ζήτημα.



2. Ορισμός και Βασικές Αρχές των IRS

Οι Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες (Intelligent Reflecting Surfaces IRS) όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 1 ορίζονται στη σύγχρονη βιβλιογραφία ως προγραμματιζόμενες μεταεπιφάνειες αποτελούμενες από μεγάλο πλήθος παθητικών μεταϋλικών στοιχείων (meta-atoms), τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν ελεγχόμενα τη φάση και σε ορισμένες υλοποιήσεις το πλάτος των προσπίπτοντων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [1], [2], [6]. Κάθε στοιχείο της επιφάνειας λειτουργεί σαν ένας μικροσκοπικός, ρυθμιζόμενος ανακλαστήρας. Το σύνολο αυτών των στοιχείων, όταν ελέγχεται συντονισμένα, δεν συμπεριφέρεται ως μια απλή επιφάνεια ανάκλασης, αλλά ως ένα **συλλογικό σύστημα παθητικού beamforming**, ικανό να κατευθύνει, να εστιάζει ή να αποδυναμώνει τα ανακλώμενα σήματα προς επιθυμημένες ή ανεπιθύμητες κατευθύνσεις αντίστοιχα [2], [8].

Η λειτουργία μιας IRS παρομοιάζεται συχνά με αυτή ενός υψηλής τεχνολογίας ανακλαστήρα. Εντούτοις, σε αντίθεση με έναν συμβατικό καθρέφτη που ανακλά το κύμα με τρόπο γεωμετρικά καθορισμένο, η IRS μπορεί να διαμορφώσει δυναμικά το μέτωπο κύματος. Μέσω κατάλληλης ρύθμισης των φάσεων των επιμέρους στοιχείων, τα ανακλώμενα κύματα συμβάλλουν συμφασικά σε επιθυμητές κατευθύνσεις και αντισταθμίζονται σε ανεπιθύμητες. Έτσι, η IRS μπορεί να λειτουργήσει ως ένα παθητικό beamformer, υλοποιώντας στόχευση



παρόμοια με αυτή των ενεργών συστοιχιών κεραιών, χωρίς όμως απαίτηση ενεργών RF αλυσίδων ή ενισχυτών ισχύος [1], [6].

Κεντρική αρχή λειτουργίας των IRS είναι η δυνατότητα δημιουργίας ενός **εικονικού καναλιού οπτικής επαφής (virtual Line-of-Sight, LoS)** μεταξύ πομπού και δέκτη. Σε περιπτώσεις όπου η άμεση οπτική επαφή παρεμποδίζεται από φυσικά εμπόδια τοίχους, κτίρια, μεταλλικές κατασκευές μια κατάλληλα τοποθετημένη IRS μπορεί να ανακλά το σήμα με τέτοιο τρόπο ώστε να παρακάμπτει το εμπόδιο και να δημιουργεί μια εναλλακτική διαδρομή διάδοσης υψηλής ποιότητας [1], [6]. Με αυτόν τον μηχανισμό αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά οι «νεκρές ζώνες» κάλυψης, ένα από τα πιο επίμονα προβλήματα των ασύρματων δικτύων, ιδίως σε αστικά και εσωτερικά περιβάλλοντα.

Εξίσου σημαντική είναι η δυνατότητα των IRS να λειτουργούν ως **παθητικοί διαμορφωτές παρεμβολών**. Μέσω κατάλληλης ρύθμισης της φάσης, τα ανακλώμενα σήματα μπορούν να συγχρονιστούν αντίθετα με ανεπιθύμητες συνιστώσες παρεμβολής, προκαλώντας καταστροφική συμβολή και βελτιώνοντας τον λόγο σήματος προς παρεμβολή (SINR) [2], [9]. Η ιδιαιτερότητα εδώ είναι ότι αυτή η βελτίωση επιτυγχάνεται χωρίς ενεργή ενίσχυση του σήματος.

Πράγματι, ένα από τα πιο θεμελιώδη χαρακτηριστικά των IRS είναι η **παθητική φύση** τους. Τα στοιχεία της επιφάνειας δεν εκπέμπουν νέα ηλεκτρομαγνητική ισχύ, αλλά ανακατευθύνουν την ήδη υπάρχουσα. Αυτό σημαίνει ότι δεν εισάγεται πρόσθετος θερμικός θόρυβος στο σύστημα, όπως θα συνέβαινε σε έναν ενεργό αναμεταδότη ή ενισχυτή. Επιπλέον, λόγω αυτής της παθητικής λειτουργίας, μια IRS μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά σε καθεστώς full-duplex, αντανakλώντας ταυτόχρονα σήματα χωρίς τον κίνδυνο αυτο-παρεμβολής που εμφανίζεται στα ενεργά συστήματα [1], [6].

Συνολικά, η IRS μετασχηματίζει το ασύρματο περιβάλλον από ανεξέλεγκτο παράγοντα σε ένα συνεργατικό και προγραμματιζόμενο τμήμα του δικτύου. Η διάδοση του σήματος δεν αφήνεται πλέον τυχαία στον χώρο, αλλά κατευθύνεται με ακρίβεια. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση μεγάλων IRS μπορεί να αυξήσει σημαντικά την κάλυψη και τη φασματική αποδοτικότητα, καθώς και να μειώσει την απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ σε σχέση με δίκτυα χωρίς IRS [3], [6].

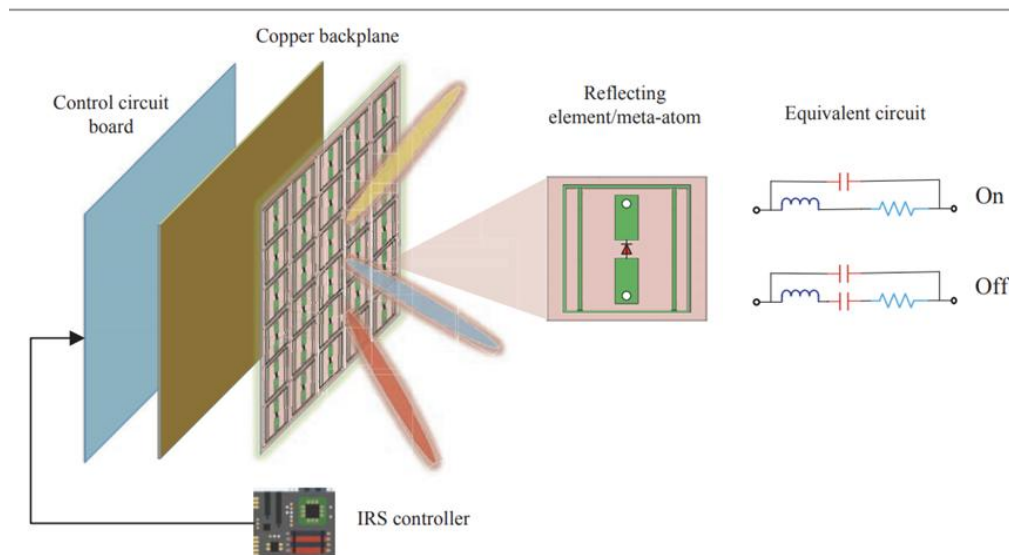
Με αυτή την έννοια, οι Intelligent Reflecting Surfaces δεν αποτελούν απλώς μια συμπληρωματική τεχνολογία. Αντιπροσωπεύουν μια νέα φιλοσοφία σχεδιασμού, όπου το ίδιο



το περιβάλλον γίνεται εργαλείο επικοινωνίας, συμπληρώνοντας τεχνολογίες όπως το massive MIMO και τα relays με έναν πιο οικονομικό, ενεργειακά αποδοτικό και εξαιρετικά ευέλικτο τρόπο [2], [8].

3. Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Πεδία Μελέτης της Τεχνολογίας IRS

Η τεχνολογία των Intelligent Reflecting Surfaces αναπτύσσεται σε ένα ευρύ διεπιστημονικό πεδίο. Από τη μία πλευρά εδράζεται στη φυσική των μεταλλικών και στη λεπτομερή περιγραφή της αλληλεπίδρασης κύματος–επιφάνειας. Από την άλλη, εντάσσεται στη θεωρία και την αρχιτεκτονική των ασύρματων δικτύων, όπου το ζητούμενο δεν είναι μόνο η διάδοση του σήματος, αλλά η οικονομική, αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική μετάδοσή του. Με τον τρόπο αυτό, η IRS παρουσιάζεται ως τεχνολογία που δεν βελτιώνει απλώς έναν σύνδεσμο επικοινωνίας, αλλά μεταβάλλει το ίδιο το υπόβαθρο εντός του οποίου ο σύνδεσμος αυτός λειτουργεί: το ραδιοπεριβάλλον καθίσταται ρυθμιζόμενο και, σε κάποιο βαθμό, προγραμματιζόμενο [2], [6].



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής μιας Intelligent Reflecting Surface. Κάθε IRS αποτελείται από μια διάταξη πολλών επαναδιαμορφώσιμων ανακλαστικών στοιχείων (meta-atoms) σε ένα επίπεδο υπόστρωμα, με ένα μεταλλικό έδαφος (ground plane) από πίσω για την αποφυγή διαφυγής ενέργειας, και ένα εσωτερικό στρώμα ελέγχου που ρυθμίζει ηλεκτρονικά τη φάση/πλάτος κάθε στοιχείου. Ένας εξωτερικός ελεγκτής (π.χ. FPGA) διασυνδέεται με την IRS και επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης, στέλνοντας τις κατάλληλες εντολές ρύθμισης των στοιχείων.

Η βιβλιογραφία αντιμετωπίζει την IRS ως γέφυρα μεταξύ δύο επιπέδων. Το πρώτο είναι το ηλεκτρομαγνητικό, όπου η γεωμετρία, η διάταξη και τα υλικά των μεταλλικών στοιχείων καθορίζουν την απόκριση της επιφάνειας. Το δεύτερο είναι το δικτυακό, όπου η ηλεκτρομαγνητική απόκριση πρέπει να μεταφραστεί σε κέρδος κάλυψης, αύξηση SINR, μείωση παρεμβολών και, εν τέλει, βελτίωση φασματικής και ενεργειακής αποδοτικότητας [1], [9]. Η αντιστοίχιση μεταξύ των δύο επιπέδων δεν είναι πάντοτε άμεση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι φυσικές δυνατότητες της επιφάνειας υπερβαίνουν αυτά που επιτρέπει το σύστημα ελέγχου ή η διαθέσιμη πληροφορία καναλιού. Σε αυτό ακριβώς το σημείο εντοπίζεται και το βασικό ερευνητικό ενδιαφέρον.

3.1 Μεταλλικά Στοιχεία και Αρχιτεκτονική IRS

Κεντρική στην τεχνολογία IRS είναι η έννοια της μεταεπιφάνειας. Πρόκειται για μια διδιάστατη διάταξη από meta-atoms, στοιχεία με διαστάσεις πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος, σχεδιασμένα ώστε να επιβάλλουν συγκεκριμένη μεταβολή φάσης και, σε ορισμένες υλοποιήσεις, πλάτους στο ανακλώμενο κύμα [1], [4]. Κάθε meta-atom λειτουργεί ως μικρός ανακλαστήρας ο οποίος δεν είναι παθητικός με την έννοια του αδρανούς αντικειμένου, αλλά



παθητικός υπό την έννοια ότι δεν παράγει νέα ισχύ. Παρ' όλα αυτά μπορεί να κατευθύνει την ήδη υπάρχουσα ενέργεια, διάκριση λεπτή αλλά κρίσιμη [6].

Η φυσική δομή μιας IRS περιλαμβάνει συνήθως ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα πάνω στο οποίο χαράσσονται μεταλλικές μικροδομές, όπως patches ή δακτυλιοειδείς σχηματισμοί, και ένα μεταλλικό επίπεδο γείωσης (ground plane) στην πίσω πλευρά, ώστε να αποφεύγεται η διαφυγή ενέργειας και να διασφαλίζεται ότι η κύρια αλληλεπίδραση θα εκδηλώνεται ως ελεγχόμενη ανάκλαση. Ο ακριβής σχεδιασμός της γεωμετρίας των στοιχείων, η περιοδικότητα και η διάταξή τους, ακόμη και η επιλογή υλικών, καθορίζουν τον συντελεστή ανάκλασης και τη φασική καθυστέρηση που μπορεί να επιβληθεί τοπικά στο κύμα [2], [6]. Με άλλα λόγια, το «τι μπορεί να κάνει» μια IRS ξεκινά από το υλικό και τη μικροδομή της, όχι από το software. Το software έρχεται μετά, με τις δικές του χαρές και περιορισμούς.

Η δυνατότητα δυναμικής αναδιαμόρφωσης της IRS προκύπτει από την ηλεκτρονική ρύθμιση κάθε στοιχείου. Κάθε meta-atom συνδέεται με ηλεκτρονικά ελεγχόμενα στοιχεία, όπως διόδους PIN, τρανζίστορ FET ή διακόπτες MEMS, τα οποία επιτρέπουν μεταβολή της ηλεκτρικής κατάστασης του στοιχείου και, συνεπώς, ρύθμιση της φάσης ανάκλασης μέσω ηλεκτρικής εντολής [6], [8]. Ένας κεντρικός ελεγκτής, συχνά υλοποιημένος σε FPGA ή μικροεπεξεργαστή, λαμβάνει την απαραίτητη πληροφορία από το δίκτυο, άμεσα ή έμμεσα, και αποστέλλει τις αντίστοιχες εντολές ρύθμισης. Στο σημείο αυτό εντοπίζεται ένα πρακτικό ερευνητικό ερώτημα που επανέρχεται στη βιβλιογραφία: πόσο γρήγορη και ακριβής μπορεί να είναι η διαδικασία ελέγχου και ποιο είναι το αντίστοιχο κόστος σε σηματοδοσία και υπολογιστική πολυπλοκότητα κατά την προσαρμογή της επιφάνειας στις μεταβολές του καναλιού [8], [9].

Η αρχιτεκτονική αυτή οδηγεί σε ένα σύστημα λεπτό, ελαφρύ και ευέλικτο, δυνάμενο να ενσωματωθεί σε τοίχους, οροφές ή προσόψεις κτιρίων με χαμηλή επεμβατικότητα. Καθώς η IRS δεν διαθέτει ενεργές RF αλυσίδες ή ενισχυτές, η κατανάλωση ισχύος περιορίζεται κυρίως στα κυκλώματα ελέγχου και στη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων. Το αποτέλεσμα είναι το γνωστό C-SWaP πλεονέκτημα (Cost, Size, Weight and Power), το οποίο καθιστά την τεχνολογία ελκυστική για ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας σε πυκνά δίκτυα [2], [6]. Στο σημείο αυτό αξίζει να επισημανθεί ότι, ενώ η εξέλιξη των δικτύων βασιζόταν παραδοσιακά στην πύκνωση ενεργής υποδομής, οι IRS προτείνουν αύξηση της πυκνότητας χωρίς αντίστοιχη αύξηση της ενεργής ισχύος.

Παράλληλα, και ίσως αναπόφευκτα, η έρευνα έχει κινηθεί και προς ενεργές ή υβριδικές μορφές IRS. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, κάθε στοιχείο ή ομάδες στοιχείων μπορούν να



περιλαμβάνουν ενισχυτές, επιτρέποντας όχι μόνο ανακατεύθυνση αλλά και ενίσχυση, με στόχο την αντιμετώπιση της απώλειας διαδρομής σε συνθήκες πολλαπλών ανακλάσεων ή μεγάλων αποστάσεων. Το κέρδος μπορεί να είναι σημαντικό σε ορισμένα σενάρια, όμως το τίμημα είναι σαφές: αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, υψηλότερη πολυπλοκότητα και επανεμφάνιση προβλημάτων που οι παθητικές IRS απέφευγαν, όπως ο πρόσθετος θόρυβος λόγω ενεργών στοιχείων [3]. Γι' αυτό, στη βιβλιογραφία, η παθητική IRS παραμένει το κυρίαρχο σημείο αναφοράς, ενώ οι ενεργές προσεγγίσεις εμφανίζονται περισσότερο ως ειδικές λύσεις για απαιτητικά σενάρια.

Συνολικά, η αρχιτεκτονική των IRS δεν αποτελεί απλώς κατασκευή από μεταλλικά patches και έναν ελεγκτή FPGA. Συνιστά μια γενικότερη ιδέα: ότι το περιβάλλον διάδοσης, το οποίο μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν δεδομένο, μπορεί πλέον να αντιμετωπιστεί ως σχεδιάσιμο μέγεθος. Η προσέγγιση αυτή, ενώ αρχικά εμφανιζόταν ως ριζοσπαστική, αποτελεί σήμερα ώριμη ερευνητική κατεύθυνση με σαφή μαθηματική και τεχνολογική βάση [1], [2].

3.2 Δυναμική Ρύθμιση Φάσης και Πλάτους

Ο βασικός μηχανισμός με τον οποίο μια IRS παρεμβαίνει ενεργά στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι η ρυθμιζόμενη φάση ανάκλασης σε επίπεδο στοιχείου. Κάθε meta-atom, μέσω ενός ηλεκτρονικά ελεγχόμενου στοιχείου (όπως PIN diode ή MEMS), μπορεί να επιβάλει μια μεταβολή φάσης στο ανακλώμενο κύμα. Θεωρητικά, αυτή η μεταβολή μπορεί να καλύπτει ολόκληρο το εύρος από 0° έως 360° , ενώ στην πράξη συχνά υλοποιείται σε διακριτά επίπεδα, ανάλογα με την ανάλυση ποσοτικοποίησης της επιφάνειας [1], [6], [8].

Ο στόχος είναι να ρυθμιστούν οι φάσεις των N στοιχείων έτσι ώστε τα ανακλώμενα κύματα να φτάνουν στον επιθυμητό δέκτη ευθυγραμμισμένα, επιτυγχάνοντας εποικοδομητική συμβολή. Σε ιδανικές συνθήκες, η ισχύς στο δέκτη μπορεί να αυξάνεται προσεγγιστικά με N^2 (square-law), καθώς προκύπτει τόσο κέρδος συνεκτικής πρόσθεσης όσο και αύξηση της αποτελεσματικής επιφάνειας συλλογής σήματος [6]. Παρότι αυτή η θεωρητική συμπεριφορά δεν επιτυγχάνεται πλήρως σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα, εξηγεί γιατί οι IRS μπορούν να προσφέρουν εντυπωσιακά κέρδη με καθαρά παθητικό τρόπο.

Στην πράξη, οι περιορισμοί της υλοποίησης εμφανίζονται άμεσα. Οι περισσότερες IRS διαθέτουν διακριτά επίπεδα φάσης, συχνά 1-bit (0° ή 180°) ή λίγα bits (4–8 στάθμες), ώστε να διατηρείται χαμηλό το κόστος και η κατανάλωση [1], [6]. Παρότι η ποσοτικοποίηση αυτή αποκλίνει από το ιδανικό, έχει δειχθεί ότι μεγάλο μέρος του θεωρητικού οφέλους παραμένει,



εφόσον χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αλγόριθμοι που επιλύουν το πρόβλημα για συνεχείς φάσεις και στη συνέχεια προσαρμόζουν τις τιμές στα διαθέσιμα επίπεδα [8], [9].

Πέρα από τη φάση, ορισμένες μεταεπιφάνειες επιτρέπουν και έλεγχο του πλάτους ανάκλασης. Αν και στα περισσότερα σενάρια η επιθυμητή επιλογή είναι η μέγιστη ανακλαστικότητα όλων των στοιχείων, ο έλεγχος πλάτους γίνεται ιδιαίτερα χρήσιμος σε περιπτώσεις ακύρωσης παρεμβολών. Μέσω επιλεκτικής μείωσης της συνεισφοράς ορισμένων στοιχείων, η IRS μπορεί να επιτύχει ακριβέστερη καταστροφική συμβολή προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις, χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά το κύριο σήμα [2], [9].

Η δυνατότητα αυτή δίνει στις IRS τη δύναμη να διαμορφώνουν το μέτωπο κύματος με τρόπους που ξεπερνούν το κλασικό beamforming. Μπορούν να εστιάσουν ενέργεια σε συγκεκριμένο σημείο (σημαντικό σε εφαρμογές SWIPT) [7], να δημιουργήσουν πολλαπλούς λοβούς για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ή να προσαρμόζονται σε πολυπλεξιακά σενάρια όπως το OFDMA, όπου η κατανομή πόρων και το passive beamforming πρέπει να συν-σχεδιάζονται [11]. Η ανάκλαση παύει να είναι στατικό φαινόμενο και γίνεται ενεργό εργαλείο ελέγχου του καναλιού.

3.3 Έλεγχος, Συντονισμός και Ενσωμάτωση στο Δίκτυο

Η λειτουργία μιας IRS δεν είναι αυτόνομη. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται άμεσα από τον συντονισμό με τον σταθμό βάσης και τους χρήστες. Ο ελεγκτής της IRS χρειάζεται πληροφορία για το κανάλι ώστε να υπολογίσει τις κατάλληλες ρυθμίσεις φάσης για τα στοιχεία. Εδώ εμφανίζεται μια από τις βασικές ερευνητικές προκλήσεις: η εκτίμηση καναλιού (CSI) σε ένα σύστημα όπου η IRS παρεμβάλλεται παθητικά μεταξύ πομπού και δέκτη [2], [8].

Σε ένα IRS-υποβοηθούμενο κανάλι, η διάδοση περιλαμβάνει δύο τμήματα: το κανάλι BS-IRS και το κανάλι IRS-χρήστη. Επειδή η IRS δεν διαθέτει τυπικό πομποδέκτη, δεν μπορεί από μόνη της να μετρήσει το κανάλι. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις. Μία προσέγγιση προβλέπει την ενσωμάτωση μικρού αριθμού δεκτών RF στην IRS ώστε να επιτρέπει άμεσες μετρήσεις. Άλλη προσέγγιση βασίζεται στην εκπομπή ειδικά διαμορφωμένων πιλότων από τον σταθμό βάσης, ενώ η IRS εφαρμόζει προκαθορισμένα μοτίβα ανάκλασης. Ο χρήστης ή ο σταθμός βάσης μετρά το συνολικό αποτέλεσμα και, γνωρίζοντας τα μοτίβα, υπολογίζει το σύνθετο κανάλι [8].



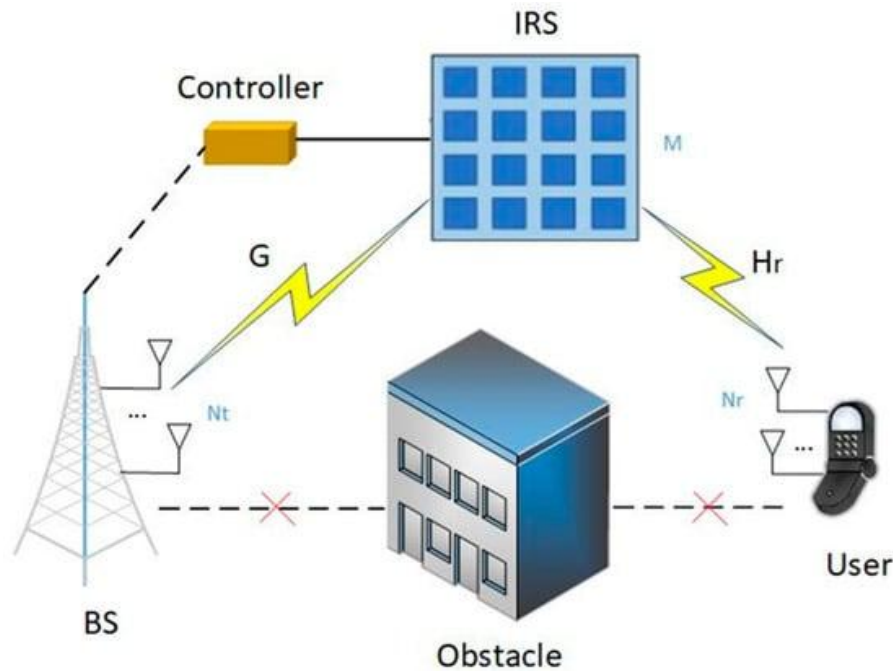
Σε πρακτικό επίπεδο, ο ελεγκτής της IRS επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης μέσω ενός αξιόπιστου καναλιού ελέγχου. Ο σταθμός βάσης υπολογίζει τους κατάλληλους συντελεστές ανάκλασης και αποστέλλει τις αντίστοιχες εντολές στην IRS. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε χρονική κλίμακα μεγαλύτερη από αυτή της μετάδοσης δεδομένων, αλλά πρέπει να είναι αρκετά συχνή ώστε να προσαρμόζεται στις μεταβολές του καναλιού, ιδίως σε δυναμικά περιβάλλοντα [2], [8].

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα είναι ο συνδυασμένος σχεδιασμός του ενεργού beamforming στον σταθμό βάσης και του παθητικού beamforming στην IRS. Η βέλτιστη απόδοση προκύπτει μόνο όταν οι δύο αυτοί μηχανισμοί σχεδιάζονται από κοινού. Αυτό οδηγεί σε πολύπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης, καθώς οι μεταβλητές της IRS είναι πολλές και συχνά διακριτές, ενώ οι μεταβλητές του πομπού είναι συνεχείς [9]. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η εναλλασσόμενη βελτιστοποίηση, οι χαλαρώσεις κυρτότητας και, όλο και περισσότερο, προσεγγίσεις βασισμένες στη μηχανική μάθηση, οι οποίες επιτρέπουν γρήγορες και πρακτικά αποδοτικές λύσεις χωρίς να απαιτείται πλήρης επίλυση του βέλτιστου προβλήματος.

3.4 Μοντελοποίηση του Καναλιού IRS

Η μοντελοποίηση του καναλιού σε συστήματα με Intelligent Reflecting Surfaces δεν αποτελεί απλή επέκταση των κλασικών μοντέλων διάδοσης. Αντίθετα, συνεπάγεται μια θεμελιώδη μετατόπιση: το περιβάλλον παύει να είναι παθητικός παράγοντας στοχαστικής εξασθένησης και μετατρέπεται σε ελεγχόμενο μέσο διάδοσης. Η IRS εισάγει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας στο φυσικό επίπεδο, επιτρέποντας τη ρύθμιση της φάσης και ενίοτε του πλάτους του ανακλώμενου κύματος. Το αποτέλεσμα είναι ότι το συνολικό κανάλι δεν περιγράφεται πλέον ως ένα τυχαίο μονοπάτι, αλλά ως άθροισμα ρυθμιζόμενων συνιστωσών που διαμορφώνονται τεχνητά [1], [6].

Σε βασική μορφή, η ζεύξη διασπάται στο τμήμα σταθμός βάσης προς IRS και στο τμήμα IRS προς χρήστη. Το σήμα στον δέκτη ισούται με το άθροισμα των συνεισφορών όλων των στοιχείων της επιφάνειας, καθένα από τα οποία επιβάλλει μια ελεγχόμενη μετατόπιση φάσης. Υπό ιδανικές συνθήκες ευθυγράμμισης, επιτυγχάνεται συνεκτική συμβολή χωρίς προσθήκη θορύβου, καθώς η επιφάνεια παραμένει παθητική [6]. Ωστόσο, η απλοποιημένη αυτή θεώρηση δεν αποδίδει πλήρως την πολυπλοκότητα που αναδύεται όταν αυξάνεται το μέγεθος της επιφάνειας ή όταν μεταβαίνουμε από far-field σε near-field καθεστώς.



Εικόνα 2: Βασικό μοντέλο επικοινωνίας με IRS, όπου η ζεύξη BS–User υποστηρίζεται μέσω ανακλώμενης διαδρομής BS–IRS–User.

3.4.1 Προσέγγιση μακρινού πεδίου και κλασική γωνιακή μοντελοποίηση

Στην πλειονότητα των πρώτων εργασιών για IRS, η μοντελοποίηση βασίζεται στην παραδοχή λειτουργίας στο μακρινό πεδίο. Στο far-field, το προσπίπτον κύμα μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο και οι διαφορές φάσης μεταξύ των στοιχείων της επιφάνειας εξαρτώνται αποκλειστικά από τη γωνία πρόσπτωσης. Υπό αυτή τη θεώρηση, το κανάλι αναπαρίσταται με steering vectors, παρόμοια με αυτά των κλασικών MIMO συστημάτων.

Η ανάλυση απλοποιείται σημαντικά, καθώς η απόσταση πομπού–IRS και IRS–χρήστη θεωρείται αρκετά μεγάλη ώστε οι καμπυλότητες του κυματομετώπου να αγνοούνται. Το αποτέλεσμα είναι ένα μοντέλο όπου η IRS λειτουργεί ως παθητικό beamformer, κατευθύνοντας το κύμα σε συγκεκριμένη γωνία μέσω κατάλληλης ρύθμισης φάσεων [1], [9]. Σε τέτοια σενάρια, η βελτιστοποίηση επικεντρώνεται στη γωνιακή ευθυγράμμιση και η χωρική δομή του καναλιού περιγράφεται επαρκώς από στατιστικά μοντέλα Rayleigh ή Rician [2].

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για μικρού ή μεσαίου μεγέθους επιφάνειες, όπου η διάσταση της IRS είναι μικρή σε σχέση με την απόσταση από τους χρήστες. Όμως, όσο το φυσικό άνοιγμα αυξάνεται, η υπόθεση επίπεδου κύματος καθίσταται λιγότερο ακριβής.



Πιο συγκεκριμένα, στο καθεστώς far-field η χωρική απόκριση της IRS μπορεί να περιγραφεί με έναν διανυσματικό πολλαπλασιασμό που συνδέει τη γωνία άφιξης και τη γωνία αναχώρησης με τις αντίστοιχες φασικές μετατοπίσεις στα στοιχεία. Η έννοια της “γωνιακής ανάλυσης” αποκτά κεντρικό ρόλο: κάθε κατεύθυνση αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο μοτίβο φάσεων πάνω στην επιφάνεια, και η ρύθμιση της IRS συνίσταται στην επιλογή του κατάλληλου μοτίβου ώστε η ανακλώμενη δέσμη να κατευθυνθεί προς τον επιθυμητό χρήστη. Αυτή η περιγραφή είναι απολύτως συμβατή με τη θεωρία γραμμικών συστοιχιών κεραιών και επιτρέπει τη μεταφορά εργαλείων από τη θεωρία massive MIMO στα συστήματα IRS [1].

Επιπλέον, στο far-field το συνολικό κέρδος κλίμακας της IRS ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα συνεκτικής άθροισης N επιμέρους συνιστωσών με σταθερή διαφορά φάσης. Η ισχύς στο δέκτη μπορεί, υπό ιδανική ευθυγράμμιση, να αυξηθεί αναλογικά με το τετράγωνο του αριθμού στοιχείων, εφόσον οι αποστάσεις είναι αρκετά μεγάλες ώστε να ισχύει η υπόθεση ομοιόμορφης φασικής κλίσης πάνω στην επιφάνεια [1], [6]. Αυτή η ιδιότητα αποτέλεσε ένα από τα πρώτα επιχειρήματα υπέρ της τεχνολογίας IRS, καθώς υποδείκνυε θεωρητικά σημαντικά κέρδη χωρίς ενεργή ενίσχυση.

Η στατιστική μοντελοποίηση στο far-field συχνά βασίζεται σε μοντέλα περιορισμένου αριθμού γωνιακών συστατικών. Στα mmWave και THz συστήματα, όπου το κανάλι είναι αραιό στο γωνιακό πεδίο, η IRS μπορεί να θεωρηθεί ότι επηρεάζει κυρίως λίγες κυρίαρχες διαδρομές. Αυτό επιτρέπει τη χρήση συμπιεσμένων αναπαραστάσεων και διευκολύνει τόσο την ανάλυση όσο και τον αλγοριθμικό σχεδιασμό [2]. Στην πράξη, πολλές από τις τεχνικές βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν για joint active-passive beamforming βασίζονται ακριβώς σε αυτή τη γωνιακή δομή.

Ωστόσο, η ευκολία της far-field προσέγγισης ενέχει και έναν θεωρητικό περιορισμό. Η υπόθεση ότι όλα τα στοιχεία της IRS “βλέπουν” το ίδιο επίπεδο κύμα συνεπάγεται χωρική στασιμότητα της απόκρισης πάνω στην επιφάνεια. Με άλλα λόγια, το κανάλι θεωρείται ότι έχει την ίδια στατιστική συμπεριφορά σε όλο το μήκος της IRS. Για μικρές επιφάνειες αυτό είναι αποδεκτό. Για επιφάνειες μεγάλου ανοίγματος, όμως, η γεωμετρική διαφοροποίηση μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών στοιχείων αρχίζει να γίνεται μη αμελητέα.

Επιπλέον, στο far-field, η έννοια της εστίασης σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου αντικαθίσταται από την έννοια της κατεύθυνσης. Η IRS δεν στοχεύει έναν χρήστη ως σημείο στον τρισδιάστατο χώρο, αλλά μια γωνία. Συνεπώς, εάν δύο χρήστες βρίσκονται στην ίδια γωνιακή κατεύθυνση αλλά σε διαφορετικές αποστάσεις, το μοντέλο δυσκολεύεται να τους



διαχωρίσει χωρικά. Το φαινόμενο δεν παρουσιάζει σημαντική επίπτωση σε μικρές επιφάνειες, αλλά αποκτά κρίσιμη σημασία σε large IRS, όπου η γεωμετρική ακρίβεια διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο.

Κατά συνέπεια, η far-field μοντελοποίηση αποτελεί ένα ισχυρό αλλά περιορισμένο εργαλείο. Παρέχει καθαρή μαθηματική δομή, συμβατότητα με υπάρχουσα θεωρία MIMO και διαχειρίσιμη πολυπλοκότητα. Παράλληλα, όμως, εισάγει παραδοχές που δεν είναι πλέον αυτονόητες όταν η IRS αποκτά μεγάλες διαστάσεις ή όταν οι χρήστες βρίσκονται σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Η μετάβαση σε large apertures αναγκάζει την αναθεώρηση αυτών των παραδοχών και οδηγεί φυσικά στη μελέτη του near-field καθεστώτος, όπου η γωνιακή μοντελοποίηση δεν επαρκεί πλέον για την πλήρη περιγραφή του καναλιού [2], [6].

3.4.2 Near-Field Καθεστώς και Μετάβαση σε Beam Focusing

Όταν το μέγεθος της IRS αυξάνεται ή όταν οι χρήστες βρίσκονται σε μικρότερες αποστάσεις, η λειτουργία εισέρχεται στο καθεστώς Fresnel, δηλαδή στο κοντινό πεδίο. Στην περιοχή αυτή, το προσπίπτον κύμα δεν μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο. Η φάση κάθε στοιχείου εξαρτάται όχι μόνο από τη γωνία, αλλά και από την ακριβή απόσταση του σημείου στόχου.

Η διαφορά μεταξύ beam steering και beam focusing γίνεται πλέον θεμελιώδης. Στο far-field, η επιφάνεια κατευθύνει ενέργεια προς συγκεκριμένη γωνία. Στο near-field, μπορεί να συγκεντρώνει ενέργεια σε συγκεκριμένο σημείο του χώρου. Η IRS παύει να λειτουργεί ως γωνιακός ανακλαστήρας και μετατρέπεται σε χωρικός μετασχηματιστής κυματομετώπου [6].

Αυτό απαιτεί διαφορετική μαθηματική περιγραφή. Οι φασικές ρυθμίσεις δεν υπολογίζονται πλέον με γραμμική συνάρτηση της γωνίας, αλλά με βάση τη γεωμετρική απόσταση κάθε στοιχείου από το σημείο εστίασης. Το κανάλι αποκτά έντονα γεωμετρικό χαρακτήρα και η μοντελοποίηση πρέπει να ενσωματώνει πλήρη τρισδιάστατη πληροφορία.

Η μετάβαση αυτή έχει σημαντικές συνέπειες. Πρώτον, αυξάνεται η ευαισθησία σε σφάλματα εκτίμησης καναλιού. Δεύτερον, δημιουργούνται νέες δυνατότητες χωρικού διαχωρισμού χρηστών που βρίσκονται σε παρόμοια γωνία αλλά διαφορετικές αποστάσεις. Η απόσταση καθίσταται παράμετρος ισοδύναμης σημασίας με τη γωνία.

Σε αντίθεση με το far-field, όπου το κέρδος εξαρτάται κυρίως από τη γωνιακή ευθυγράμμιση, στο near-field η εστίαση επιτυγχάνεται μέσω σφαιρικής αντιστάθμισης φάσης. Κάθε στοιχείο της επιφάνειας ρυθμίζεται έτσι ώστε το συνολικό ανακλώμενο κύμα να συγκλίνει σε



συγκεκριμένο χωρικό σημείο, αντισταθμίζοντας τις διαφορετικές αποστάσεις διάδοσης. Η διαδικασία είναι περισσότερο ανάλογη με αυτή ενός συνθετικού φακού παρά μιας κλασικής συστοιχίας κατευθυντικής δέσμης. Η IRS δεν στρέφει απλώς τη δέσμη, αλλά τη διαμορφώνει ώστε να έχει συγκεκριμένη χωρική καμπυλότητα.

Η διαφορά είναι ουσιώδης και όχι απλώς τεχνική. Στο beam steering, όλοι οι χρήστες που βρίσκονται στην ίδια γωνιακή κατεύθυνση επηρεάζονται παρόμοια. Στο beam focusing, δύο χρήστες με παρόμοια γωνία αλλά διαφορετική απόσταση μπορούν να διαχωριστούν, εφόσον η IRS ρυθμιστεί ώστε να εστιάζει στο ένα συγκεκριμένο σημείο. Η χωρική διάσταση παύει να είναι μονοδιάστατη (γωνία) και γίνεται πλήρως τρισδιάστατη. Αυτή η δυνατότητα δημιουργεί νέες προοπτικές για χωρικό πολυπλεξισμό σε dense περιβάλλοντα, ειδικά όταν η επιφάνεια έχει μεγάλο φυσικό άνοιγμα [6].

Παράλληλα, το near-field καθεστώς εισάγει και νέες προκλήσεις. Η γεωμετρική εξάρτηση των φασικών ρυθμίσεων σημαίνει ότι ακόμη και μικρά σφάλματα στη γνώση της θέσης του χρήστη μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική απώλεια εστίασης. Ενώ στο far-field μια μικρή απόκλιση στη γωνία προκαλεί σχετικά ομαλή υποβάθμιση, στο near-field η λανθασμένη εκτίμηση της απόστασης μεταφράζεται σε μη βέλτιστη καμπυλότητα κυματομετώπου, με αποτέλεσμα αποσυγχρονισμό των επιμέρους συνιστωσών. Το σύστημα γίνεται, με άλλα λόγια, πιο ευαίσθητο στην ακρίβεια του CSI.

Επιπλέον, η μετάβαση σε large IRS ενδέχεται να καταστήσει το σύστημα χωρικά μη στατικό. Τα κεντρικά και περιφερειακά στοιχεία της επιφάνειας ενδέχεται να αντιλαμβάνονται διαφορετικά scattering clusters, ιδίως σε περιβάλλοντα έντονης σκέδασης. Η έννοια της spatial non-stationarity αποκτά εδώ ιδιαίτερη σημασία: το κανάλι παύει να έχει ομοιόμορφη στατιστική συμπεριφορά σε όλη την επιφάνεια. Το φαινόμενο δεν αποτυπώνεται επαρκώς από τα κλασικά μοντέλα far-field και απαιτεί πιο σύνθετες γεωμετρικές και ηλεκτρομαγνητικές προσεγγίσεις [2].

Από συστημική άποψη, η μετάβαση σε beam focusing επηρεάζει και τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Οι φάσεις δεν επιλέγονται πλέον βάσει γωνιακών διαφορών, αλλά βάσει απόλυτων αποστάσεων. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερα μη γραμμικό και απαιτεί ακριβή γεωμετρικά δεδομένα. Παρά ταύτα, το near-field καθεστώς δεν αποτελεί απλώς θεωρητική περιπλοκή αποτελεί και πηγή νέων δυνατοτήτων. Η ικανότητα εστίασης σε συγκεκριμένα σημεία ανοίγει τον δρόμο για εφαρμογές όπως χωρικά επιλεκτική ασύρματη τροφοδοσία ενέργειας, ασφαλής μετάδοση με γεωμετρικό περιορισμό και δυναμική αναδιαμόρφωση του χωρικού προφίλ ισχύος.



Συνεπώς, το near-field δεν είναι απλώς μια “απόκλιση” από το far-field μοντέλο. Αποτελεί διαφορετικό καθεστώς λειτουργίας με δική του μαθηματική δομή και φυσική ερμηνεία. Η κατανόηση αυτής της μετάβασης είναι κρίσιμη για τη σωστή μοντελοποίηση large IRS και για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρει η χωρική εστίαση έναντι της απλής κατευθυντικής ανάκλασης [6].

3.4.3 Μεγάλης κλίμακας IRS και χωρική μη στασιμότητα

Η αύξηση του μεγέθους της επιφάνειας επιφέρει και ένα λιγότερο προφανές αλλά κρίσιμο φαινόμενο: τη χωρική μη στασιμότητα. Στα κλασικά arrays, θεωρείται ότι όλα τα στοιχεία «βλέπουν» το ίδιο στατιστικό κανάλι. Σε large IRS, όμως, διαφορετικά τμήματα της επιφάνειας ενδέχεται να βιώνουν διαφορετικές συνθήκες διάδοσης.

Ένα μέρος της επιφάνειας μπορεί να έχει οπτική επαφή με τον χρήστη, ενώ άλλο μέρος να βρίσκεται σε σκίαση. Η ένταση και η φάση του καναλιού μεταβάλλονται κατά μήκος της επιφάνειας. Η υπόθεση στατιστικής ομοιογένειας παύει να ισχύει.

Το αποτέλεσμα είναι ότι το κανάλι δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ενιαίος πίνακας με κοινές παραμέτρους. Απαιτούνται τμηματοποιημένα μοντέλα, όπου διαφορετικές περιοχές της IRS περιγράφονται από διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται όσο αυξάνεται το φυσικό άνοιγμα της επιφάνειας και όσο οι χρήστες πλησιάζουν [2], [6].

Η spatial non-stationarity επηρεάζει και τη χωρική συσχέτιση. Σε μεγάλες επιφάνειες, η συσχέτιση μεταξύ απομακρυσμένων στοιχείων μπορεί να είναι χαμηλή, ενώ μεταξύ γειτονικών υψηλή. Το κανάλι αποκτά πολυκλιμακωτή δομή, καθιστώντας την ανάλυση πιο σύνθετη αλλά και πιο ρεαλιστική.

Πιο αναλυτικά, η έννοια της χωρικής μη στασιμότητας σημαίνει ότι τα στατιστικά μεγέθη του καναλιού όπως η μέση ισχύς, ο συντελεστής Rician ή το φάσμα γωνιακής διασποράς δεν είναι πλέον σταθερά σε όλη την επιφάνεια. Αντίθετα, εξαρτώνται από τη θέση κάθε στοιχείου. Σε περιβάλλοντα με πλούσια σκέδαση, ορισμένα clusters μπορεί να είναι “ορατά” μόνο από συγκεκριμένες περιοχές της IRS, δημιουργώντας περιοχές ορατότητας (visibility regions). Έτσι, ένα τμήμα της επιφάνειας μπορεί να συνεισφέρει έντονα σε συγκεκριμένο μονοπάτι διάδοσης, ενώ ένα άλλο να μην συμμετέχει καθόλου.



Αυτή η διαφοροποίηση οδηγεί σε έναν πιο σύνθετο χωρικό πίνακα καναλιού, όπου η στατιστική περιγραφή απαιτεί τοπικά μοντέλα. Αντί για μία ενιαία κατανομή Rayleigh ή Rician για ολόκληρη την επιφάνεια, προκύπτει ένα σύνολο τοπικών κατανομών, καθεμία με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η απλοποιημένη υπόθεση ανεξαρτησίας ή ομοιογένειας που συχνά υιοθετείται σε μικρά arrays δεν είναι πλέον επαρκής [2].

Επιπλέον, η spatial non-stationarity συνδέεται άμεσα με το near-field καθεστώς. Όταν οι χρήστες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, η γεωμετρική διαφοροποίηση των αποστάσεων γίνεται έντονη. Τα κεντρικά στοιχεία της IRS μπορεί να έχουν σημαντικά διαφορετική φασική και ενεργειακή συνεισφορά σε σχέση με τα περιφερειακά. Η ένταση του σήματος δεν κατανέμεται ομοιόμορφα, αλλά παρουσιάζει χωρική διακύμανση που εξαρτάται από την τρισδιάστατη γεωμετρία της σκηνής [6].

Από την πλευρά της χωρικής συσχέτισης, οι μεγάλες επιφάνειες εμφανίζουν μια ενδιαφέρουσα πολυκλιμακωτή συμπεριφορά. Τα γειτονικά στοιχεία παραμένουν ισχυρά συσχετισμένα λόγω μικρής απόστασης και παρόμοιας γωνιακής ορατότητας. Όμως όσο η απόσταση μεταξύ δύο στοιχείων αυξάνεται, η πιθανότητα να μοιράζονται κοινά scattering clusters μειώνεται. Έτσι, η συσχέτιση δεν φθίνει απλώς εκθετικά με την απόσταση, αλλά μπορεί να παρουσιάζει απότομες μεταβολές ανάλογα με τη γεωμετρία του περιβάλλοντος.

Η πρακτική συνέπεια είναι ότι η μοντελοποίηση large IRS απαιτεί χωρικά εξαρτώμενους πίνακες συσχέτισης και πιθανώς ιεραρχικές προσεγγίσεις. Μια ενιαία αναπαράσταση χαμηλής διάστασης δεν επαρκεί για να αποδώσει την πραγματική δομή του καναλιού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι αναγκαίο να διαχωρίζεται η επιφάνεια σε υποπεριοχές, καθεμία με δικό της στατιστικό μοντέλο και τοπική γεωμετρική περιγραφή.

Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την ανάλυση πιο απαιτητική, αλλά ταυτόχρονα προσφέρει και μεγαλύτερη ευελιξία. Η spatial non-stationarity δεν είναι απλώς πρόβλημα αποτελεί και ευκαιρία. Η διαφοροποίηση μεταξύ περιοχών της επιφάνειας μπορεί να αξιοποιηθεί για χωρική διαίρεση πόρων, επιλεκτική εστίαση και βελτιστοποιημένη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών σε σύνθετα περιβάλλοντα. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό, τα μοντέλα πρέπει να αποτυπώνουν με ακρίβεια τη χωρική μεταβλητότητα, διαφορετικά η θεωρητική ανάλυση κινδυνεύει να απομακρυνθεί από τη φυσική πραγματικότητα.

3.4.4 Επιπτώσεις στην Εκτίμηση Καναλιού



Η πολυπλοκότητα που εισάγουν το near-field και η spatial non-stationarity αντανakλάται άμεσα στο πρόβλημα εκτίμησης καναλιού. Η εκτίμηση του cascaded καναλιού BS-IRS-user είναι ήδη απαιτητική λόγω της παθητικής φύσης της επιφάνειας [12]. Σε near-field καθεστώτα, ο αριθμός παραμέτρων αυξάνεται σημαντικά.

Δεν αρκεί πλέον η εκτίμηση γωνιών πρόσπτωσης. Απαιτείται εκτίμηση αποστάσεων, καμπυλότητας κυματομετώπου και τοπικών διαφοροποιήσεων κατά μήκος της επιφάνειας. Οι τεχνικές συμπίεσμνης εκτίμησης που βασίζονται σε γωνιακή σπαρσιμότητα [5] ενδέχεται να χρειαστούν επανασχεδιασμό ώστε να ενσωματώνουν χωρική σπαρσιμότητα.

Παράλληλα, η spatial non-stationarity σημαίνει ότι η εκπαίδευση πρέπει να λαμβάνει υπόψη υποπεριοχές της επιφάνειας. Η υπερβολική απλοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε συστηματικά σφάλματα φάσης και συνεπώς σε σημαντική απώλεια κέρδους focusing.

Οι two-timescale τεχνικές βελτιστοποίησης [11] καθίστανται ακόμη πιο κρίσιμες, καθώς η δυναμική προσαρμογή της IRS πρέπει να συνδυάζεται με γεωμετρικά εξαρτώμενες μεταβολές του καναλιού.

Πιο συγκεκριμένα, στο κλασικό far-field καθεστώς η εκτίμηση του καναλιού μπορεί να περιοριστεί στην αναγνώριση ενός μικρού αριθμού κυρίαρχων γωνιακών παραμέτρων. Σε mmWave σενάρια, η σπαρσιμότητα στο γωνιακό πεδίο επιτρέπει την εφαρμογή συμπίεσμων τεχνικών που μειώνουν σημαντικά το pilot overhead [5]. Ωστόσο, στο near-field η παραμετροποίηση αλλάζει ριζικά. Το κανάλι δεν περιγράφεται πλέον αποκλειστικά από γωνίες άφιξης και αναχώρησης, αλλά από πλήρη τρισδιάστατα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η εκτίμηση πρέπει να συλλάβει τη χωρική καμπυλότητα του κυματομετώπου, δηλαδή ουσιαστικά τη θέση του χρήστη στον χώρο.

Αυτό συνεπάγεται αύξηση της διάστασης του προβλήματος. Αντί για λίγες γωνιακές μεταβλητές, απαιτείται εκτίμηση συντεταγμένων ή αποστάσεων για κάθε κυρίαρχη διαδρομή. Το cascaded κανάλι παύει να έχει απλή δομή γινομένου δύο πινάκων και αποκτά μη γραμμικά χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από τη γεωμετρία. Η εκτίμηση γίνεται περισσότερο πρόβλημα παραμετρικής ταυτοποίησης παρά απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Επιπλέον, η spatial non-stationarity περιπλέκει περαιτέρω την εκπαίδευση. Σε large IRS, διαφορετικά τμήματα της επιφάνειας μπορεί να “βλέπουν” διαφορετικά scattering clusters. Αν η εκτίμηση βασιστεί σε υπόθεση ομοιογένειας, ενδέχεται να παραβλέψει τοπικές διαφοροποιήσεις και να οδηγήσει σε φασικές ρυθμίσεις που είναι βέλτιστες για μία περιοχή



αλλά υποβέλτιστες για άλλη. Το αποτέλεσμα είναι μερική αποσυγχρονισμένη άθροιση των ανακλώμενων συνιστωσών και συνεπώς απώλεια του θεωρητικού κέρδους [6].

Η ανάγκη για τμηματοποιημένη εκτίμηση οδηγεί σε υβριδικές προσεγγίσεις, όπου η IRS αντιμετωπίζεται ως σύνολο υποεπιφανειών με τοπικό CSI. Αυτό αυξάνει όμως το training overhead και εγείρει ζητήματα χρονικής κλιμάκωσης. Η δυναμική προσαρμογή της IRS δεν μπορεί να πραγματοποιείται σε κάθε χρονική μεταβολή μικρής κλίμακας χωρίς σημαντικό κόστος σε πόρους εκπαίδευσης.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι two-timescale τεχνικές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία [11]. Η ιδέα είναι να διαχωρίζονται οι αργά μεταβαλλόμενες γεωμετρικές παράμετροι όπως η θέση του χρήστη ή η μεγάλη κλίμακα εξασθένησης από τις ταχέως μεταβαλλόμενες μικροδιακυμάνσεις. Η IRS μπορεί να ρυθμίζεται σε αργή χρονική κλίμακα βάσει γεωμετρικών εκτιμήσεων, ενώ ο ενεργός πομπός προσαρμόζει το beamforming σε μικρότερη κλίμακα. Η προσέγγιση αυτή μειώνει το απαιτούμενο overhead και καθιστά τη λειτουργία πρακτικά υλοποιήσιμη.

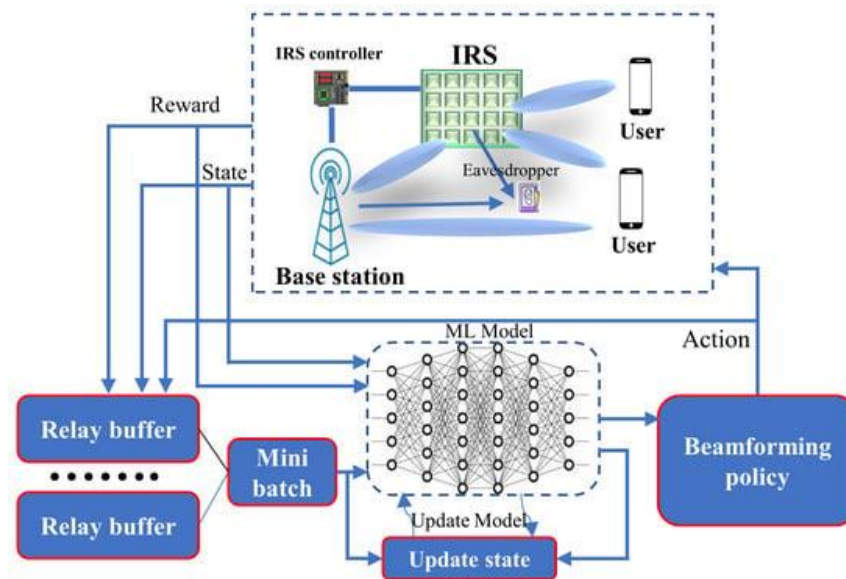
Παράλληλα, οι τεχνικές μηχανικής μάθησης που έχουν προταθεί για compressive channel estimation [5] αποκτούν νέο ρόλο. Σε near-field καθεστώς, η μάθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρτογραφήσει άμεσα τις μετρήσεις πιλότων σε γεωμετρικές παραμέτρους ή ακόμη και σε βέλτιστα μοτίβα φάσεων. Ωστόσο, η γενίκευση τέτοιων μοντέλων σε διαφορετικά περιβάλλοντα παραμένει ανοικτό ερευνητικό ζήτημα, ιδίως όταν η spatial non-stationarity μεταβάλλει τη δομή του καναλιού.

Η εκτίμηση καναλιού σε large IRS συστήματα μετατρέπεται από ένα πρόβλημα γραμμικής ανάκτησης σε ένα σύνθετο γεωμετρικό και πολυπαραμετρικό ζήτημα. Η ακρίβεια της εκτίμησης καθίσταται καθοριστική, διότι στο near-field ακόμη και μικρά σφάλματα φάσης μεταφράζονται σε σημαντική απώλεια εστίασης. Η πρόκληση δεν είναι μόνο η μείωση του training overhead, αλλά και η ανάπτυξη μοντέλων που αποτυπώνουν τη χωρική μη στασιμότητα χωρίς να οδηγούν σε ανεξέλεγκτη αύξηση της πολυπλοκότητας [2], [6], [12].

3.5 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης και Διαχείρισης IRS

Η ύπαρξη μιας IRS στο δίκτυο δεν αρκεί από μόνη της για την επίτευξη των θεωρητικών κερδών που υπόσχεται η βιβλιογραφία. Η επιφάνεια αποτελεί ουσιαστικά ένα σύνολο βαθμών ελευθερίας που πρέπει να συνδυαστούν σε ένα συνεκτικό σχέδιο. Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται αλγοριθμικά. Η βελτιστοποίηση των συντελεστών ανάκλασης, δηλαδή των φάσεων και ενίοτε των πλατών των στοιχείων, αποτελεί το κεντρικό πρόβλημα διαχείρισης

των IRS και ταυτόχρονα το σημείο όπου οι θεωρητικές δυνατότητες συναντούν την πρακτική υπολογιστική πολυπλοκότητα [2], [6].



Εικόνα 3: Παράδειγμα ελέγχου IRS με ενισχυτική μάθηση, όπου η πολιτική beamforming ενημερώνεται μέσω καταστάσεων, ανταμοιβών και ανατροφοδότησης από το ασύρματο περιβάλλον.

Σε τυπική διατύπωση, ζητείται να επιλεγεί ένα διάνυσμα φάσεων, με μεταβλητές θ_n είτε συνεχείς στο $[0, 2\pi)$ είτε διακριτές σε ένα σύνολο επιτρεπτών καταστάσεων, ώστε να μεγιστοποιηθεί ένας στόχος. Ο στόχος μπορεί να είναι ο ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη, το άθροισμα ρυθμών πολλών χρηστών, η ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος υπό περιορισμούς QoS ή ακόμη και κριτήρια που ενσωματώνουν παρεμβολές και δικαιοσύνη μεταξύ χρηστών [1], [9]. Όταν συνυπολογιστεί και ο ενεργός σχεδιασμός στον σταθμό βάσης (beamforming), το πρόβλημα μετατρέπεται σε μεικτό (mixed) πρόβλημα συνεχών και διακριτών μεταβλητών, συνήθως μη κυρτό, και επομένως δύσκολο να επιλυθεί βέλτιστα σε πραγματικό χρόνο [9], [11].

Η εκθετική αύξηση της πολυπλοκότητας γίνεται εμφανής ακόμη και στην απλούστερη περίπτωση δυαδικής φάσης. Μια εξαντλητική αναζήτηση σε όλα τα διανύσματα φάσεων έχει πολυπλοκότητα τάξης $O(2^N)$, η οποία είναι πρακτικά αδύνατη ακόμη και για μέτριες διαστάσεις επιφάνειας. Συνεπώς, η έρευνα στρέφεται σε προσεγγιστικές μεθόδους, με στόχο την επίτευξη υψηλής απόδοσης χωρίς να απαιτείται ακριβής επίλυση [2], [6].

Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι η εναλλασσόμενη βελτιστοποίηση. Η μέθοδος συνίσταται στο να διατηρείται σταθερό το ενεργό beamforming του πομπού ενώ



βελτιστοποιείται το passive beamforming της IRS, και στη συνέχεια, με σταθερές τις φάσεις της IRS, να βελτιστοποιούνται οι παράμετροι του πομπού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση. Η μέθοδος δεν εγγυάται το παγκόσμιο βέλτιστο, ωστόσο στην πράξη συγκλίνει σε λύσεις υψηλής ποιότητας, με σχετικά διαχειρίσιμο υπολογιστικό κόστος [9]. Σε σενάρια OFDMA, όπου η βελτιστοποίηση εμπλέκει και την κατανομή υποφερόντων ή ισχύος, το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο και συχνά υιοθετούνται παραλλαγές εναλλασσόμενης βελτιστοποίησης οι οποίες διασπούν το πρόβλημα σε επιμέρους υποπροβλήματα κατανομής πόρων και φάσεων [11]. Στο πλαίσιο αυτό, η IRS εντάσσεται οργανικά στη συνολική κατανομή πόρων του δικτύου.

Μια δεύτερη κατηγορία μεθόδων βασίζεται στη χαλάρωση των διακριτών μεταβλητών. Εάν οι φάσεις είναι διακριτές, το πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί θεωρώντας αρχικά συνεχείς τιμές και κατόπιν εφαρμόζοντας ποσοτικοποίηση. Ένα τυπικό εργαλείο σε τέτοιες προσεγγίσεις είναι η semi-definite relaxation (SDR), όπου ένα μη κυρτό πρόβλημα αναδιατυπώνεται σε κυρτή μορφή σε υψηλότερη διάσταση και επιλύεται αποδοτικά, με το αποτέλεσμα να «προβάλλεται» ξανά στο αρχικό πεδίο μέσω τεχνικών όπως randomization ή στρογγυλοποίηση. Η SDR μπορεί να προσφέρει πολύ καλές λύσεις αλλά συχνά έχει υψηλό κόστος σε μεγάλες IRS, κάτι που περιορίζει τη χρήση της σε πραγματικού χρόνου έλεγχο [9]. Για αυτό, σε πρακτικά σενάρια συχνά προτιμώνται ελαφρύτερες προσεγγίσεις τύπου gradient-based ενημέρωσης (όταν οι φάσεις θεωρούνται συνεχείς), ή συνδυασμοί προσεγγίσεων που εκμεταλλεύονται δομή του καναλιού για να μειώσουν την πολυπλοκότητα [8], [9].

Τα τελευταία χρόνια, λόγω του μεγάλου όγκου μεταβλητών, η βιβλιογραφία στρέφεται και προς μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, κυρίως για γρήγορη προσαρμογή σε δυναμικά περιβάλλοντα. Η ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning) έχει προταθεί ως πλαίσιο εντός του οποίου ένας πράκτορας δοκιμάζει ρυθμίσεις της IRS, παρατηρεί μια ανταμοιβή (π.χ. αύξηση ρυθμού ή SINR) και προσαρμόζει τη στρατηγική του χωρίς να απαιτείται πλήρες αναλυτικό μοντέλο σε κάθε βήμα. Η ταχύτητα προσαρμογής αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, καθώς το κανάλι μεταβάλλεται και το διαθέσιμο χρονικό παράθυρο αξιοποίησης μιας ρύθμισης ενδέχεται να είναι μικρό [2]. Παράλληλα, προσεγγίσεις επιβλεπόμενης μάθησης στοχεύουν στην άμεση πρόβλεψη του διανύσματος φάσεων από χαρακτηριστικά του καναλιού, επιτυγχάνοντας σχεδόν στιγμιαίο υπολογισμό, στοιχείο ιδιαίτερα ωφέλιμο σε σενάρια μεγάλης κλίμακας, όπου ο κλασικός βηματικός αλγόριθμος γίνεται υπολογιστικά ασύμφορος [8].

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την εφαρμογή. Σε SWIPT περιβάλλοντα, για παράδειγμα, δεν υφίσταται ενιαίος στόχος: απαιτείται ισορροπία



μεταξύ της απόδοσης πληροφορίας και της ενεργειακής συγκομιδής, οπότε διαμορφώνονται πολυκριτηριακά προβλήματα στα οποία η IRS κατανέμει την ενέργεια του κύματος, αντί απλώς να την ενισχύει [7]. Σε πολυχρηστικά σενάρια με περιορισμούς QoS, εμφανίζονται max-min διατυπώσεις και απαίτηση δικαιοσύνης μεταξύ χρηστών, που συχνά οδηγούν σε δυσκολότερες, μη γραμμικές διατυπώσεις [9]. Σε δορυφορικά ή κινητά σενάρια συνδεσιμότητας, οι στόχοι μετατοπίζονται προς αξιοπιστία και κάλυψη μεγάλων περιοχών, οπότε ο σχεδιασμός δεν περιορίζεται στις φάσεις αλλά επεκτείνεται και στη γεωμετρία της ζεύξης. Η σχετική βιβλιογραφία σε uplink δορυφορικά/IoT σενάρια καταδεικνύει ότι οι παραδοσιακές τεχνικές βελτιστοποίησης απαιτούν προσαρμογή όταν η διάδοση παρουσιάζει διαφορετική στατιστική δομή και διαφορετικούς περιορισμούς ισχύος [5].

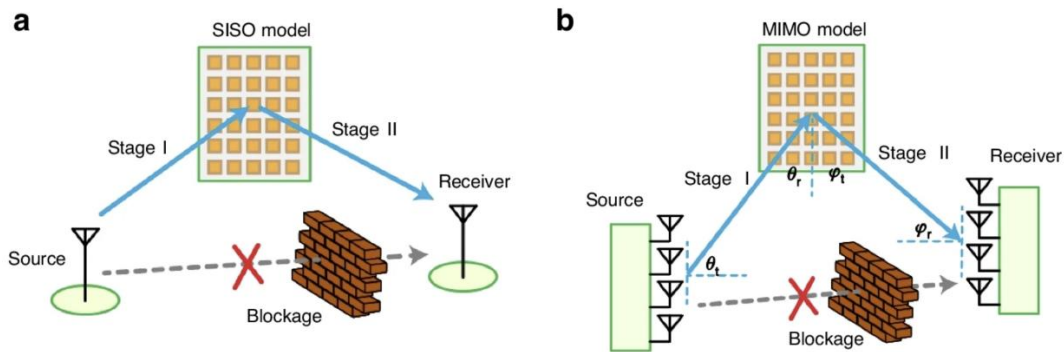
Ένα ακόμη πρακτικό ζήτημα αφορά την ταχεία επαναπροσαρμογή της IRS όταν το κανάλι αλλάζει. Η εκτίμηση καναλιού και η επίλυση της βελτιστοποίησης μπορεί να είναι χρονοβόρες, ειδικά όταν υπάρχουν εκατοντάδες ή χιλιάδες στοιχεία. Για αυτό, προτείνονται προσεγγίσεις βασισμένες σε codebooks, όπου ορίζεται ένα σύνολο προκαθορισμένων μοτίβων φάσεων και το σύστημα επιλέγει το καταλληλότερο μέσω μετρήσεων και ανάδρασης, μειώνοντας δραστικά το χρόνο απόφασης. Υπάρχουν επίσης υβριδικές προσεγγίσεις όπου ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης παράγει μια αρχική λύση και στη συνέχεια μια κλασική μέθοδος κάνει λεπτορύθμιση (fine-tuning), ώστε να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση χωρίς πλήρες υπολογιστικό βάρος [8], [9]. Η λογική είναι προφανής: μια «καλή» λύση τώρα μπορεί να είναι πιο χρήσιμη από μια «άριστη» λύση αργότερα.

Τέλος, η κλιμάκωση αποτελεί ίσως το πιο καθοριστικό κριτήριο για την πρακτική υιοθέτηση των IRS. Καθώς αυξάνεται το N , αυξάνεται όχι μόνο το μέγεθος του προβλήματος αλλά και η ανάγκη για δομημένες, ιεραρχικές ή παραλληλοποιημένες λύσεις. Για τον λόγο αυτό εξετάζεται η διάσπαση μιας μεγάλης IRS σε υπο-επιφάνειες με μερικώς ανεξάρτητη ρύθμιση, καθώς και η χρήση νευρωνικών δικτύων που υπολογίζουν σχεδόν άμεσα τις φάσεις, μειώνοντας την καθυστέρηση υπολογισμού [2], [6]. Δεν έχει ακόμη αποκρυσταλλωθεί ποια προσέγγιση θα κυριαρχήσει· το ζητούμενο παραμένει ανοιχτό. Είναι ωστόσο σαφές ότι, χωρίς αλγορίθμους που κλιμακώνονται και λειτουργούν υπό περιορισμούς πραγματικού χρόνου, οι IRS θα παραμείνουν ερευνητική ιδέα και δεν θα ωριμάσουν ως ευρέως διαθέσιμη υποδομή [1], [9].



4. Εφαρμογές των IRS σε Διάφορα Περιβάλλοντα

Η τεχνολογία των Intelligent Reflecting Surfaces δεν περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο τύπο δικτύου ή γεωμετρίας διάδοσης. Αντίθετα, το κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να προσαρμοστεί σχεδόν σε κάθε περιβάλλον όπου η ασύρματη διάδοση παρουσιάζει περιορισμούς. Από πυκνοδομημένες πόλεις μέχρι εσωτερικούς χώρους, από βιομηχανικά συγκροτήματα μέχρι δορυφορικές συνδέσεις, οι IRS εισάγουν έναν νέο τρόπο αντιμετώπισης του καναλιού: όχι ως πρόβλημα της παράκαμψη, αλλά ως μηχανισμό της έλεγχου [1], [2].



Εικόνα 4: Παράδειγμα έξυπνων μεταεπιφανειών (IMS/IRS) σε αστικό περιβάλλον.

Οι επιφάνειες μπορούν να αναπτυχθούν σε υποδομές της πόλης (πλευρές κτιρίων, πινακίδες, κολώνες φωτισμού) και να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς: ως **αναμεταδότες σήματος (signal relay)** που παρακάμπτουν εμπόδια και επεκτείνουν την κάλυψη, ως **πομποί (signal transmitter)** που εκπέμπουν πληροφορία (π.χ. μέσω διαμόρφωσης backscatter) ή ενέργεια, και ως **επεξεργαστές σήματος (signal processor)** που εκτελούν λειτουργίες στο μεταδιδόμενο σήμα (π.χ. φιλτράρισμα ή υπολογιστικές εργασίες πάνω στο κύμα). Η τεχνολογία IRS επιτρέπει τη μετατροπή μιας πόλης σε “έξυπνο περιβάλλον”, όπου κτήρια και δομές συνεργάζονται με τα δίκτυα 5G/6G για βέλτιστη παροχή ασύρματων υπηρεσιών.

Η ιδέα της έξυπνης πόλης αποκτά εδώ συγκεκριμένη τεχνική διάσταση. Επιφάνειες κτιρίων, πινακίδες, τοίχοι, ακόμη και αστικός εξοπλισμός μπορούν να μετατραπούν σε παθητικά στοιχεία του δικτύου, λειτουργώντας συμπληρωματικά με τους σταθμούς βάσης. Οι IRS μπορούν να λειτουργούν ως ανακλαστές που παρακάμπτουν εμπόδια, ως μηχανισμοί επεξεργασίας του κύματος μέσω ελέγχου φάσης και πλάτους, ή ακόμη και ως στοιχεία backscatter μετάδοσης χαμηλής ισχύος. Συνεπώς, το αστικό τοπίο μπορεί να αξιοποιηθεί ως ενεργό μέρος της υποδομής επικοινωνιών [1], [6].

4.1 Αστικά Περιβάλλοντα

Στα αστικά κέντρα, το κυρίαρχο πρόβλημα είναι η σκίαση και οι έντονες ανακλάσεις λόγω της πυκνότητας των κτιρίων. Η διάδοση, ειδικά σε mmWave και μελλοντικές 6G ζώνες, εξαρτάται δραστικά από την ύπαρξη γραμμής ορατότητας. Μικρές αλλαγές στη γεωμετρία του χώρου μπορούν να οδηγήσουν σε πλήρη απώλεια σήματος. Εδώ οι IRS λειτουργούν ως τεχνητές γραμμές ορατότητας, δημιουργώντας ελεγχόμενες ανακλάσεις εκεί όπου φυσικά δεν υπάρχουν [2], [6].



Ένα τυπικό σενάριο είναι η κάλυψη χρηστών σε δρόμους όπου ο σταθμός βάσης δεν έχει άμεση οπτική επαφή λόγω γωνιών ή ψηλών κτιρίων. Μια IRS τοποθετημένη στη γωνία ενός κτιρίου μπορεί να ανακλά το σήμα με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργεί ένα ισχυρό εναλλακτικό μονοπάτι. Μελέτες έχουν δείξει ότι σε τέτοιες συνθήκες η αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος μπορεί να είναι της τάξης δεκάδων dB, μετατρέποντας μια περιοχή χωρίς κάλυψη σε περιοχή υψηλών ρυθμών μετάδοσης [1], [6].

Σε κυψελωτά δίκτυα, οι IRS μπορούν να τοποθετηθούν στρατηγικά στα όρια κυψελών, όπου συνήθως οι χρήστες αντιμετωπίζουν χαμηλό SNR και αυξημένες παρεμβολές από γειτονικούς σταθμούς βάσης. Μέσω κατάλληλης ρύθμισης φάσεων, η IRS μπορεί να ενισχύσει επιλεκτικά το σήμα του επιθυμητού σταθμού βάσης προς τον χρήστη, ενώ ταυτόχρονα να αποφεύγει την ανακατεύθυνση ενέργειας προς περιοχές που θα δημιουργούσαν παρεμβολές. Έτσι, βελτιώνεται όχι μόνο η κάλυψη αλλά και η συνολική φασματική αποδοτικότητα του δικτύου [2], [9].

Οι εφαρμογές δεν περιορίζονται στην κάλυψη. Σε σενάρια φυσικής ασφάλειας, οι IRS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν τον λόγο SNR μεταξύ νόμιμου χρήστη και πιθανού υποκλοπέα, διαμορφώνοντας το κύμα έτσι ώστε να δημιουργούνται «σκοιές» προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Αυτό επιτρέπει βελτίωση του secrecy rate χωρίς αύξηση ισχύος εκπομπής [2], [9].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης εφαρμογές σε Vehicle-to-Infrastructure επικοινωνίες. Σε διασταυρώσεις, δρόμους με έντονη σκίαση και περιοχές με υψηλή κινητικότητα, IRS τοποθετημένες σε φανάρια, στάσεις λεωφορείων ή πλευρές κτιρίων μπορούν να διατηρούν τη συνδεσιμότητα οχημάτων που διαφορετικά θα έχαναν το σήμα λόγω γεωμετρίας. Η ικανότητα ταχείας επαναρύθμισης της IRS επιτρέπει την προσαρμογή σε κινούμενους χρήστες, κάτι ιδιαίτερα κρίσιμο για αυτόνομα οχήματα και εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης [1], [8].

Με τον τρόπο αυτό, οι IRS μετατρέπουν το αστικό περιβάλλον από παράγοντα που υποβαθμίζει τη διάδοση σε στοιχείο που υποστηρίζει τη λειτουργία του δικτύου. Η μετατόπιση αυτή συνιστά μια από τις ουσιωδέστερες αλλαγές που εισάγει η τεχνολογία.

4.2 Βιομηχανικά Περιβάλλοντα και Εγκαταστάσεις



Οι βιομηχανικοί χώροι αποτελούν ιδιαίτερα απαιτητικά περιβάλλοντα για την ασύρματη διάδοση. Μεταλλικές επιφάνειες, μηχανήματα μεγάλης μάζας, κινούμενοι βραχίονες, ράφια αποθηκών και γραμμές παραγωγής δημιουργούν συνθήκες έντονης ανάκλασης και σκέδασης. Το αποτέλεσμα είναι μια διάδοση πλούσια σε πολλαπλές διαδρομές, η οποία όμως είναι ευάλωτη σε βαθιές εξασθενήσεις (deep fading) και σε σημεία με ιδιαίτερα χαμηλή ισχύ λήψης, όπου αισθητήρες και ρομπότ ενδέχεται να χάνουν τη συνδεσιμότητά τους χωρίς προφανή λόγο. Σε τέτοιες συνθήκες, η προσέγγιση των IRS αποκτά ιδιαίτερη αξία, καθώς δεν επιδιώκει αντιμετώπιση του προβλήματος με αύξηση της ενεργής ισχύος, αλλά διαμόρφωση του ίδιου του περιβάλλοντος διάδοσης, με στόχο τη μείωση της τυχαιότητας της σκέδασης, έστω και τοπικά [2], [6].

Η βασική ιδέα είναι στρατηγική τοποθέτηση IRS σε σημεία που προσφέρουν γεωμετρική υπεροχή, όπως ψηλά στους τοίχους ή στην οροφή μιας αποθήκης, ώστε να δημιουργούνται ελεγχόμενα μονοπάτια διάδοσης προς περιοχές που σκιάζονται από μεταλλικές κατασκευές. Έτσι μπορούν να μειωθούν οι νεκρές ζώνες κάλυψης για Wi-Fi/5G αισθητήρες, βιομηχανικές κάμερες και κινητά ρομπότ. Η λογική είναι ανάλογη με το «virtual LoS»: εκεί που η άμεση οπτική επαφή είναι αδύνατη, η IRS μπορεί να δημιουργήσει ένα αξιόπιστο ανακλώμενο μονοπάτι, πιο σταθερό από τα τυχαία πολλαπλά μονοπάτια που προκύπτουν από ανεξέλεγκτες μεταλλικές ανακλάσεις [1], [6].

Σε έξυπνα εργοστάσια με υψηλή πυκνότητα IoT συσκευών, το πρόβλημα δεν περιορίζεται στην κάλυψη. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η παρεμβολή, ιδιαίτερα όταν πολλοί κόμβοι επικοινωνούν ταυτόχρονα και το περιβάλλον λειτουργεί ως θάλαμος έντονων ανακλάσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι IRS μπορούν να αξιοποιηθούν ως παθητικοί μηχανισμοί χωρικού διαχωρισμού: με κατάλληλο passive beamforming, ενισχύουν ταυτόχρονα διαφορετικές κατευθύνσεις, εξυπηρετώντας ομάδες συσκευών με μειωμένη αλληλοπαρεμβολή. Σε IoT σενάρια, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η βελτιστοποίηση δέσμης μέσω IRS μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα, ιδίως όταν συνδυάζεται με σχήματα ενεργειακής τροφοδοσίας ή με περιορισμούς ισχύος στις συσκευές [7]. Η IRS δεν αίρει οριστικά το πρόβλημα της παρεμβολής, προσθέτει ωστόσο έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας στον χωρικό έλεγχο.

Ένα δεύτερο, ίσως ακόμη πιο κρίσιμο, όφελος στα βιομηχανικά περιβάλλοντα είναι η αξιοπιστία. Οι βιομηχανικές εφαρμογές, ειδικά σε αυτοματισμούς και έλεγχο μηχανημάτων, κινούνται προς απαιτήσεις URLLC, όπου μικρές διακοπές σύνδεσης είναι πρακτικά μη αποδεκτές. Οι IRS μπορούν να λειτουργήσουν ως μηχανισμός δημιουργίας εναλλακτικών διαδρομών, προσφέροντας «backup» μονοπάτια όταν η κύρια διαδρομή εξασθενεί στιγμιαία λόγω κίνησης μηχανημάτων ή αλλαγής γεωμετρίας. Η έννοια αυτή συνδέεται άμεσα με το



όραμα των smart radio environments, όπου το δίκτυο δεν ανέχεται παθητικά τις μεταβολές του χώρου αλλά αντιδρά, αναδιαμορφώνοντας το κανάλι [2]. Και επειδή η IRS είναι παθητική, δεν εισάγει πρόσθετο ενεργό θόρυβο από ενισχυτές, κάτι που σε περιβάλλοντα με ήδη υψηλό ηλεκτρομαγνητικό «φορτίο» είναι καθόλου αμελητέο [6].

Παράλληλα, το ζήτημα της διαχείρισης και του ελέγχου είναι ιδιαίτερα απαιτητικό σε εργοστάσια. Οι μεταβολές του καναλιού μπορεί να είναι γρήγορες, αλλά και ιδιόμορφες: όχι μόνο χρήστες κινούνται, κινείται και το ίδιο το περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι τεχνικές εκτίμησης καναλιού και αναπροσαρμογής ρυθμίσεων πρέπει να είναι αποδοτικές και χαμηλής καθυστέρησης, αλλιώς η IRS χάνει την αξία της ακριβώς τη στιγμή που τη χρειάζεται περισσότερο [8]. Σε πρακτικές υλοποιήσεις, λοιπόν, η εφαρμογή σε βιομηχανικά περιβάλλοντα συχνά συνδέεται με πιο «ελαφριές» μορφές διαχείρισης, όπως codebook-based επιλογές ή προσεγγιστικές στρατηγικές, ώστε η επιφάνεια να ανταποκρίνεται σε πραγματικό χρόνο χωρίς υπερβολικό υπολογιστικό βάρος [2], [8].

Συνολικά, οι IRS σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις λειτουργούν ως τεχνολογία σταθεροποίησης και ελέγχου: μειώνουν τις χωρικές αστάθειες του καναλιού, ενισχύουν κρίσιμους συνδέσμους και επιτρέπουν τη συστηματική διαμόρφωση της διάδοσης σε ένα περιβάλλον όπου η τυχαιότητα της σκέδασης αποτελεί τον κανόνα. Η συμβολή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για βιομηχανικά πρότυπα επόμενης γενιάς που απαιτούν αυξημένη αξιοπιστία.

4.3 Εσωτερικοί Χώροι (Κτίρια, Γραφεία, Σπίτια)

Στους εσωτερικούς χώρους, η ασύρματη κάλυψη συχνά παρουσιάζει διακυμάνσεις που δεν είναι άμεσα εμφανείς. Ένα δωμάτιο μπορεί να διαθέτει επαρκές Wi-Fi, ενώ ένα γειτονικό χώρο εμφανίζει σημαντικά μειωμένο σήμα. Ένας διάδρομος λειτουργεί ικανοποιητικά, μια γωνία μιας αίθουσας όχι. Τοίχοι, έπιπλα, μεταλλικές επιφάνειες και κινήσεις ανθρώπων δημιουργούν ένα μεταβλητό μοτίβο πολυοδικής διάδοσης, στο οποίο η μέση κάλυψη μπορεί να είναι ικανοποιητική, αλλά οι τοπικές αστοχίες είναι συχνές. Σε αυτές τις συνθήκες, η εισαγωγή IRS αλλάζει την προσέγγιση: αντί να βελτιωθεί ο πομπός, βελτιώνεται η ίδια η γεωμετρία της διάδοσης [1], [6].

Σε κτίρια και γραφεία, μια βασική εφαρμογή είναι η στοχευμένη ενίσχυση του σήματος σε ζώνες υψηλής ζήτησης. Σε έναν open-plan χώρο, για παράδειγμα, μια IRS μπορεί να κατευθύνει μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας προς περιοχές με συγκέντρωση χρηστών ή IoT συσκευών, αντί το σήμα να διαχέεται με τρόπο που ευνοεί περισσότερο τα τυχαία μονοπάτια. Αυτό έχει διπλό αποτέλεσμα: αυξάνει την ωφέλιμη ισχύ εκεί που χρειάζεται και μειώνει τη



«διαρροή» σε άλλους χώρους, άρα περιορίζει και τη δια-δωματιακή παρεμβολή σε περιβάλλοντα με πολλά γειτονικά δίκτυα [2]. Η εσωτερική διάδοση είναι συχνά τόσο πολυμονοπαθής που αυτή η μορφή κατευθυνόμενης ενίσχυσης μπορεί να κάνει αισθητή διαφορά χωρίς αλλαγή του access point.

Σε μεγάλα εσωτερικά venues, όπως αεροδρόμια, εμπορικά κέντρα, συνεδριακά κέντρα ή αμφιθέατρα, η πρόκληση είναι κυρίως η ετερογένεια κάλυψης: υπάρχουν περιοχές με ισχυρό σήμα και άλλες με σκιάσεις λόγω γεωμετρίας ή πλήθους. Οι IRS μπορούν να ενσωματωθούν σε οροφές ή δομικές επιφάνειες ώστε να διαμορφώνουν το πεδίο ανάλογα με την κατανομή των χρηστών. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε mmWave ζώνες, όπου η απουσία οπτικής επαφής οδηγεί σε απότομη υποβάθμιση. Με κατάλληλο passive beamforming, η IRS μπορεί να δημιουργήσει σταθερότερο ανακλώμενο μονοπάτι και να αποκαταστήσει αξιόπιστη σύνδεση σε «σκιερές» θέσεις [6]. Η βιβλιογραφία στο ευρύτερο πλαίσιο των smart radio environments ενισχύει ακριβώς αυτό το επιχείρημα: η κάλυψη σε δύσκολα σημεία δεν χρειάζεται πάντα νέους σταθμούς, μπορεί να χρειάζεται «έξυπνες επιφάνειες» [2].

Στα smart homes και γενικότερα σε εσωτερικά IoT δίκτυα, το ζήτημα συχνά μετατοπίζεται προς την κατανάλωση ενέργειας. Πολλοί αισθητήρες λειτουργούν με μπαταρία και εκπέμπουν με πολύ χαμηλή ισχύ. Όταν η σύνδεση είναι οριακή, είτε η συσκευή αυξάνει ισχύ (και μειώνει διάρκεια ζωής) είτε αποτυγχάνει να επικοινωνήσει αξιόπιστα. Μια IRS, ακόμη και μικρής κλίμακας, μπορεί να ενισχύσει το διαθέσιμο σήμα προς την πύλη, επιτρέποντας χαμηλότερη ισχύ εκπομπής ή μεγαλύτερη εμβέλεια χωρίς ανάγκη για ενεργούς επαναλήπτες [1], [6]. Σε σενάρια όπου συνυπάρχουν και απαιτήσεις ασύρματης τροφοδοσίας, η δυνατότητα χωρικής εστίασης ενέργειας καθιστά την IRS ακόμη πιο ελκυστική, ειδικά όταν συνδέεται με SWIPT αρχιτεκτονικές [7].

Σε κάθε περίπτωση, στους εσωτερικούς χώρους οι IRS προτείνουν μια διαφορετική προσέγγιση: αντί προσθήκης νέων πομπών ή αύξησης της ισχύος, αξιοποιείται ο ίδιος ο χώρος ως ενεργό στοιχείο της υποδομής. Με την προσέγγιση αυτή, οι δομικές επιφάνειες παύουν να αποτελούν εμπόδιο διάδοσης και ενσωματώνονται στην υποδομή του δικτύου. Αυτό αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά αποτελέσματα της τεχνολογίας [2], [6].

4.4 Κινητές Πλατφόρμες: Δορυφόροι και UAV

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες κατευθύνσεις εφαρμογής των IRS εμφανίζεται όταν η ίδια η επιφάνεια παύει να είναι σταθερή. Η ιδέα του «κινούμενου ανακλαστήρα» είτε επάνω σε UAV είτε ως μέρος ενός ευρύτερου δορυφορικού σεναρίου μεταφέρει την έννοια του έξυπνου



περιβάλλοντος σε τρεις διαστάσεις. Εδώ δεν διαμορφώνεται μόνο το κύμα, διαμορφώνεται και η γεωμετρία της διάδοσης [2], [6].

Στην περίπτωση των UAV, η χρήση μιας ελαφριάς μεταεπιφάνειας μετατρέπει το drone σε παθητικό, ενεργειακά αποδοτικό ανακλαστήρα. Ένα UAV μπορεί να τοποθετηθεί σε σημείο όπου η γραμμή ορατότητας μεταξύ σταθμού βάσης και χρηστών διακόπτεται από εμπόδια, λειτουργώντας ως «ιπτάμενη γωνία κτιρίου». Σε αντίθεση με έναν ενεργό αναμεταδότη, που θα απαιτούσε RF αλυσίδα, ενισχυτές και υψηλή κατανάλωση ενέργειας από τη μπαταρία του UAV, μια IRS προσθέτει ελάχιστο βάρος και σχεδόν αμελητέα ενεργειακή απαίτηση [1], [6].

Το ενδιαφέρον σε τέτοια σενάρια δεν περιορίζεται μόνο στις φάσεις της IRS. Εμφανίζεται ένα νέο, πολυδιάστατο πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου πρέπει να επιλεγεί ταυτόχρονα η βέλτιστη θέση ή τροχιά του UAV και οι ρυθμίσεις της επιφάνειας. Η γεωμετρία της διάδοσης γίνεται μεταβλητή. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι ο συνδυασμός UAV και IRS μπορεί να αυξήσει σημαντικά την πιθανότητα κάλυψης και τον λόγο SNR σε περιοχές χωρίς υποδομές, ιδίως σε σενάρια έκτακτης ανάγκης ή προσωρινών εκδηλώσεων όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη σταθερή υποδομή [2]. Η IRS δεν αντικαθιστά τον σταθμό βάσης επιτρέπει όμως στο UAV να λειτουργεί ως ευέλικτος αναδιαμορφωτής του καναλιού.

Στον τομέα των δορυφορικών επικοινωνιών, η χρήση IRS εξετάζεται κυρίως ως μέσο ενίσχυσης των uplink/downlink ζεύξεων για IoT εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Οι δορυφορικές ζεύξεις χαρακτηρίζονται από μεγάλες αποστάσεις και σημαντικές εξασθενήσεις, κάτι που καθιστά την απευθείας επικοινωνία μικρών αισθητήρων ιδιαίτερα δύσκολη. Μια επίγεια IRS, τοποθετημένη σε σημείο με καλή οπτική επαφή προς τον ουρανό, μπορεί να λειτουργήσει ως παθητικός συγκεντρωτής ενέργειας, ανακλώντας συντονισμένα τα σήματα πολλών συσκευών προς έναν δορυφόρο χαμηλής τροχιάς (LEO) [5].

Προσομοιώσεις σε τέτοια σενάρια έχουν δείξει μετρήσιμη αύξηση του SNR στον δορυφόρο, της τάξης μερικών dB, καθώς και βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας και μείωση παρεμβολών. Αυτή η βελτίωση, παρότι φαινομενικά μικρή, είναι κρίσιμη για συστήματα IoT όπου οι συσκευές εκπέμπουν με ελάχιστη ισχύ και η αξιοπιστία της ζεύξης καθορίζει την ίδια τη βιωσιμότητα της εφαρμογής. Σε αγροτικές ή απομονωμένες περιοχές, μικρές IRS τοποθετημένες σε υψώματα, πύργους ή στέγες μπορούν να διασφαλίσουν ότι τα δεδομένα από αισθητήρες θα φτάσουν αξιόπιστα στον δορυφόρο, χωρίς ανάγκη για ενεργούς επαναλήπτες [5], [6].



Η ίδια λογική μπορεί να επεκταθεί και σε κινούμενα οχήματα. Ένα λεωφορείο, ένα τρένο ή ακόμη και ένα πλοίο μπορούν να φέρουν IRS στην εξωτερική τους επιφάνεια. Καθώς κινούνται, λειτουργούν ως μετακινούμενοι παθητικοί αναμεταδότες, βελτιώνοντας τη σύνδεση τόσο των επιβατών όσο και των γύρω χρηστών. Σε θαλάσσια περιβάλλοντα, όπου η κίνηση του πλοίου μεταβάλλει συνεχώς τη γεωμετρία της ζεύξης με τον δορυφόρο, η δυναμική ρύθμιση φάσης της IRS μπορεί να αντισταθμίσει αυτές τις μεταβολές, διατηρώντας σταθερότερη την επικοινωνία [2].

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, το ενδιαφέρον δεν εξαντλείται στο γεγονός ότι η IRS προσαρμόζεται στην κίνηση. Σημαντικότερο είναι ότι η κίνηση εντάσσεται οργανικά στον σχεδιασμό του καναλιού. Η διάδοση παύει να αντιμετωπίζεται ως στατική γεωμετρική συνθήκη και αντιμετωπίζεται ως μεταβλητή που μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο. Πρόκειται για ένα από τα πιο ριζοσπαστικά στοιχεία της εφαρμογής των IRS σε κινητές πλατφόρμες [1], [6].

5. Ενεργειακή αποδοτικότητα και πράσινες επικοινωνίες με χρήση IRS



Ένα από τα ισχυρότερα επιχειρήματα υπέρ της ενσωμάτωσής των Intelligent Reflecting Surfaces στα μελλοντικά δίκτυα 6G αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα και τον ρόλο τους σε μια πιο βιώσιμη αρχιτεκτονική επικοινωνιών. Η αυξανόμενη πυκνότητα σταθμών βάσης, η εκρηκτική αύξηση της κίνησης δεδομένων και η διείσδυση ενεργοβόρων τεχνολογιών, όπως το massive MIMO και οι mmWave ζεύξεις, έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάγκη για “green communications” δεν αποτελεί πλέον θεωρητική κατεύθυνση, αλλά πρακτική απαίτηση.

Οι IRS προτείνουν μια διαφορετική φιλοσοφία. Αντί να αυξάνεται η ισχύς εκπομπής ή να προστίθενται νέοι ενεργοί κόμβοι για την αντιμετώπιση απωλειών και σκίασης, τροποποιείται το ίδιο το περιβάλλον διάδοσης. Η επιφάνεια, αποτελούμενη από παθητικά ή ημι-παθητικά στοιχεία, ανακατευθύνει την ενέργεια εκεί όπου απαιτείται, χωρίς να εισάγει ενεργό ενίσχυση και χωρίς να προσθέτει θερμικό θόρυβο [1], [2]. Η διαφορά είναι ουσιώδης: το ενεργειακό αποτύπωμα μιας IRS εξαρτάται κυρίως από το κύκλωμα ελέγχου και όχι από αλυσίδες RF υψηλής κατανάλωσης.

Η βασική ενεργειακή λογική πίσω από τις IRS μπορεί να συνοψιστεί ως εξής. Σε ένα συμβατικό σύστημα, για να βελτιωθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο σε έναν χρήστη που βρίσκεται σε σκίαση, αυξάνεται η ισχύς εκπομπής ή εγκαθίσταται ένας ενεργός αναμεταδότης. Και οι δύο λύσεις συνεπάγονται σημαντική κατανάλωση. Αντιθέτως, μια IRS μπορεί να ανακατευθύνει την υφιστάμενη ισχύ προς τον χρήστη, επιτυγχάνοντας κέρδος τάξης N^2 υπό ιδανική φασική ευθυγράμμιση [6]. Το κέρδος αυτό μεταφράζεται άμεσα σε δυνατότητα μείωσης της εκπεμπόμενης ισχύος του σταθμού βάσης για την ίδια ποιότητα υπηρεσίας.

Η βιβλιογραφία έχει επισημάνει ότι σε σενάρια multi-user επικοινωνίας, η από κοινού βελτιστοποίηση ενεργού και παθητικού beamforming μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ιδίως όταν υπάρχουν περιορισμοί ποιότητας υπηρεσίας (QoS) [11]. Η IRS επιτρέπει την επίτευξη των ίδιων ρυθμών μετάδοσης με χαμηλότερη συνολική ισχύ εκπομπής, γεγονός που ενισχύει την ενεργειακή αποδοτικότητα σε επίπεδο συστήματος.

Παράλληλα, σε IoT περιβάλλοντα με SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer), η χρήση IRS έχει προταθεί ως μέσο ταυτόχρονης ενίσχυσης της πληροφορίας και της μεταφερόμενης ενέργειας, βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή ισορροπία του δικτύου [3]. Η δυνατότητα κατεύθυνσης ενέργειας σε κόμβους χαμηλής ισχύος χωρίς αύξηση εκπομπής δημιουργεί νέες προοπτικές για ενεργειακά αυτόνομα IoT οικοσυστήματα.



Ωστόσο, η ενεργειακή αποδοτικότητα των IRS δεν είναι απόλυτη έννοια. Η ανάλυση πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση του ελεγκτή, τα κυκλώματα μεταγωγής φάσης, καθώς και την πολυπλοκότητα της εκτίμησης καναλιού. Όπως επισημαίνεται στη σχετική βιβλιογραφία, η πραγματική συνεισφορά των IRS σε sustainable 6G εξαρτάται από τη σωστή εκτίμηση του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου και όχι μόνο από τη μείωση της ισχύος εκπομπής [4].

5.1 IRS έναντι Active Relays: Ανάλυση Κατανάλωσης και Ενεργειακής Απόδοσης

Αρχικά πρέπει να επισημανθεί ότι οι ενεργοί αναμεταδότες παρουσιάζουν σημαντικό ενεργειακό κόστος. Η διαδικασία λήψης, ενίσχυσης και επανεκπομπής συνεπάγεται την ύπαρξη πλήρους RF αλυσίδας, μετατροπών A/D–D/A, κύκλου συγχρονισμού και επεξεργασίας σήματος (DSP). Το ενεργειακό αυτό αποτύπωμα μεταφράζεται σε αυξημένη απαίτηση τροφοδοσίας, ιδιαίτερα όταν αυξάνεται ο αριθμός των relays ή η συχνότητα λειτουργίας μετατοπίζεται σε mmWave ζώνες.

Αντιθέτως, η IRS δεν ενισχύει το σήμα. Δεν διαθέτει δυνατότητα λήψης ή επανεκπομπής με την κλασική έννοια· λειτουργεί μέσω αναδιαμόρφωσης των φάσεων των στοιχείων της, ισοδύναμα με τη χωρική αναδιάταξη ανακλαστικών επιφανειών. Το μόνο ενεργό μέρος είναι ο ελεγκτής που ρυθμίζει τα meta-atoms. Έτσι, η συζήτηση μετατοπίζεται από την ενίσχυση ισχύος στην ευθυγράμμιση γεωμετρίας [1], [2].

Τώρα, η ενεργειακή απόδοση bit ανά Joule πατά σε δύο βάρκες: ρυθμός μετάδοσης και συνολική κατανάλωση. Με έναν relay ο ρυθμός εκτινάσσεται μαζί του, δυστυχώς, εκτινάσσεται και η κατανάλωση. Με μια IRS, η αύξηση ρυθμού έρχεται επειδή το SNR βελτιώνεται, ενώ το ρεύμα μένει σχεδόν ατάραχο. Σε περιβάλλοντα πολλών χρηστών, με σφιχτά QoS, η κοινή βελτιστοποίηση ενεργού–παθητικού beamforming έχει δείξει ότι μπορεί να πετύχει τον ίδιο στόχο με σαφώς μικρότερη εκπομπή ισχύος από αντίστοιχες relay-based λύσεις [11].

Επιπλέον, κάθε relay εισάγει επιπλέον θερμικό θόρυβο, ενδογενές κόστος της ενεργής ενίσχυσης. Η IRS, λόγω της παθητικής φύσης της, δεν προσθέτει αξιοσημείωτο θόρυβο [6]. Σε κανάλια χαμηλού SNR, αυτό αποτελεί σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα.



Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η σύγκριση δεν είναι μονοσήμαντη. Σε ιδιαίτερα μεγάλες αποστάσεις ή σε συνθήκες ακραίας εξασθένισης, ένας ενεργός relay ενδέχεται να αποδειχθεί χρησιμότερος, καθώς η IRS δεν παράγει νέα ενέργεια. Επιπλέον, η απόδοση της επιφάνειας εξαρτάται από την ακρίβεια εκτίμησης καναλιού και τον αλγόριθμο φασικής βελτιστοποίησης [12]. Σφάλματα σε αυτά τα στάδια μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα θεωρητικά κέρδη.

Τέλος, η κλιμάκωση: περισσότερα στοιχεία στην IRS σημαίνει μεγαλύτερο θεωρητικό κέρδος κι άλλο τόσο overhead ελέγχου, κι άλλο training. Σε mmWave, όπου το κανάλι είναι αραιό και επιτρέπει συμπιεσμένες τεχνικές εκτίμησης [5], μπορεί να κρατηθεί το training υπό έλεγχο αλλιώς το όφελος ροκανίζεται.

Συνοπτικά, η παθητική IRS υπερέχει όταν κριτήριο είναι η ενεργειακή κατανάλωση, ενώ ο ενεργός αναμεταδότης υπερέχει όταν το σήμα έχει εξασθενήσει σημαντικά σε σχέση με τον θόρυβο. Η επιλογή μεταξύ των δύο εξαρτάται από το σενάριο, την απόσταση, την ακρίβεια εκτίμησης καναλιού και τους ενεργειακούς περιορισμούς.

5.2 Ρόλος των IRS σε Sustainable 6G και Πράσινες Αρχιτεκτονικές

Η συζήτηση περί 6G δεν περιορίζεται σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης ή χαμηλότερη καθυστέρηση. Ένα από τα κεντρικά αφηγήματα της νέας γενιάς δικτύων είναι η βιωσιμότητα. Τα μελλοντικά συστήματα καλούνται να προσφέρουν αυξημένη απόδοση με μειωμένο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Intelligent Reflecting Surfaces προβάλλουν όχι απλώς ως τεχνολογική καινοτομία, αλλά ως δομικό στοιχείο ενός “προγραμματιζόμενου” και ενεργειακά ευφυούς ραδιοπεριβάλλοντος [2].

Η βασική ιδέα είναι απλή αλλά ριζική: αντί να αυξάνεται συνεχώς η ισχύς εκπομπής ή ο αριθμός ενεργών σταθμών βάσης, το ίδιο το περιβάλλον διάδοσης μετατρέπεται σε ελεγχόμενο μέσο. Όπως επισημαίνεται στις θεμελιώδεις εργασίες του πεδίου, η μετάβαση από “transmit-centric” σε “environment-centric” σχεδιασμό επιτρέπει τη βελτίωση της φασματικής και ενεργειακής αποδοτικότητας χωρίς εκθετική αύξηση της κατανάλωσης [1], [2]. Το περιβάλλον παύει να είναι εχθρικός ή τυχαίος παράγοντας και μετατρέπεται σε συνεργαζόμενο στοιχείο του συστήματος.

Στα sustainable 6G σενάρια, όπου προβλέπεται μαζική συνδεσιμότητα IoT συσκευών, αισθητήρων και edge υποδομών, η ενεργειακή αποδοτικότητα ανά bit αποκτά στρατηγική σημασία. Οι IRS μπορούν να μειώσουν την απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ του σταθμού βάσης, βελτιώνοντας το SNR μέσω παθητικής εστίασης ή steering, χωρίς την εγκατάσταση



επιπλέον ενεργών κόμβων [9]. Σε multi-user περιβάλλοντα με QoS περιορισμούς, έχει αποδειχθεί ότι η κατάλληλη joint βελτιστοποίηση active-passive παραμέτρων επιτρέπει τη διατήρηση στόχων ρυθμού με σημαντικά χαμηλότερη συνολική ισχύ εκπομπής [11].

Η βιωσιμότητα δεν αφορά μόνο την κατανάλωση κατά τη λειτουργία, αλλά και τον κύκλο ζωής των υποδομών. Οι active relays και οι μικρο-σταθμοί βάσης απαιτούν συνεχή τροφοδοσία, συντήρηση και συχνά ψύξη. Αντίθετα, μια IRS αποτελεί επίπεδη, χαμηλής κατανάλωσης επιφάνεια που μπορεί να ενσωματωθεί σε υφιστάμενες κατασκευές, όπως κτίρια ή εσωτερικούς χώρους. Η παθητική φύση της μειώνει τόσο το λειτουργικό κόστος όσο και τις ανάγκες υποστήριξης. Αυτή η ιδιότητα την καθιστά ελκυστική για large-scale deployments σε αστικές περιοχές, όπου η ενεργειακή αποδοτικότητα συνδέεται άμεσα με το ανθρακικό αποτύπωμα.

Επιπλέον, σε δίκτυα 6G που θα συνδυάζουν επίγειες και δορυφορικές επικοινωνίες, οι IRS μπορούν να συμβάλουν στη βελτιστοποίηση της ζεύξης χωρίς ενεργή αναμετάδοση. Σε σενάρια satellite-IoT, η ανακατεύθυνση και ενίσχυση uplink σημάτων μέσω επιφανειών μπορεί να βελτιώσει τη συνδεσιμότητα απομακρυσμένων συσκευών με ελάχιστη πρόσθετη κατανάλωση [6]. Η έννοια της “ενεργειακής ενίσχυσης μέσω γεωμετρίας” αποκτά εδώ πρακτική σημασία.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση IRS σε sustainable 6G δεν είναι αυτόματη. Η ενεργειακή ωφέλεια εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων εκτίμησης και βελτιστοποίησης. Εάν το training overhead είναι υψηλό ή αν οι ρυθμίσεις δεν προσαρμόζονται έγκαιρα σε δυναμικά περιβάλλοντα, το καθαρό ενεργειακό κέρδος μειώνεται [5], [12]. Η πρόκληση επομένως δεν είναι μόνο υλική αλλά και αλγοριθμική.

Οι IRS εντάσσονται οργανικά στο όραμα ενός 6G που δεν θα μετριέται αποκλειστικά σε Gbps, αλλά σε Joule ανά bit και σε περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανά χρήστη. Η μετατόπιση από ενεργή ενίσχυση σε παθητική αναδιαμόρφωση του χώρου αποτελεί ίσως μία από τις πιο ουσιαστικές αλλαγές φιλοσοφίας στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα [1], [2], [4].

6. Πρακτικές προκλήσεις ανάπτυξης των IRS



Η μετάβαση από τη θεωρητική υπόσχεση των Intelligent Reflecting Surfaces στην πραγματική τους ανάπτυξη σε δίκτυα 5G και μελλοντικά 6G δεν είναι μια απλή διαδικασία κλιμάκωσης. Αντιθέτως, αποκαλύπτει ένα σύνολο τεχνικών, αρχιτεκτονικών και οικονομικών προκλήσεων που συχνά υποτιμώνται στις αρχικές θεωρητικές αναλύσεις. Η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι ενώ τα ιδεατά μοντέλα υποθέτουν τέλεια γνώση καναλιού, ιδανικά στοιχεία φάσης και απεριόριστη υπολογιστική ικανότητα, η πρακτική υλοποίηση απέχει αισθητά από αυτές τις συνθήκες [2], [4].

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές δυσκολίες ανάπτυξης IRS σε πραγματικά συστήματα, με έμφαση στο CSI overhead, στο control signaling, στις ατέλειες υλικού, στα σφάλματα ποσοτικοποίησης, στην κλιμάκωση κόστους και, τελικά, στα σενάρια όπου η χρήση IRS δεν αποτελεί την βέλτιστη επιλογή.

6.1 Υπερφόρτωση CSI και εκτίμηση του αλυσιδωτού (cascaded) καναλιού

Ίσως η πιο κρίσιμη πρακτική πρόκληση είναι το πρόβλημα εκτίμησης καναλιού. Σε αντίθεση με τα massive MIMO, όπου κάθε κεραία διαθέτει RF chain και μπορεί να εκτιμήσει τοπικά το CSI, μια IRS είναι παθητική. Δεν “ακούει” το κανάλι της. Δεν έχει ενεργό δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι η εκτίμηση του συνολικού cascaded καναλιού BS–IRS–user πρέπει να πραγματοποιηθεί έμμεσα [12].

Σε ένα σύστημα με N στοιχεία IRS, η πλήρης εκτίμηση απαιτεί θεωρητικά παρατήρηση N επιπλέον βαθμών ελευθερίας. Όσο το N αυξάνεται και μιλάμε για εκατοντάδες ή χιλιάδες στοιχεία το training overhead μπορεί να γίνει απαγορευτικό. Η απαίτηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με το όραμα low-latency επικοινωνιών και ultra-reliable συνδέσεων.

Οι προοδευτικές τεχνικές εκτίμησης με διακριτές μετατοπίσεις φάσης και iterative refinement μειώνουν το overhead, αλλά δεν το εξαλείφουν [12]. Αντίστοιχα, σε mmWave περιβάλλοντα έχει προταθεί η χρήση συμπιεσμένης εκτίμησης καναλιού με αξιοποίηση γωνιακής σπαρσιμότητας και deep learning [5]. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές βασίζονται σε δομικές παραδοχές του καναλιού που μπορεί να μην ισχύουν σε spatially non-stationary large IRS σενάρια.

Το πρόβλημα επιτείνεται σε near-field καθεστώτα, όπου η εκτίμηση δεν περιορίζεται σε γωνίες αλλά απαιτεί τρισδιάστατη γεωμετρική πληροφορία. Το CSI overhead αυξάνεται μη γραμμικά. Σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπου οι χρήστες κινούνται, η συνεχής επαναεκτίμηση



μπορεί να ακυρώσει μεγάλο μέρος του θεωρητικού ενεργειακού κέρδους που υπόσχεται η IRS.

Με άλλα λόγια, χωρίς αποδοτικές τεχνικές CSI acquisition, η IRS κινδυνεύει να μετατραπεί από λύση βελτιστοποίησης σε πηγή συστημικής καθυστέρησης.

6.2 Control Signaling και Αρχιτεκτονική Δικτύου

Η πρακτική λειτουργία μιας IRS δεν περιορίζεται στον φυσικό ανακλαστικό μηχανισμό της. Απαιτείται ένα πλήρες σύστημα ελέγχου που να καθορίζει τις φάσεις (και ενδεχομένως τα πλάτη) των στοιχείων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό συνεπάγεται την ύπαρξη control links μεταξύ της IRS και ενός κεντρικού ελεγκτή, συνήθως στον σταθμό βάσης ή σε edge server.

Το ερώτημα που ανακύπτει είναι απλό αλλά θεμελιώδες: ποιος ελέγχει την IRS και με ποια καθυστέρηση; Σε ένα ιδανικό σενάριο, η IRS θα ρυθμιζόταν σε κάθε μεταβολή του καναλιού. Στην πράξη, όμως, το control signaling απαιτεί μετάδοση παραμέτρων φάσης, συγχρονισμό, και πιθανώς feedback από τους χρήστες. Η καθυστέρηση στον βρόχο ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστες ρυθμίσεις, ιδιαίτερα σε κινητά σενάρια.

Η βιβλιογραφία τονίζει ότι οι IRS είναι θεωρητικά διαφανείς προς τα ανώτερα πρωτόκολλα [1], [4], όμως η ενσωμάτωσή τους σε υπάρχουσες αρχιτεκτονικές 5G/6G απαιτεί νέες οντότητες ελέγχου και μηχανισμούς signaling. Σε dense deployments, όπου μπορεί να υπάρχουν πολλαπλές IRS σε ένα κύτταρο, το πρόβλημα συντονισμού γίνεται πολυδιάστατο.

Επιπλέον, τίθεται θέμα κλιμάκωσης. Μια IRS με 2000 στοιχεία δεν μπορεί να ελέγχεται με αφελή σειριακή ενημέρωση κάθε στοιχείου. Απαιτούνται ιεραρχικές ή ομαδοποιημένες δομές ελέγχου, όπου τμήματα της επιφάνειας ρυθμίζονται συλλογικά. Αυτό, ωστόσο, μειώνει τον βαθμό ελευθερίας και ενδέχεται να περιορίσει το θεωρητικό gain.

Η ενοποίηση IRS με cloud-native 6G αρχιτεκτονικές θεωρείται πολλά υποσχόμενη [4], αλλά εισάγει εξάρτηση από edge computing και backhaul υποδομές. Η “παθητική” φύση της IRS στο RF επίπεδο δεν συνεπάγεται παθητικότητα σε επίπεδο δικτύου.



6.3 Hardware Impairments και Μη Ιδανικότητες RF

Οι περισσότερες θεωρητικές αναλύσεις υποθέτουν ιδανικά στοιχεία φάσης με πλήρη έλεγχο από 0 έως 2π και χωρίς απώλειες. Στην πράξη, όμως, κάθε meta-atom παρουσιάζει μη ιδανικότητες: πεπερασμένη ανάλυση φάσης, απώλειες ανάκλασης, μη γραμμικότητα και συχνοεξάρτηση.

Η εργασία των Shen et al. [8] καταδεικνύει ότι οι ατέλειες πομποδέκτη μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κέρδος από τη χρήση IRS. Μη ιδανικές RF αλυσίδες στον σταθμό βάσης ή στον χρήστη αλληλεπιδρούν με τις φασικές ρυθμίσεις της IRS, δημιουργώντας σφάλματα που δεν μπορούν να αγνοηθούν.

Επιπλέον, η ποσοτικοποίηση φάσης αποτελεί ουσιώδη περιορισμό. Πολλές υλοποιήσεις IRS υποστηρίζουν 1–3 bits ανάλυσης φάσης. Αυτό σημαίνει ότι η συνεχής βέλτιστη λύση που υπολογίζεται από έναν αλγόριθμο πρέπει να στρογγυλοποιηθεί σε διακριτές τιμές. Η απώλεια κέρδους μπορεί να είναι αισθητή, ιδιαίτερα σε large IRS με beam focusing.

Η συζήτηση δεν περιορίζεται στη φάση. Οι πραγματικές μεταεπιφάνειες παρουσιάζουν amplitude-phase coupling: η αλλαγή φάσης συχνά επηρεάζει και το πλάτος της ανάκλασης [6]. Έτσι, το ιδεατό μοντέλο καθαρής φασικής μετατόπισης δεν ανταποκρίνεται πλήρως στη φυσική υλοποίηση.

Τέλος, η θερμική σταθερότητα και η γήρανση υλικών αποτελούν παράγοντες που σπάνια αναφέρονται στα θεωρητικά άρθρα αλλά επηρεάζουν τη μακροχρόνια απόδοση. Μια IRS εγκατεστημένη σε εξωτερικό περιβάλλον υπόκειται σε μεταβολές θερμοκρασίας, υγρασία και μηχανικές καταπονήσεις.

6.4 Quantization Errors και Υποβάθμιση Απόδοσης

Η ποσοτικοποίηση της φάσης αποτελεί έναν από τους πιο πρακτικούς αλλά και πιο υποτιμημένους περιορισμούς των IRS. Στα περισσότερα θεωρητικά μοντέλα, οι μεταβλητές φάσης θεωρούνται συνεχείς, επιτρέποντας ιδανική ευθυγράμμιση του ανακλώμενου κύματος. Ωστόσο, σε πραγματικές υλοποιήσεις, κάθε στοιχείο υποστηρίζει περιορισμένο αριθμό διακριτών καταστάσεων, συνήθως 2 έως 8 επίπεδα φάσης.

Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση ενός προβλήματος beamforming πρέπει να προσεγγιστεί μέσω στρογγυλοποίησης. Η απώλεια κέρδους εξαρτάται από το πλήθος των bits και από το



μέγεθος της επιφάνειας. Σε μικρές IRS, η διαφορά μεταξύ συνεχούς και διακριτής φάσης μπορεί να είναι αμελητέα. Σε large IRS με near-field focusing, όμως, τα σφάλματα ποσοτικοποίησης συσσωρεύονται και οδηγούν σε μη ιδανική συγκέντρωση ενέργειας.

Η εργασία των Zheng et al. [12] αναδεικνύει ότι οι διακριτές μετατοπίσεις φάσης απαιτούν ειδικές τεχνικές progressive refinement για να προσεγγιστεί η συνεχής λύση. Ακόμη και έτσι, η απόδοση δεν ταυτίζεται πλήρως με το ιδανικό σενάριο.

Ένα επιπλέον ζήτημα είναι ότι τα σφάλματα ποσοτικοποίησης δεν είναι απλώς στατικά. Σε δυναμικά περιβάλλοντα, η συχνή επαναρύθμιση της IRS αυξάνει τη συχνότητα εμφάνισης τέτοιων σφαλμάτων. Αν η εκτίμηση καναλιού είναι ήδη ατελής, η ποσοτικοποίηση προσθέτει ένα δεύτερο επίπεδο απόκλισης. Το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να απέχει σημαντικά από τη θεωρητικά αναμενόμενη βελτίωση SNR.

Επιπλέον, σε multi-user περιβάλλοντα με QoS περιορισμούς [11], τα σφάλματα φάσης μπορούν να οδηγήσουν σε άνιση κατανομή πόρων, ευνοώντας συγκεκριμένους χρήστες εις βάρος άλλων. Η ανισορροπία αυτή δεν είναι πάντα προβλέψιμη από απλοποιημένα μοντέλα.

6.5 Κόστος, Κλιμάκωση και Οικονομικός Ρεαλισμός

Ένα από τα βασικά επιχειρήματα υπέρ των IRS είναι το χαμηλό ενεργειακό κόστος σε σύγκριση με ενεργούς αναμεταδότες [1], [2]. Ωστόσο, η οικονομική αποτίμηση μιας μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης απαιτεί προσεκτικότερη ανάλυση.

Μια large IRS με χιλιάδες στοιχεία μπορεί να είναι φθηνή σε επίπεδο meta-atom, αλλά το συνολικό σύστημα περιλαμβάνει ελεγκτές, καλωδιώσεις, backhaul για control signaling, εγκατάσταση και συντήρηση. Σε αστικό περιβάλλον, η τοποθέτηση σε προσόψεις κτιρίων συνεπάγεται νομικά και λειτουργικά ζητήματα.

Επιπλέον, η κλιμάκωση δημιουργεί αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Τα προβλήματα joint active-passive beamforming έχουν πολυπλοκότητα που αυξάνει με το πλήθος των στοιχείων. Οι two-timescale τεχνικές [11] μειώνουν την πολυπλοκότητα, αλλά δεν την εξαλείφουν.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα δεν πρέπει να εξετάζεται απομονωμένα στο RF επίπεδο. Η κατανάλωση edge servers που υπολογίζουν τις βέλτιστες φάσεις, καθώς και το signaling overhead, συμβάλλουν στο συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα. Η υπόθεση ότι οι IRS είναι «μηδενικού κόστους» ενεργειακά ισχύει μόνο στο επίπεδο εκπομπής.



Σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές, όπου οι IRS προτείνονται ως λύση επέκτασης κάλυψης [4], η συντήρηση και η ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές συνθήκες καθίστανται κρίσιμες. Η θεωρητική αποδοτικότητα δεν μεταφράζεται πάντα σε πρακτική βιωσιμότητα.

6.6 Πού δεν βοηθά το IRS Όρια της Τεχνολογίας

Παρά τη χρησιμότητά τους, οι IRS παρουσιάζουν συγκεκριμένους περιορισμούς. Όταν το κανάλι διαθέτει ήδη ισχυρή γραμμή οπτικής επαφής και επαρκές SNR, το περιθώριο βελτίωσης μειώνεται σημαντικά. Μια επιπλέον επιφάνεια μπορεί να προσθέσει μικρό αριθμό dB, χωρίς όμως να επιφέρει ουσιαστική αναβάθμιση της σύνδεσης.

Σημαντικό ζήτημα αποτελεί επίσης η ταχύτητα κινητικότητας. Σε δίκτυα όπου οι χρήστες κινούνται με υψηλή ταχύτητα (τρένα, drones, οχήματα σε αυτοκινητόδρομους), ο χρόνος συνοχής του καναλιού μειώνεται δραστικά. Η IRS απαιτεί ακριβή εκτίμηση καναλιού, ρύθμιση φάσεων και επιβεβαίωση της διαμόρφωσης. Αν τα στάδια αυτά δεν ολοκληρωθούν εντός ελάχιστων milliseconds, ο συγχρονισμός χάνεται και το θεωρητικό κέρδος εκμηδενίζεται. Η εστίαση σε near-field συνθήκες γίνεται ακόμη πιο απαιτητική σε τέτοιες περιπτώσεις.

Υπάρχουν και τα διάχυτα περιβάλλοντα, χωρίς κυρίαρχη LoS συνιστώσα λαβύρινθοι από πολλαπλές ανακλάσεις, τυχαία φάση και μικρή συσχέτιση. Εκεί το περίφημο κέρδος N^2 προϋποθέτει συνεκτική ευθυγράμμιση, κάτι που δύσκολα επιτυγχάνεται όταν το ίδιο το κανάλι αλλάζει από κύμα σε κύμα [2]. Το αποτέλεσμα; Μια IRS καταλήγει να μοιράζει την ισχύ σε τυφλές κατευθύνσεις αντί να τη συγκεντρώνει.

Τέλος, αξιοσημείωτη είναι και η επιχειρησιακή πολυπλοκότητα. Πολλαπλές επιφάνειες εντός του ίδιου δικτύου απαιτούν συντονισμό, γρήγορη λήψη αποφάσεων και σταθερό αλγόριθμο ελέγχου. Σε ορισμένες εφαρμογές, η εγκατάσταση ενός επιπλέον μικρο-σταθμού βάσης, αν και ενεργειακά πιο απαιτητική, ενδέχεται να αποδειχθεί πιο πρακτική, καθώς δεν απαιτεί εκτεταμένο orchestration.

Συμπερασματικά, η IRS αποτελεί ισχυρή τεχνολογία, αλλά όχι καθολική λύση. Λειτουργεί καλύτερα όταν το κανάλι έχει ανάγκη από εμπλουτισμό ή κατευθυντικότητα και όταν υπάρχει διαθέσιμος χρόνος για ευθυγράμμιση των φάσεων. Σε άλλες συνθήκες, οι παραδοσιακές τεχνικές παραμένουν προτιμητέες.



7. Τυποποίηση και βιομηχανική προοπτική

Κάθε νέα τεχνολογία αξιολογείται αρχικά σε επίπεδο θεωρίας και προσομοίωσης, με την τελική δοκιμασία να εντοπίζεται στη συμβατότητα με τα υπάρχοντα πρότυπα και στην αποδοχή της από κατασκευαστές και παρόχους. Για τις IRS, το ουσιαστικό ερώτημα δεν αφορά πλέον τη λειτουργικότητά τους, η οποία έχει σε μεγάλο βαθμό τεκμηριωθεί σε εργαστηριακό επίπεδο, αλλά τον τρόπο και τον χρόνο ένταξής τους σε εμπορικά δίκτυα, χωρίς διατάραξη των υφιστάμενων προτύπων.

Η ιδέα του programmable wireless environment [2] ανατρέπει μια σιωπηρή παραδοχή εκατό ετών: ότι το κανάλι είναι δεδομένο. Τώρα το ίδιο το περιβάλλον γίνεται πόρος, άρα και αντικείμενο ελέγχου. Μόνο που τα σημερινά 5G NR στηρίχτηκαν σε ενεργούς κόμβους με ξεκάθαρους ρόλους διεπαφές, σηματοδότηση, ασφάλεια όλα σχεδιασμένα γι' αυτούς. Οι IRS, παθητικές αλλά «έξυπνες», γλιστρούν έξω απ' αυτό το πλαίσιο· ούτε χρήστης ούτε σταθμός βάσης, κάπου στη μέση. Ποιος τις διαχειρίζεται; Σε ποιο επίπεδο ταιριάζει ο πίνακας ελέγχου τους;

Η διαφάνεια ως προς τα τερματικά αποτελεί θεωρητικά πλεονέκτημα, καθώς το waveform δεν τροποποιείται και τα υφιστάμενα τερματικά παραμένουν αμετάβλητα [1], [4]. Ωστόσο, ένας κόμβος που δεν είναι ορατός στο επίπεδο τερματικού απαιτεί σαφές κανονιστικό πλαίσιο. Είναι αναγκαίο να καθοριστεί ρητά ποιος θέτει περιορισμούς ισχύος, ποιος πιστοποιεί την ασφάλεια και ποιος έχει δικαίωμα απενεργοποίησης της IRS σε περίπτωση δυσλειτουργίας.

Κι έπειτα είναι ο παράγοντας οικονομία. Τα επόμενα δίκτυα –καλώς εχόντων των πραγμάτων 6G– κουβαλούν βαριά ατζέντα βιωσιμότητας. Οι IRS υπόσχονται χαμηλότερη κατανάλωση, λιγότερους ενεργούς πομπούς [1], [2]. Στους πίνακες, τα dB κέρδους κάνουν εντύπωση. Στα λογιστικά φύλλα, όμως, θα πρέπει να αποδείξουν ότι το κόστος υλικού, εγκατάστασης, αυτοματισμού ελέγχου και λογισμικού γυρίζει πίσω ως καθαρό όφελος – σε χρόνο και χρήμα.

Στη συζήτηση αυτή συμμετέχουν κατασκευαστές κεραιών, προμηθευτές FPGA και φορείς τυποποίησης, με ποικίλες θέσεις. Σε επιστημονικά και βιομηχανικά συνέδρια παρουσιάζονται αναπαραστάσεις δέσμης με υψηλή κατευθυντικότητα, ενώ ταυτόχρονα τίθενται πρακτικά τεχνικά ερωτήματα: ο απαιτούμενος αριθμός bits ανάλυσης των phase shifters, η αξιοπιστία (MTBF) του control board, και άλλες παράμετροι. Η εστίαση σε τέτοιες λεπτομέρειες υποδηλώνει ωριμότητα στη συζήτηση και μετάβαση από την επίδειξη προς τη συστηματική αξιολόγηση.



Δεν υφίσταται ακόμη οριστικός κανονιστικός φάκελος για τις IRS, ο οποίος αναμένεται πιθανότατα να διαμορφωθεί στο πλαίσιο του 3GPP ή σε αντίστοιχες ομάδες εργασίας 6G. Η διαδικασία προχωρά με προσοχή, καθώς οι εμπλεκόμενοι φορείς επιδιώκουν ισόρροπη συμμετοχή στις εξελίξεις. Όσον αφορά το χρονοδιάγραμμα, ορισμένες εκτιμήσεις τοποθετούν τις πρώτες προδιαγραφές γύρω στο 2028, ενώ άλλες προβλέπουν πιο σταδιακή υιοθέτηση. Σε κάθε περίπτωση, η ενσωμάτωση των IRS στα πρότυπα αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη μετάβαση από την ερευνητική ιδέα στη βιομηχανική υλοποίηση.

7.1 IRS και Τυποποίηση: Αναφορές σε 3GPP και Τεχνολογικές Κατευθύνσεις

Η πορεία μιας τεχνολογίας προς τη βιομηχανική υιοθέτηση περνά σχεδόν αναπόφευκτα από τους οργανισμούς τυποποίησης. Στο οικοσύστημα των κινητών επικοινωνιών, ο 3GPP αποτελεί τον βασικό φορέα που καθορίζει τις τεχνικές προδιαγραφές για LTE, 5G NR και μελλοντικά 6G συστήματα. Μέχρι σήμερα, οι IRS δεν έχουν ενσωματωθεί ως αυτόνομη κατηγορία οντότητας στα πρότυπα, ωστόσο η ιδέα των reconfigurable environments έχει αρχίσει να εμφανίζεται σε ερευνητικές μελέτες και technical reports που σχετίζονται με 6G κατευθύνσεις.

Η βασική πρόκληση έγκειται στο γεγονός ότι τα τρέχοντα πρότυπα έχουν σχεδιαστεί γύρω από ενεργούς κόμβους με σαφή λειτουργικό ρόλο: gNB, UE, relay node. Οι IRS, όντας παθητικές και χωρίς RF chains, δεν εντάσσονται άμεσα σε αυτήν τη δομή. Όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία [2], η φιλοσοφία των Smart Radio Environments απαιτεί μια επαναθεώρηση της έννοιας της “οντότητας δικτύου”. Η επιφάνεια δεν μεταδίδει, δεν λαμβάνει, αλλά επηρεάζει το κανάλι. Πρόκειται για μια οντότητα ελέγχου του φυσικού μέσου, όχι για κλασικό στοιχείο επικοινωνίας.

Αυτό δημιουργεί ερωτήματα που αγγίζουν τόσο το control plane όσο και το management plane. Ποιος διαχειρίζεται μια IRS; Ο πάροχος του δικτύου; Ο ιδιοκτήτης του κτηρίου όπου είναι εγκατεστημένη; Πώς εξασφαλίζεται ότι οι ρυθμίσεις της δεν παρεμβαίνουν σε γειτονικά δίκτυα; Τα σημερινά πρότυπα 5G δεν προβλέπουν τέτοιου τύπου δυναμική τροποποίηση του καναλιού σε επίπεδο περιβάλλοντος. Έτσι, ενώ τεχνικά μια IRS μπορεί να λειτουργεί διαφανώς και να μην απαιτεί αλλαγή στο waveform [1], η ενσωμάτωσή της σε εμπορικό δίκτυο απαιτεί σαφείς διαδικασίες signaling, authentication και orchestration.

Παράλληλα, η μετάβαση προς 6G συνοδεύεται από έννοιες όπως AI-native networks και programmable environments, όπου η δυναμική προσαρμογή του καναλιού αποτελεί βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Σε αυτό το πλαίσιο, οι IRS θεωρούνται υποψήφιες τεχνολογίες που



μπορούν να ενταχθούν σε μελλοντικές προδιαγραφές, ιδιαίτερα εφόσον συνδυάζονται με τεχνικές machine learning για αυτόνομο έλεγχο [4]. Ωστόσο, η τυποποίηση απαιτεί αποδείξεις ωριμότητας, διαλειτουργικότητας και σταθερής απόδοσης σε μεγάλης κλίμακας δοκιμές κάτι που μέχρι στιγμής βρίσκεται κυρίως στο ερευνητικό στάδιο.

Επομένως, η απουσία ρητής αναφοράς σε IRS στα βασικά πρότυπα δεν σημαίνει αδιαφορία, αλλά αντανακλά το γεγονός ότι η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη στη φάση μετάβασης από proof-of-concept σε industrial-grade υλοποίηση.

7.2 RIS έναντι Reconfigurable Intelligent Environment: Εννοιολογική και Αρχιτεκτονική Διάκριση

Καθώς η συζήτηση μετατοπίζεται από την ακαδημαϊκή έρευνα στη βιομηχανική στρατηγική, παρατηρείται και μια μεταβολή στην ορολογία. Ο όρος IRS (Intelligent Reflecting Surface) ή RIS (Reconfigurable Intelligent Surface) χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία για να περιγράψει τη φυσική επιφάνεια μεταλλικών. Ωστόσο, σε πιο πρόσφατες μελέτες εισάγεται η έννοια του Reconfigurable Intelligent Environment (RIE), η οποία υπερβαίνει την ίδια την επιφάνεια και περιγράφει ένα ολιστικό οικοσύστημα ελέγχου του ραδιοπεριβάλλοντος [2].

Η διάκριση αυτή δεν είναι απλώς γλωσσική. Η IRS αποτελεί το φυσικό στοιχείο τη μεταεπιφάνεια με ρυθμιζόμενες φάσεις. Το RIE, αντιθέτως, περιλαμβάνει τον ελεγκτή, τα συστήματα εκτίμησης καναλιού, τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης και την ενοποίηση με το core network. Με άλλα λόγια, η IRS είναι το hardware το RIE είναι το σύστημα.

Από βιομηχανική σκοπιά, αυτή η διάκριση έχει σημασία. Οι πάροχοι δικτύων δεν επενδύουν απλώς σε “επιφάνειες”, αλλά σε λύσεις end-to-end που ενσωματώνονται σε υπάρχουσες αρχιτεκτονικές. Όπως τονίζεται στο [4], η επιτυχία της τεχνολογίας εξαρτάται από την ικανότητά της να ενταχθεί σε frameworks αυτοματοποιημένης διαχείρισης πόρων, network slicing και AI-based optimization. Μια απομονωμένη επιφάνεια χωρίς ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου δεν αποτελεί βιώσιμο εμπορικό προϊόν.

Επιπλέον, το RIE εισάγει ζητήματα συντονισμού πολλαπλών επιφανειών. Σε ένα αστικό περιβάλλον, ενδέχεται να συνυπάρχουν δεκάδες IRS εγκατεστημένες σε διαφορετικά σημεία. Η ανεξάρτητη λειτουργία τους μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες παρεμβολές ή μη βέλτιστες ρυθμίσεις. Συνεπώς, απαιτείται κεντρικός ή κατακεντρωμένος συντονισμός μια μορφή “control layer” για το φυσικό περιβάλλον. Αυτή η λογική ευθυγραμμίζεται με το όραμα των



Smart Radio Environments [2], αλλά σε πρακτικό επίπεδο απαιτεί σημαντική επένδυση σε λογισμικό και διαλειτουργικά πρωτόκολλα.

Ένα ακόμη σημείο διαφοροποίησης αφορά την ευθύνη και το ownership. Εάν μια IRS εγκατασταθεί σε ιδιωτικό κτήριο, ποιος έχει δικαίωμα ελέγχου της; Ο πάροχος; Ο ιδιοκτήτης; Σε επίπεδο RIE, η επιφάνεια αντιμετωπίζεται ως δικτυακός πόρος, παρόμοιος με edge computing node. Αυτό όμως προϋποθέτει κανονιστικό πλαίσιο και σαφείς συμφωνίες συνεργασίας, στοιχεία που σήμερα δεν έχουν ακόμη πλήρως διαμορφωθεί.

7.3 Γιατί οι IRS δεν έχουν ακόμη υιοθετηθεί ευρέως από τη βιομηχανία

Παρά την εντυπωσιακή ερευνητική δραστηριότητα των τελευταίων ετών και τα πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα σε επίπεδο θεωρητικής απόδοσης, οι IRS δεν έχουν ακόμη μετατραπεί σε ευρέως υιοθετημένη εμπορική τεχνολογία. Η απόσταση ανάμεσα στο proof-of-concept και στην πραγματική δικτυακή ανάπτυξη παραμένει αισθητή. Και οι λόγοι είναι πολλαπλοί.

Πρώτον, η αβεβαιότητα ως προς το επιχειρηματικό μοντέλο. Ένας πάροχος κινητής τηλεφωνίας επενδύει σε τεχνολογίες που αποδίδουν σαφή και μετρήσιμη αύξηση εσόδων ή μείωση κόστους. Αν και η IRS μπορεί να βελτιώσει το SNR και να μειώσει την απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύ [1], [9], δεν είναι ακόμη σαφές σε ποιο βαθμό αυτή η βελτίωση μεταφράζεται σε απτή οικονομική υπεραξία σε σύγκριση με εναλλακτικές λύσεις, όπως μικροκυστέλες, active relays ή επιπλέον φασματικούς πόρους. Η βιβλιογραφία τονίζει το ενεργειακό πλεονέκτημα έναντι ενεργών αναμεταδοτών [2], αλλά η συνολική εξοικονόμηση εξαρτάται από το πλήρες σύστημα ελέγχου και όχι μόνο από την παθητική επιφάνεια.

Δεύτερον, η πολυπλοκότητα ενσωμάτωσης. Όπως έχει αναλυθεί, η αποτελεσματική αξιοποίηση μιας IRS απαιτεί ακριβή εκτίμηση καναλιού και συντονισμό με το active beamforming του σταθμού βάσης [11], [12]. Σε πραγματικά δίκτυα με υψηλή κινητικότητα και δυναμική τοπολογία, η διαρκής ενημέρωση των φασικών ρυθμίσεων δημιουργεί overhead σε σηματοδότηση και επεξεργασία. Η υλοποίηση τέτοιων μηχανισμών σε μεγάλη κλίμακα δεν είναι ακόμη ώριμη τεχνολογικά.

Τρίτον, η αβεβαιότητα απόδοσης σε ρεαλιστικές συνθήκες. Πολλά θεωρητικά αποτελέσματα βασίζονται σε ιδανικές παραδοχές, όπως τέλεια ευθυγράμμιση φάσης ή αμελητέες απώλειες υλικού. Όμως η μελέτη των hardware impairments δείχνει ότι μη ιδανικές RF αλυσίδες και απώλειες μεταϋλικών μπορούν να περιορίσουν αισθητά το αναμενόμενο κέρδος [8]. Σε



εμπορικό περιβάλλον, η απόδοση πρέπει να είναι προβλέψιμη και σταθερή, όχι απλώς θεωρητικά μέγιστη.

Τέταρτον, το ζήτημα της ευθύνης και της συντήρησης. Μια IRS που τοποθετείται σε δημόσιο χώρο σε πρόσοψη κτηρίου, σε υποδομή φωτισμού ή σε σταθμό μεταφορών απαιτεί διαρκή έλεγχο, ενημέρωση firmware και πιθανή αντικατάσταση στοιχείων. Σε αντίθεση με έναν σταθμό βάσης που βρίσκεται υπό άμεσο έλεγχο του παρόχου, οι επιφάνειες ενδέχεται να είναι καταναμεμημένες σε ετερογενή περιβάλλοντα. Αυτό αυξάνει την επιχειρησιακή πολυπλοκότητα.

Τέλος, υπάρχει και το στοιχείο της τεχνολογικής ωρίμανσης. Παρότι οι IRS παρουσιάζονται συχνά ως καταλύτης για 6G [2], [4], η βιομηχανία τείνει να υιοθετεί τεχνολογίες όταν αυτές έχουν δοκιμαστεί εκτενώς σε πιλοτικές αναπτύξεις μεγάλης κλίμακας. Μέχρι στιγμής, οι περισσότερες υλοποιήσεις IRS περιορίζονται σε εργαστηριακά πρωτότυπα ή μικρής κλίμακας δοκιμές πεδίου.

Η καθυστέρηση αυτή δεν σημαίνει απαραίτητα αποτυχία. Αντιθέτως, μπορεί να ερμηνευθεί ως φυσιολογικό στάδιο ωρίμανσης. Οι IRS βρίσκονται ακόμη στη φάση μετάβασης από ερευνητική καινοτομία σε συστημική λύση. Το κρίσιμο ερώτημα δεν είναι αν θα υιοθετηθούν, αλλά πότε και υπό ποιες αρχιτεκτονικές προϋποθέσεις.

7.4 Πιθανά Μοντέλα Εμπορικής Αξιοποίησης και Ρεαλιστικά Σενάρια Υιοθέτησης

Στο πλαίσιο της εμπορικής αξιοποίησης των IRS, η εξέλιξη δεν αναμένεται ως γενικευμένη αντικατάσταση υφιστάμενων υποδομών, αλλά ως σταδιακή και στοχευμένη ενσωμάτωση σε σενάρια όπου οι κλασικές τεχνικές παρουσιάζουν υψηλό κόστος ή τεχνικούς περιορισμούς. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει περιοχές με αυξημένο ρυθμιστικό ή αισθητικό κόστος για νέους σταθμούς βάσης, όπως ιστορικά κέντρα, διατηρητέα κτήρια ή κλειστές αρένες, όπου η εγκατάσταση συμβατικού εξοπλισμού RF παρουσιάζει δυσκολίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια παθητική επιφάνεια χαμηλού προφίλ, ενσωματωμένη σε τοίχο, μπορεί να προσφέρει τα απαραίτητα επιπλέον dB χωρίς πρόσθετα καλώδια ή εκπομπή υψηλής ισχύος [1], [2], [9].

Σε βιομηχανικούς χώρους και ιδιωτικά campus περιβάλλοντα όπου ο ιδιοκτήτης ελέγχει τόσο το έδαφος όσο και τις οροφές η τεχνολογία μπορεί να ενσωματωθεί από το στάδιο της αρχιτεκτονικής μελέτης. Ο αριθμός των τερματικών είναι περιορισμένος, η γεωμετρία σχετικά σταθερή και το κόστος εκπαίδευσης καναλιού μικρότερο σε σενάρια μάλιστα όπως το SWIPT,



η ίδια επιφάνεια λειτουργεί ταυτόχρονα ως μονοπάτι δεδομένων και ως «φυλλάδιο» ενέργειας για τους αισθητήρες [3].

Ακόμη πιο ελκυστική παρουσιάζεται η προοπτική σε απομακρυσμένες IoT ζεύξεις με δορυφόρους LEO, όπου μια επίγεια IRS προσθέτει μερικά κρίσιμα dB σε περιοχές στις οποίες οποιοδήποτε άλλο σενάριο σύνδεσης αποτυγχάνει τεχνικά ή οικονομικά [6]. Η ονομαστική βελτίωση είναι μικρή, αλλά σε οριακές ζεύξεις μπορεί να μεταβάλει το αποτέλεσμα από αποτυχημένη σύνδεση σε λειτουργική.

Από επιχειρηματική σκοπιά, διατυπώνεται ολόένα συχνότερα το μοντέλο Infrastructure-as-a-Service: δημοτικές αρχές ή διαχειριστές κτιρίων επενδύουν στην εγκατάσταση επιφανειών και στη συνέχεια εκμισθώνουν τη δυνατότητα ανακατεύθυνσης σε παρόχους. Για να αναπτυχθεί μια τέτοια αγορά, απαιτούνται σαφείς διεπαφές, μηχανισμοί πιστοποίησης ασφαλείας και κανόνες διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων μεταξύ πολλών χρηστών. Στο πλαίσιο αυτό, καθοριστικός είναι ο ρόλος του 3GPP, από το οποίο αναμένονται οι κατευθύνσεις τυποποίησης για την ομαλή ένταξη των παθητικών επιφανειών στο control plane.

Παράλληλα, η συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης γίνεται όλο και πιο κρίσιμη. Μια IRS που αλλάζει κατάσταση εκατοντάδες φορές το δευτερόλεπτο δεν μπορεί να ρυθμίζεται με χειροκίνητα σενάρια, αλλά απαιτεί αυτόματο σύστημα μηχανικής μάθησης, ικανό να εξισορροπεί δυναμικά τα αντιφατικά κριτήρια κάλυψης, παρεμβολής και ενεργειακού κόστους [4]. Χωρίς ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου, η επιφάνεια κινδυνεύει να παραμείνει στατική, χωρίς αξιοποίηση των δυνατοτήτων της.

Συνολικά, η μαζική υιοθέτηση θα κριθεί από τη σύγκλιση τριών παραγόντων: αξιοπιστίας υλικού, οικονομικής αποδοτικότητας και θεσμικής τυποποίησης. Οι παράγοντες αυτοί πρέπει να ωριμάσουν συγχρόνως, καθώς η αποτυχία ωρίμανσης ενός από αυτούς δυσχεραίνει συνολικά την υιοθέτηση. Η ιστορία των ασύρματων επικοινωνιών δείχνει ότι η μετάβαση από το εργαστήριο στο πεδίο εφαρμογής αποτελεί διαδικασία μακράς διάρκειας. Παρ' όλα αυτά, με την αύξηση των πειραματικών εγκαταστάσεων και τη διαμόρφωση των πρώτων επιχειρηματικών μοντέλων, η σταδιακή ενσωμάτωση των IRS στις τυπικές υποδομές δικτύου αναμένεται να αρχίσει να υλοποιείται.



8. Πλεονεκτήματα και Ωφέλη της Τεχνολογίας IRS

Η συζήτηση γύρω από τις Intelligent Reflecting Surfaces εστιάζει συνήθως στις δυνατότητές τους. Εξίσου σημαντικό όμως είναι το τι δεν απαιτείται από αυτές. Δεν χρειάζεται να εκπέμπουν, δεν χρειάζεται να ενισχύουν και δεν χρειάζεται να ενσωματώνουν πλήρεις RF αλυσίδες. Η απουσία ενεργών στοιχείων αποτελεί στην πραγματικότητα το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους και την αφετηρία από την οποία απορρέουν τα περισσότερα οφέλη που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [1], [6].

Πρώτα απ' όλα, η κατανάλωση ενέργειας. Μια IRS αποτελείται από παθητικά στοιχεία που ανακλούν το σήμα, απαιτώντας ελάχιστη μόνο ισχύ για τα κυκλώματα ελέγχου των μεταλλικών στοιχείων. Δεν υπάρχουν ενισχυτές ισχύος, μετατροπείς RF, ADC/DAC ή πολύπλοκες αλυσίδες επεξεργασίας. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγάλη κλίμακα χωρίς ουσιαστικό ενεργειακό αποτύπωμα, κάτι που συνδέεται άμεσα με το όραμα των «πράσινων» 6G δικτύων [2]. Επιπλέον, επειδή η λειτουργία τους είναι παθητική, δεν εισάγεται πρόσθετος θερμικός θόρυβος στο σύστημα, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται ο συνολικός λόγος SNR σε σύγκριση με λύσεις ενεργών αναμεταδοτών [6].

Στενά συνδεδεμένο με αυτό είναι και το κόστος υλοποίησης. Τα μεταεπιφανειακά στοιχεία υλοποιούνται με απλές τυπωμένες δομές πάνω σε διηλεκτρικά υποστρώματα και ελάχιστα φθηνά ηλεκτρονικά εξαρτήματα ανά στοιχείο. Σε σύγκριση με την εγκατάσταση νέων σταθμών βάσης ή ενεργών αναμεταδοτών, μια IRS είναι ελαφριά, επίπεδη, διακριτική και εύκολη στην τοποθέτηση. Μπορεί να ενσωματωθεί σε τοίχους, οροφές, πινακίδες, ακόμα και σε επιφάνειες που ήδη υπάρχουν, χωρίς ανάγκη για τροφοδοσία υψηλής ισχύος ή σύνδεση backhaul. Η πρακτική αυτή ευελιξία αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο σκεφτόμαστε την επέκταση κάλυψης: αντί να «χτίζουμε» νέους κόμβους, μπορούμε να «εκπαιδεύουμε» το περιβάλλον [1], [6].

Από πλευράς απόδοσης, τα οφέλη είναι εξίσου σημαντικά. Μέσω συνεκτικής ανάκλασης, μια IRS μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ισχύ του σήματος στον δέκτη, να βελτιώσει τον ρυθμό μετάδοσης και να μειώσει περιοχές σκίασης. Η βιβλιογραφία αναφέρει αυξήσεις φασματικής απόδοσης της τάξης 30–40% και ταυτόχρονη μείωση της απαιτούμενης εκπεμπόμενης ισχύος για δεδομένο ρυθμό, όταν η IRS τοποθετείται και ρυθμίζεται κατάλληλα [1], [9]. Παράλληλα,



η δυνατότητα κατευθυνόμενης ανάκλασης επιτρέπει την καταστολή παρεμβολών μέσω καταστροφικής συμβολής, οδηγώντας σε καθαρότερα ραδιοπεριβάλλοντα με υψηλότερο SINR [2].

Ένα ιδιαίτερα κρίσιμο πλεονέκτημα είναι η προσαρμοστικότητα. Οι IRS δεν είναι στατικοί ανακλαστήρες. Είναι επαναπρογραμματιζόμενες επιφάνειες που μπορούν να αλλάζουν συμπεριφορά σε πραγματικό χρόνο, ακολουθώντας τις μεταβολές της θέσης των χρηστών ή της ζήτησης του δικτύου. Σε ώρες αιχμής, η IRS μπορεί να μεταβάλλει τις ρυθμίσεις της ανά μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου, εξυπηρετώντας εναλλάξ διαφορετικές περιοχές ή χρήστες. Σε κινούμενα σενάρια, μπορεί να προσαρμόζει ηλεκτρονικά τη γωνία ανάκλασης, υλοποιώντας δυναμικό beam steering χωρίς μηχανικά μέρη. Με αυτόν τον τρόπο, η έννοια του software-defined networking επεκτείνεται πλέον και στο ίδιο το κανάλι διάδοσης [2], [8].

Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η συμβατότητα με υπάρχουσες τεχνολογίες. Οι IRS είναι ουσιαστικά μη ορατές για τις τερματικές συσκευές, δεδομένου ότι δεν απαιτούν αλλαγές σε πρωτόκολλα ή πρότυπα επικοινωνίας. Ανακλούν οποιοδήποτε προσπίπτον σήμα, ανεξαρτήτως διαμόρφωσης ή τεχνολογίας, από LTE και 5G NR έως Wi-Fi, και από sub-6 GHz έως mmWave ή μελλοντικές THz ζώνες. Η συμβατότητα αυτή επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση σε υπάρχοντα δίκτυα και την ταυτόχρονη ενίσχυση πολλαπλών τεχνολογιών χωρίς σύγκρουση [1], [6].

Συχνά παραγνωρισμένο, αλλά σημαντικό, είναι και το όφελος σε θέματα ασφάλειας. Με κατάλληλο έλεγχο της ανάκλασης, το σήμα μπορεί να κατευθύνεται επιλεκτικά προς τον νόμιμο χρήστη, μειώνοντας την ακτινοβολία προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις και αυξάνοντας το secrecy capacity. Σε mmWave ζώνες, όπου οι δέσμες είναι ήδη στενές, η υποστήριξη από IRS μπορεί να καταστήσει ακόμη δυσκολότερη την υποκλοπή [2], [9].

Φυσικά, όλα τα παραπάνω εξαρτώνται από τον σωστό σχεδιασμό. Το μέγεθος της επιφάνειας, η ποιότητα των meta-atoms, οι απώλειες υλικών και η ακρίβεια ελέγχου των φάσεων επηρεάζουν την τελική απόδοση. Αν η IRS τοποθετηθεί σε μη βέλτιστο σημείο ή αν δεν υπάρχει επαρκής γνώση του καναλιού, τα οφέλη μπορεί να περιοριστούν. Παρ' όλα αυτά, οι περισσότερες μελέτες συγκλίνουν στο ότι, υπό ρεαλιστικές συνθήκες, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν σημαντικά των περιορισμών, καθιστώντας τις IRS μια από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες για τα δίκτυα 6G και τα έξυπνα ραδιοπεριβάλλοντα [1], [2], [6].



9. Protocol Issues και Ζητήματα MAC σε Δίκτυα με Intelligent Reflecting Surfaces

Η αναφορά στις Intelligent Reflecting Surfaces συχνά συνοδεύεται από μια έμμεση τάση: να εστιάζει σχεδόν αποκλειστικά στο Φυσικό Επίπεδο. Εκεί όπου τα οφέλη αποτυπώνονται σε καθαρές καμπύλες SINR και σε μετρήσεις throughput που εντυπωσιάζουν με την ακρίβειά τους. Οι αριθμοί δείχνουν να μιλούν από μόνοι τους. Και είναι δελεαστικό να τους αφήσει κανείς να έχουν τον τελευταίο λόγο.

Ωστόσο, ένα δίκτυο δεν ορίζεται μόνο από τη διάδοση των κυμάτων του. Λειτουργεί επίσης μέσα από χρονοθυρίδες που μοιράζονται, μέσα από μηχανισμούς πρόσβασης στο μέσο και μέσα από ουρές πακέτων που εκκενώνονται ομαλά ή συσσωρεύονται απρόσμενα. Σε αυτό το επίπεδο εμφανίζονται μηχανισμοί ιεραρχικής διαχείρισης και αποφάσεις που λαμβάνονται στο επίπεδο MAC ή στο ανώτερο control plane, χωρίς να αποτυπώνονται άμεσα στα διαγράμματα απόδοσης.

Σε αυτό το σημείο αναδύονται τα protocol issues. Όχι ως θεαματικές αστοχίες, αλλά ως λεπτές αποκλίσεις ως μικρές καθυστερήσεις που πολλαπλασιάζονται, ως επιλογές σχεδιασμού που αποκαλύπτουν τη σημασία τους εκ των υστέρων. Σχεδόν διακριτικά. Και μερικές φορές, απρόβλεπτα.

Το IRS, ως έννοια “smart radio environment”, εισάγει έναν νέο βαθμό ελευθερίας. Αλλά αυτός ο βαθμός ελευθερίας πρέπει να «κουμπώσει» σε διαδικασίες που ήδη είναι αυστηρά χρονισμένες: προγραμματισμός πόρων, σήμανση ελέγχου, ανατροφοδότηση καναλιού, ακόμη και η απλή εκκίνηση μιας μετάδοσης. Όταν η επιφάνεια αλλάζει κατάσταση, δεν αλλάζει μόνο το κανάλι αλλάζει και η υπόθεση πάνω στην οποία βασίστηκε ο scheduler πριν από λίγα ms. Και τότε το MAC, σαν να παραπονιέται, ζητά σταθερότητα ή τουλάχιστον προβλεψιμότητα. [2], [11]

Η ενσωμάτωση IRS, επομένως, δεν είναι απλώς «ένας ακόμη κόμβος». Είναι μια νέα οντότητα που επηρεάζει το link adaptation, την πολυχρηστική συμβίωση, την αποδοτικότητα του feedback και το πόσο συχνά το σύστημα πρέπει να επανα-συγχρονίζεται ως προς το CSI. Τα ίδια ζητήματα εμφανίζονται, με άλλη μορφή, σε σενάρια όπου συνυπάρχουν resource allocation στο πεδίο συχνότητας (π.χ. OFDMA) και παθητικό beamforming στο πεδίο χώρου: η βελτιστοποίηση μετακινείται από “PHY-only” σε μια αμφίθυμη περιοχή cross-layer, όπου



η λύση που είναι άριστη στο PHY μπορεί να είναι άβολη για το MAC, ή ακόμη και πρακτικά ανεφάρμοστη. [10], [11]

9.1 Cross-layer οπτική: γιατί το MAC «νοιάζεται» για το IRS

Σε ένα κλασικό κυψελωτό σύστημα, το MAC υποθέτει ότι οι μεταβλητές του PHY μεταβάλλονται, αλλά εντός συγκεκριμένων ρυθμών και διαδικασιών: υπάρχουν reference signals, CQI/CSI feedback, HARQ timing, και μια σχετικά προβλέψιμη αλυσίδα από “measure → report → schedule → transmit”. Με IRS, η αλυσίδα γίνεται: “measure → (configure IRS) → re-measure (ή έμμεση εκτίμηση) → schedule”. Ο ενδιαμέσος κρίκος είναι ο ελεγκτής της επιφάνειας. Και αυτός ο κρίκος φέρνει κόστος, καθυστέρηση, και ίσως πιο ενοχλητικό αβεβαιότητα. [12]

Το πρόβλημα δεν είναι μόνο το training overhead για εκτίμηση του cascaded καναλιού BS–IRS–UE. Είναι και το πώς αυτό το overhead «μεταφράζεται» σε MAC time: πόσες χρονοθυρίδες θα αφιερωθούν σε πιλότους, πόσο συχνά θα αλλάζουν τα IRS phase profiles, πόσο θα επηρεαστεί η ωφέλιμη χωρητικότητα όταν ο αριθμός στοιχείων είναι μεγάλος. Η βιβλιογραφία το αναγνωρίζει ως κεντρική πρακτική δυσκολία, ακριβώς επειδή η παθητική επιφάνεια δεν διαθέτει RF chains για άμεση παρατήρηση και άρα στηρίζεται σε διαδικασίες εκτίμησης που καταναλώνουν πόρους αέρα. [12]

Υπάρχει και μια δεύτερη ένταση. Ο scheduler θέλει να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες με δικαιοσύνη και αποδοτικότητα. Το IRS, όμως, τείνει να “ευνοεί” χωρικά συγκεκριμένες κατευθύνσεις, άρα και συγκεκριμένους χρήστες, ιδίως όταν επιδιώκεται ισχυρή συνεκτική ενίσχυση σε έναν στόχο. Σε multi-user σενάρια, η επιφάνεια πρέπει να μοιράσει τη χωρική της «προσοχή». Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό χωρίς συμβιβασμούς στη φασματική αποδοτικότητα ή χωρίς πιο σύνθετες λύσεις (π.χ. time-sharing των phase profiles). Και τότε το MAC καλείται να αποφασίσει: θα αλλάξω διαμόρφωση IRS ανά χρήστη; ανά ομάδα χρηστών; ανά υποπλαίσιο; [2], [11]

9.2 MAC Scheduling με IRS: απόφαση πόρων όταν το κανάλι είναι ρυθμιζόμενο

Η κλασική λογική του MAC scheduling (π.χ. proportional fair) στηρίζεται σε εκτιμήσεις ρυθμών και σε διακυμάνσεις καναλιού που θεωρούνται εξωγενείς. Με IRS, μέρος της διακύμανσης γίνεται ενδογενές. Το σύστημα μπορεί να “φτιάξει” καλύτερο κανάλι αλλά όχι δωρεάν. Έχει κόστος επαναρύθμισης και signaling. Άρα το scheduling αποκτά έναν νέο άξονα: πότε αξίζει να επαναδιαμορφώσει την επιφάνεια, και για ποιον. [2]



Σε περιβάλλον OFDMA, η κατάσταση περιπλέκεται περισσότερο, γιατί το MAC/PHY σύμπλεγμα οφείλει να κάνει ταυτόχρονα: (α) ανάθεση υποφερόντων/PRBs, (β) κατανομή ισχύος, (γ) επιλογή IRS φάσεων. Η βιβλιογραφία συχνά διατυπώνει αυτό το πρόβλημα ως joint resource allocation και passive beamforming, με μη-κυρτές μορφές και ανάγκη πρακτικών προσεγγίσεων (π.χ. two-timescale optimization). Εκεί το “two-timescale” δεν είναι απλώς μαθηματικό τέχνασμα. Είναι ένα σχεδόν MAC-friendly επιχείρημα: οι φάσεις της IRS ενημερώνονται αραιότερα (αργή κλίμακα), ενώ οι πόροι OFDMA και το precoding προσαρμόζονται συχνότερα (γρήγορη κλίμακα). Έτσι μειώνεται το control overhead, και το scheduler αναπνέει. Λίγο. [10], [11]

Παραμένει εντούτοις ένα πρακτικό ερώτημα: σε ποιον βαθμό είναι σταθερό το κέρδος μιας IRS διαμόρφωσης όταν οι χρήστες κινούνται ή όταν το περιβάλλον μεταβάλλεται; Αν ο χρόνος συνοχής του καναλιού είναι μικρός, το MAC επιβαρύνεται συνεχώς από το κόστος αναδιαμόρφωσης και εκτίμησης. Αν είναι μεγάλος, η IRS μπορεί να αντιμετωπιστεί ως semi-static infrastructure, προσέγγιση που ταιριάζει καλύτερα σε ρεαλιστικά δίκτυα. Η ενδιάμεση συμπεριφορά δεν είναι σαφώς οριοθετημένη: σε indoor σενάρια η διαχείριση είναι ευκολότερη, ενώ σε αστικά περιβάλλοντα με κινητικότητα γίνεται πιο απαιτητική [2], [12].

9.3 Control signaling και ο «κρυφός λογαριασμός» του overhead

Όσο πιο έξυπνη γίνεται η επιφάνεια, τόσο πιο πολύ μιλάμε για έλεγχο. Και ο έλεγχος, στο δίκτυο, είναι πάντα ένας φόρος: καταναλώνει πόρους, εισάγει καθυστέρηση, δημιουργεί σημεία αστοχίας. Στο IRS πλαίσιο, το control signaling αφορά τουλάχιστον τρεις ροές: (α) εντολές διαμόρφωσης της επιφάνειας (phase/amplitude states), (β) ανατροφοδότηση καναλιού (CSI ή παραλλαγές του), (γ) σηματοδότηση χρονοπρογραμματισμού προς τους χρήστες που πλέον εξαρτάται και από την κατάσταση της επιφάνειας. [1], [2]

Η πρώτη ροή, οι εντολές προς την IRS, συχνά υποτιμάται ως “out-of-band”. Στην πράξη, όμως, ακόμη κι αν το control link είναι ξεχωριστό (π.χ. ενσύρματο ή sub-6 GHz για mmWave IRS), υπάρχουν χρονικά όρια, jitter, πιθανότητες απώλειας πακέτων, και ζητήματα ασφάλειας. Και αν το control link καθυστερεί, το MAC βλέπει την επίπτωση αμέσως: schedule αποφασισμένο για ένα κανάλι που... έχει ήδη αλλάξει ή δεν άλλαξε ποτέ. Μοιάζει με μικρή τραγωδία συγχρονισμού, όχι πάντα δραματική, αλλά αρκετή για να ρίξει το HARQ efficiency. [2]



Η δεύτερη ροή, το CSI feedback, αποτελεί κλασικό πρόβλημα στα κυψελωτά δίκτυα. Με την παρουσία IRS γίνεται διπλό, καθώς συχνά πρέπει να εκτιμηθεί ένα cascaded κανάλι. Στην πράξη, διαμορφώνεται ένα trade-off: η συλλογή πληρέστερης πληροφορίας απαιτεί μεγαλύτερο overhead, ενώ ο συμβιβασμός με πιο coarse εκτιμήσεις οδηγεί σε suboptimal διαμορφώσεις. Η βιβλιογραφία αναφέρει training strategies, τεχνικές compressive sensing και μεθόδους μείωσης διάστασης, ωστόσο τα πρακτικά ερωτήματα παραμένουν ως προς τη συχνότητα, την αξιοπιστία και την καθυστέρηση της διαδικασίας [2], [3].

9.4 CSI feedback, mobility και two-timescale λογική

Σε κινητικότητα, το coherence time είναι ο φυσικός σου αντίπαλος. Αν το IRS profile ενημερώνεται γρήγορα, το overhead γίνεται δυσανάλογο. Αν ενημερώνεται αργά, τότε χάνεις μέρος του κέρδους. Έτσι εμφανίζεται σχεδόν αναγκαστικά η λογική two-timescale: η IRS διαμόρφωση αλλάζει αραιότερα (macro-level), ενώ το κλασικό scheduling/precoding προσαρμόζεται ταχύτερα (micro-level). Αυτό δεν είναι απλώς μια τεχνική βελτιστοποίησης. Είναι μια στρατηγική πρωτοκόλλου που «σέβεται» τον χρονισμό του MAC, τις διαθέσιμες διαδικασίες αναφοράς και την πραγματικότητα των control channels. [1], [4]

Στο σημείο αυτό εντοπίζεται μια ενδιαφέρουσα διττότητα. Σε ορισμένα περιβάλλοντα (π.χ. indoor, quasi-static), η IRS μπορεί να αντιμετωπιστεί ως υποδομή που ρυθμίζεται σπάνια, παρόμοια με την εγκατάσταση μιας σταθερής κεραίας. Σε άλλα περιβάλλοντα (π.χ. dense urban), η επιφάνεια λειτουργεί πιο reactive, απαιτώντας πρωτόκολλα τα οποία δεν έχουν σχεδιαστεί για τόσο συχνή αναδιαμόρφωση παθητικών στοιχείων. Συνεπώς, οι μηχανισμοί ελέγχου του δικτύου χρειάζονται προσαρμογή για να μπορούν να υποστηρίξουν μεταβολές διαμόρφωσης σε διάστημα λίγων ms [2].

9.5 Random access, αρχικοποίηση σύνδεσης και “IRS-aware” πρόσβαση

Ένα σημείο που συχνά υποτιμάται είναι το αρχικό στάδιο πρόσβασης. Πώς εισέρχεται ένας χρήστης στο δίκτυο όταν τμήμα της διάδοσης διέρχεται από μια ρυθμιζόμενη επιφάνεια; Στο 5G/NR, το random access στηρίζεται σε προκαθορισμένες ακολουθίες (preambles), σε timing advance και σε διαδικασίες ανίχνευσης και απόκρισης. Εάν η IRS βρίσκεται στον κρίσιμο διάδρομο κάλυψης, η διαμόρφωσή της επηρεάζει την ανιχνευσιμότητα των preambles. Από αυτή την παρατήρηση προκύπτει η έννοια του IRS-friendly access: είτε διατηρείται μια baseline διαμόρφωση που μεγιστοποιεί την περιοχή ανίχνευσης (broadcast-like), είτε εκτελείται περιοδική σάρωση διαμορφώσεων (beam sweeping), ώστε να μη χάνεται η ορατότητα μέρους των χρηστών [1], [5].



Στη σάρωση υπάρχει πάντα το ερώτημα του χρόνου: πόσο γρήγορα σαρώνεις χωρίς να τρως υπερβολικούς πόρους; Και πώς συνδέεται αυτό με τα PRACH occasions ή αντίστοιχους μηχανισμούς; Η απάντηση δεν είναι ενιαία εξαρτάται από το deployment και από το αν η IRS είναι συμπληρωματική ή ουσιαστικά απαραίτητη για κάλυψη. Κάποιες φορές η IRS μπορεί να είναι «πολυτέλεια» για throughput. Άλλες φορές είναι σαν γέφυρα κάλυψης. Τότε το random access δεν μπορεί να την αγνοήσει. [2]

9.6 HARQ timing, retransmissions και σταθερότητα καναλιού

Το HARQ διαθέτει συγκεκριμένους ρυθμούς, deadlines και απαιτήσεις. Εάν η IRS αλλάξει διαμόρφωση μεταξύ της αρχικής μετάδοσης και της επαναμετάδοσης, ο δέκτης ενδέχεται να αντιληφθεί διαφορετικό effective channel και να χάσει μέρος του οφέλους του soft combining. Αυτό δεν αποκλείει την αλλαγή διαμόρφωσης, αλλά απαιτεί σχεδιασμό κατάλληλης πολιτικής MAC: είτε δέσμευση της IRS configuration κατά τη διάρκεια ενός HARQ process, είτε μετάδοση πληροφορίας για την αλλαγή, προκειμένου να διατηρηθεί η συμβατότητα της αποκωδικοποίησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το control overhead αποτελεί καθοριστικό παράγοντα [1], [4].

Ένας πρακτικός κανόνας που συναντά κανείς σε προσεγγιστικές προτάσεις είναι: IRS configuration να αλλάζει σε ρυθμό πιο αργό από τον HARQ κύκλο, ή τουλάχιστον να ευθυγραμμίζεται με frame boundaries. Μπορεί να μην είναι “optimal” στο PHY, αλλά συχνά είναι αυτό που θα περάσει σε ένα πραγματικό σύστημα χωρίς να σπάσει τις υπάρχουσες αλυσίδες συγχρονισμού. [2]

9.7 Multi-user contention, παρεμβολή και «ποιος παίρνει» την επιφάνεια

Σε ένα multi-user σύστημα, η IRS δεν είναι φυσικά ιδιωτική για έναν χρήστη. Είναι κοινός πόρος. Κι εκεί το MAC μπαίνει σε γνώριμη περιοχή: σύγκρουση συμφερόντων, fairness, προτεραιότητες QoS, και μερικές φορές καθαρή πολιτική διαχείρισης πόρων. Αν η επιφάνεια ρυθμιστεί για να ενισχύσει έναν UE, μπορεί να αποδυναμώσει άλλον, ή να μετακινήσει την παρεμβολή σε διαφορετικό σημείο του χώρου. Ενώ στο PHY αυτό εκφράζεται ως optimization objective, στο MAC γίνεται operational rule: πόσο συχνά επιτρέπεις “IRS steering” προς έναν χρήστη, με τι κριτήριο, και πώς αποφεύγεις να μετατρέψεις το δίκτυο σε μηχανή ενίσχυσης των ήδη ισχυρών. [2], [11]



Μια συνηθισμένη προσέγγιση είναι το time-sharing των IRS profiles: διαφορετικές διαμορφώσεις σε διαφορετικά time slots, ώστε να εξυπηρετούνται ομάδες χρηστών. Αυτό ταιριάζει με scheduler λογικές, αλλά εισάγει latency και ενδεχομένως jitter, ιδίως για ροές χαμηλής καθυστέρησης. Αντίθετα, η προσπάθεια “multi-beam” εξυπηρέτησης μέσω μίας IRS διαμόρφωσης είναι περιορισμένη, ειδικά όταν μιλάμε για απλές binary/quantized φάσεις και όχι ιδανικές συνεχείς ρυθμίσεις. Η θεωρία δίνει ελπίδες η πράξη θυμίζει ότι η επιφάνεια έχει πεπερασμένη ικανότητα να «ευχαριστήσει» όλους ταυτόχρονα. [2]

9.8 Συνύπαρξη με OFDMA/NR scheduling και (σε άλλους κόσμους) CSMA-like μηχανισμούς

Στα κυψελωτά, το MAC είναι κεντρικά ελεγχόμενο. Αυτό βοηθά, γιατί ο σταθμός βάσης μπορεί να λειτουργήσει ως συντονιστής της IRS. Όμως, σε ετερογενή περιβάλλοντα (π.χ. ιδιωτικά δίκτυα, Wi-Fi συνύπαρξη, ή unlicensed bands), μπορεί να εμφανιστούν πιο αποκεντρωμένες λογικές πρόσβασης. Εκεί η ιδέα μιας κεντρικά ρυθμιζόμενης επιφάνειας μπορεί να έρθει σε ένταση με μηχανισμούς τύπου listen-before-talk, όπου οι αποφάσεις πρόσβασης είναι τοπικές και στοχαστικές. Το IRS μπορεί να αλλάζει το interference landscape τόσο γρήγορα, που η «αίσθηση καναλιού» πριν την εκπομπή να γίνεται λιγότερο αξιόπιστη. Δεν είναι βέβαιο ότι αυτό θα είναι κυρίαρχο πρόβλημα στα τυπικά 3GPP σενάρια, αλλά σαν σκέψη γλιστράει μέσα. [1], [2]

Ακόμη και μέσα στο NR, η συνύπαρξη πολλαπλών μηχανισμών (scheduling, beam management, link adaptation) σημαίνει ότι μια IRS-aware στρατηγική πρέπει να είναι συμβατή με υπάρχοντα time/frequency structures. Δεν μπορείς να ζητήσεις από το σύστημα να αλλάξει κάθε κανόνα. Συνήθως προτείνεται η IRS να λειτουργεί ως “semi-static beam shaping layer”, με updates σε frame-level, ώστε οι υπόλοιπες διαδικασίες (CQI reporting, HARQ, scheduling grants) να παραμένουν λειτουργικές. [2], [4]

9.9 Network-layer επιπτώσεις: routing, handover, mobility management

Πέρα από το MAC, το IRS αγγίζει και το δικτυακό επίπεδο με πιο έμμεσο τρόπο. Αν μια επιφάνεια δημιουργεί «τεχνητές» περιοχές κάλυψης, τότε οι αποφάσεις mobility (handover) επηρεάζονται. Ένας UE μπορεί να έχει υψηλό RSRP/RSRQ όχι επειδή βρίσκεται κοντά στον σταθμό βάσης, αλλά επειδή η IRS του “έφτιαξε” μονοπάτι. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε handover που φαίνεται λογικό σε επίπεδο μετρήσεων, αλλά είναι εύθραυστο αν η IRS διαμόρφωση αλλάξει ή αν ο έλεγχος της επιφάνειας χαθεί. Το δίκτυο, σαν να ζητά δεύτερη



γνώμη, χρειάζεται IRS-aware mobility policies: να ξέρει πότε μια καλή σύνδεση είναι δομικά σταθερή και πότε είναι αποτέλεσμα μιας στιγμιαίας ρύθμισης. [2], [6]

Επιπλέον, σε dense deployments, μπορεί να προκύψει η έννοια “IRS-assisted handover”: η επιφάνεια να διευκολύνει την μετάβαση σε νέο cell, κρατώντας προσωρινά σύνδεση ή ενισχύοντας σήματα αναφοράς. Αυτό είναι ενδιαφέρον, αλλά απαιτεί coordination μεταξύ cells, άρα backhaul signaling και συγχρονισμό. Κι εκεί επιστρέφουμε στην πραγματικότητα: όσο μεγαλώνει ο συντονισμός, τόσο αυξάνεται το overhead και η πολυπλοκότητα λειτουργίας. [1], [2]

9.10 QoS, slicing και προτεραιοποίηση: όταν η IRS γίνεται “programmable resource”

Σε ένα 5G/6G πλαίσιο, το δίκτυο υποστηρίζει ήδη network slicing, διαφοροποιημένο QoS και υπηρεσίες με ανομοιογενείς απαιτήσεις. Η IRS μπορεί να ενταχθεί σε αυτή τη λογική ως ένας ακόμη προγραμματιζόμενος πόρος. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι το MAC και το control plane καλούνται να δεσμεύουν μέρος της λειτουργίας της επιφάνειας για συγκεκριμένες ροές (π.χ. URLLC) ή να αποδίδουν δυναμικά προτεραιότητα σε χρήστες και υπηρεσίες. Υπάρχει ωστόσο μια εγγενής αντίφαση: η IRS είναι παθητική και δεν διαθέτει δικές της ουρές ή schedulers· κάθε πολιτική επιβάλλεται εξωτερικά. Αυτό καθιστά τον σχεδιασμό πολιτικών πιο ευαίσθητο, καθώς απαιτείται συντονισμός μεταξύ στρωμάτων με ιστορικά διακριτά όρια [1], [11].

9.11 Αρχιτεκτονική ελέγχου: IRS controller, interfaces και ελάχιστες αρχές σχεδίασης

Ένα ώριμο IRS-enabled σύστημα συνήθως υπονοεί έναν IRS controller (λογισμικό/υλικό) που δέχεται στόχους, μετατρέπει τους στόχους σε phase profiles και τα εφαρμόζει. Η αρχιτεκτονική ελέγχου μπορεί να είναι κεντρική (στο BS), κατανεμημένη (edge controller), ή ακόμη και ιεραρχική. Κάθε επιλογή έχει κόστος: latency vs scalability, απλότητα vs robustness. Η βιβλιογραφία τείνει να προτείνει πρακτικές λύσεις τύπου hierarchical control και two-timescale updates, ακριβώς επειδή η πλήρης κεντροποίηση σε πραγματικό χρόνο μπορεί να γίνει βαριά. [2], [4], [11]

Μια ελάχιστη αρχή που εμφανίζεται ως πρακτικός κανόνας είναι η εξής: “μην αφήνεις την IRS να αλλάζει πιο γρήγορα από όσο μπορεί να την καταλάβει το MAC”. Αυτό ακούγεται



σχεδόν σαν συμβουλή ανθρώπου που έχει δει συστήματα να καταρρέουν από υπερ-ευαισθησία. Και ίσως είναι. [2]

9.12 Συμπερασματική σύνθεση: τι σημαίνει “protocol issues” στην πράξη

Συνολικά, τα ζητήματα πρωτοκόλλου που αφορούν τις IRS δεν αποτελούν απλώς κατάλογο εμποδίων. Συνιστούν μετατόπιση του κέντρου βάρους από την καθαρή βελτίωση διάδοσης προς τη διαχείριση ενός νέου, κοινόχρηστου και ρυθμιζόμενου πόρου, ο οποίος επηρεάζει σχεδόν κάθε διαδικασία MAC, όπως scheduling, random access, HARQ και feedback, καθώς και μηχανισμούς υψηλότερων επιπέδων όπως mobility και QoS. Το δίκτυο, ως σύστημα, καλείται να ενσωματώσει μια προγραμματιζόμενη επιφάνεια της οποίας οι μεταβολές οφείλονται σε εξωτερικό έλεγχο [1], [2], [11].

Στο τέλος, η πιο ρεαλιστική κατεύθυνση φαίνεται να είναι IRS-aware αλλά όχι IRS-obsessed πρωτόκολλα: διαμόρφωση σε πιο αργές κλίμακες, ελεγχόμενο overhead, σαφείς πολιτικές fairness, και αρχιτεκτονική ελέγχου που δεν απαιτεί να ανακατασκευάσεις όλο το NR. Ακόμη κι αν, κατά στιγμές, θα θέλαμε να το κάνουμε. [2], [4]

10. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχείρησε να εξετάσει την τεχνολογία των Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) όχι αποσπασματικά, αλλά ως ενιαίο σύστημα ιδεών, τεχνικών, αρχιτεκτονικών επιλογών και θεωρητικών μετατοπίσεων που επηρεάζουν τον συνολικό σχεδιασμό των ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς. Καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης αναδείχθηκε ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο: η IRS δεν είναι απλώς μια «βελτιωτική προσθήκη» στο φυσικό επίπεδο είναι ένας μηχανισμός που μεταβάλλει τη λογική του ίδιου του καναλιού.

Για δεκαετίες, το ασύρματο κανάλι αντιμετωπιζόταν ως στοχαστικός, συχνά εχθρικός παράγοντας. Οι τεχνικές σχεδιασμού επικεντρώνονταν στη μείωση της επίδρασής του μέσω κωδικοποίησης, διαφοροποίησης, beamforming ή αύξησης ισχύος. Η θεμελιώδης παραδοχή ήταν ότι το περιβάλλον δεν αλλάζει προσαρμόζεται μόνο ο πομπός και ο δέκτης. Η τεχνολογία IRS ανατρέπει αυτή την παραδοχή. Εισάγει την ιδέα ότι το ίδιο το περιβάλλον μπορεί να ρυθμιστεί, να προγραμματιστεί και να συνεργαστεί ενεργά με το δίκτυο [1], [2].



Αυτό το συμπέρασμα είναι ίσως πιο σημαντικό από οποιοδήποτε ποσοτικό κέρδος σε ρυθμό μετάδοσης. Η έννοια του “smart radio environment” δεν αποτελεί απλώς ορολογία αντανάκλαμα βαθύτερη αλλαγή φιλοσοφίας. Το ραδιοπεριβάλλον μετατρέπεται από παθητικό μέσο διάδοσης σε ενεργό βαθμό ελευθερίας του συστήματος. Η επιφάνεια παύει να είναι τοίχος και γίνεται εργαλείο.

Η θεωρητική ανάλυση έδειξε ότι, υπό ιδανικές συνθήκες, η συνεκτική ανάκλαση από N στοιχεία οδηγεί σε κλιμάκωση της ισχύος που προσεγγίζει N^2 [1], [9]. Η μαθηματική αυτή ιδιότητα δεν είναι απλώς ενδιαφέρουσα αποτελεί τη βάση της ελκυστικότητας των IRS. Μια παθητική επιφάνεια μπορεί να επιτύχει σημαντική ενίσχυση χωρίς ενεργή εκπομπή. Ωστόσο, η πρακτική υλοποίηση αποκάλυψε τη σημασία των ρεαλιστικών περιορισμών. Ποσοτικοποίηση φάσης, απώλειες υλικού, μη ιδανικότητες RF και φαινόμενα mutual coupling μειώνουν το ιδανικό κέρδος [8].

Η τελική αποτίμηση δεν είναι ότι η θεωρία ήταν υπεραισιόδοξη, αλλά ότι η τεχνολογία βρίσκεται στο μεταίχμιο μεταξύ ιδανικής μαθηματικής περιγραφής και πρακτικής μηχανικής υλοποίησης. Το κέρδος παραμένει σημαντικό, όμως εξαρτάται από τη λεπτομέρεια του σχεδιασμού.

Η σύγκριση με υφιστάμενες τεχνολογίες υπήρξε εξίσου αποκαλυπτική. Οι IRS δεν αντικαθιστούν το massive MIMO. Δεν εκτελούν ενεργή επεξεργασία, δεν διαθέτουν RF chains, δεν προσφέρουν πολυπλεξία με τον ίδιο τρόπο. Αντιθέτως, συνεργάζονται με το active beamforming του σταθμού βάσης, δημιουργώντας ένα υβριδικό σύστημα όπου το ενεργό και το παθητικό στοιχείο συν-βελτιστοποιούνται [2], [10].

Ούτε όμως αποτελούν απλούς παθητικούς relays. Σε αντίθεση με τους ενεργούς αναμεταδότες, δεν εισάγουν θερμικό θόρυβο, καθώς δεν πραγματοποιούν ενίσχυση [1]. Η διαφορά αυτή είναι κρίσιμη. Το γεγονός ότι η IRS δεν προσθέτει επιπλέον θόρυβο σημαίνει ότι το κέρδος SNR προκύπτει από γεωμετρική και φασική διαμόρφωση, όχι από ενεργειακή ενίσχυση. Αυτό προσδίδει ενεργειακό πλεονέκτημα, αλλά ταυτόχρονα περιορίζει τη δυνατότητα αντιστάθμισης μεγάλων απωλειών διαδρομής σε ακραίες αποστάσεις.

Ένα από τα πιο ουσιαστικά συμπεράσματα αφορά την εκτίμηση καναλιού. Η παθητική φύση της IRS δημιουργεί δομικό πρόβλημα: η επιφάνεια δεν «ακούει». Δεν διαθέτει δυνατότητα άμεσης μέτρησης του BS–IRS–User καναλιού. Οι τεχνικές που βασίζονται σε διαδοχικά



πρότυπα φάσης και επαναληπτική εκτίμηση επιτρέπουν την ανακατασκευή του καναλιού [12], αλλά το training overhead αυξάνεται με το πλήθος στοιχείων.

Σε μεγάλες επιφάνειες, όπου N μπορεί να είναι εκατοντάδες ή και χιλιάδες, το πρόβλημα κλιμάκωσης γίνεται εμφανές. Οι μέθοδοι συμπίεσμνης εκτίμησης και τα μοντέλα βαθιάς μάθησης σε mmWave περιβάλλοντα μειώνουν το κόστος [5], αλλά εισάγουν ζητήματα γενίκευσης, σταθερότητας και ανάγκης για εκπαίδευση. Δεν υπάρχει ακόμη καθολική λύση.

Ίσως εδώ εντοπίζεται και το σημαντικότερο ανοιχτό ερευνητικό ερώτημα: πώς μπορεί να επιτευχθεί ακριβής, χαμηλού overhead και κλιμακούμενη εκτίμηση καναλιού σε δυναμικά περιβάλλοντα 6G; Χωρίς απάντηση σε αυτό, η πλήρης αξιοποίηση των IRS παραμένει μερική.

Στο επίπεδο αρχιτεκτονικής και πρωτοκόλλων, η τεχνολογία IRS ανέδειξε την ανάγκη για cross-layer σχεδίαση. Η επιφάνεια καθίσταται προγραμματιζόμενος πόρος που πρέπει να ενταχθεί σε μηχανισμούς scheduling, CSI feedback και QoS διαχείρισης [10], [11]. Το control signaling που απαιτείται για τη ρύθμιση των στοιχείων δεν είναι αμελητέο. Εάν σχεδιαστεί πρόχειρα, μπορεί να αναιρέσει μέρος του ενεργειακού οφέλους.

Επομένως, το συμπέρασμα δεν είναι μόνο τεχνικό αλλά συστημικό: η επιτυχία των IRS δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη φυσική τους απόδοση, αλλά από την αρμονική ενσωμάτωσή τους στο δικτυακό οικοσύστημα.

Από ενεργειακή σκοπιά, τα ευρήματα είναι ιδιαίτερα θετικά. Η απουσία ενεργών RF ενισχυτών προσδίδει σημαντικό πλεονέκτημα C-SWaP [2], [6]. Σε σενάρια IoT και SWIPT, η βελτίωση SINR επιτρέπει μείωση ισχύος εκπομπής των τερματικών [3]. Ωστόσο, η συνολική ενεργειακή εικόνα πρέπει να περιλαμβάνει το κόστος ελέγχου και υπολογισμού. Η «πράσινη» διάσταση δεν είναι αυτόματη απαιτεί ολοκληρωμένο σχεδιασμό.

Στις εφαρμογές, οι IRS τεκμηριωμένα βελτιώνουν την κάλυψη, παρακάμπτουν εμπόδια και μειώνουν τις παρεμβολές σε αστικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα [9]. Σε δορυφορικά και NTN σενάρια, προσφέρουν βελτίωση της αξιοπιστίας uplink [6]. Δεν αποτελούν ωστόσο καθολική λύση. Η απόδοση εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη θέση της επιφάνειας. Η IRS είναι στρατηγικό εργαλείο και όχι γενικευμένος μηχανισμός βελτίωσης.

Το ευρύτερο συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η τεχνολογία IRS ενσωματώνεται οργανικά στο όραμα των 6G δικτύων. Η μετάβαση από έξυπνα δίκτυα σε έξυπνα περιβάλλοντα [2], [4]



συνιστά θεμελιώδη αλλαγή παραδείγματος. Το περιβάλλον δεν είναι πλέον δεδομένο. Είναι σχεδιάσιμο.

Το βαθύτερο αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης είναι ότι δεν εξετάστηκε απλώς μια νέα τεχνολογία, αλλά μια νέα προσέγγιση ως προς το τι μπορεί να σημαίνει η ασύρματη επικοινωνία.

Η προηγούμενη ανάλυση κατέδειξε ότι οι Intelligent Reflecting Surfaces δεν περιορίζονται σε έναν ρόλο «ενισχυτή κάλυψης». Η πραγματική τους συνεισφορά αναδύεται όταν εξεταστούν ως δομικό στοιχείο ενός νέου αρχιτεκτονικού υποδείγματος. Στο πλαίσιο αυτό, ένα από τα πλέον ουσιώδη συμπεράσματα αφορά τη μεταβολή της έννοιας του βαθμού ελευθερίας στο ασύρματο σύστημα. Παραδοσιακά, οι βαθμοί ελευθερίας προέρχονταν από τον αριθμό κεραιών, το διαθέσιμο φάσμα ή τις τεχνικές πολυπλεξίας. Με τις IRS, εισάγεται ένας επιπλέον, χωρικός βαθμός ελευθερίας που δεν προκύπτει από ενεργή εκπομπή, αλλά από διαμόρφωση του ίδιου του χώρου διάδοσης [1], [2].

Η ιδέα αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στα δίκτυα 6G, όπου η ανάγκη για υψηλή φασματική αποδοτικότητα συνδυάζεται με αυστηρούς περιορισμούς κατανάλωσης ενέργειας και βιωσιμότητας. Σε τέτοια περιβάλλοντα, η απλή αύξηση ισχύος δεν αποτελεί αποδεκτή λύση. Η δυνατότητα εστιασμένης ανακατεύθυνσης της ενέργειας προς τον επιθυμητό χρήστη και ταυτόχρονης αποδυνάμωσης προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις οδηγεί σε βελτίωση του λόγου σήματος προς παρεμβολή χωρίς αύξηση εκπεμπόμενης ισχύος [9]. Αυτό μεταφράζεται όχι μόνο σε καλύτερη απόδοση, αλλά και σε πιο «ήπιο» ηλεκτρομαγνητικό αποτύπωμα.

Παρά ταύτα, η υλοποίηση μεγάλης κλίμακας IRS εγείρει ζητήματα κλιμάκωσης. Η αύξηση του αριθμού στοιχείων συνεπάγεται αύξηση μεταβλητών βελτιστοποίησης, μεγαλύτερη πολυπλοκότητα ελέγχου και αυξημένες απαιτήσεις σηματοδότησης. Οι two-timescale αλγόριθμοι που αναλύθηκαν [11] προσφέρουν μια ρεαλιστική προσέγγιση, διαχωρίζοντας αργά και γρήγορα μεταβαλλόμενες μεταβλητές. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή σε πραγματικά δίκτυα με κινητικότητα, πολλαπλούς χρήστες και ετερογενείς υπηρεσίες παραμένει ανοιχτό πεδίο. Η πρόκληση δεν είναι μόνο υπολογιστική είναι οργανωτική. Πώς θα ελεγχθούν χιλιάδες στοιχεία σε πραγματικό χρόνο χωρίς να επιβαρυνθεί το δίκτυο με υπερβολικό overhead;

Επιπλέον, η ανάλυση ανέδειξε τη σημασία της φυσικής θεμελίωσης. Σε πολλές θεωρητικές προσεγγίσεις, η IRS περιγράφεται μέσω απλοποιημένων μοντέλων καναλιού. Όμως, σε καθεστώς κοντινού πεδίου και μεγάλων επιφανειών, η παραδοσιακή far-field προσέγγιση



καθίσταται ανεπαρκής. Η μετάβαση σε μοντέλα beam focusing και spatial non-stationarity, όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, επιβάλλει στενότερη σύνδεση με τις εξισώσεις του Maxwell και τη φυσική διάδοσης [2], [7]. Αυτό το συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα κρίσιμο: η πλήρης κατανόηση των IRS δεν είναι μόνο πρόβλημα θεωρίας πληροφορίας ή βελτιστοποίησης, αλλά και ηλεκτρομαγνητικής φυσικής.

Σε επίπεδο τυποποίησης και βιομηχανικής υιοθέτησης, τα συμπεράσματα είναι πιο σύνθετα. Παρά την έντονη ερευνητική δραστηριότητα, οι IRS δεν έχουν ακόμη ενσωματωθεί πλήρως σε πρότυπα όπως τα 3GPP. Οι λόγοι δεν είναι μόνο τεχνικοί. Αφορούν ζητήματα κόστους εγκατάστασης, μοντέλων επιχειρηματικής αξιοποίησης, συντήρησης και ευθύνης λειτουργίας. Μια IRS ενσωματωμένη σε κτίριο εγείρει ερωτήματα ιδιοκτησίας και διαχείρισης. Ποιος ελέγχει την επιφάνεια; Ο πάροχος; Ο ιδιοκτήτης του κτιρίου; Η απάντηση δεν είναι προφανής.

Η βιομηχανική υιοθέτηση απαιτεί όχι μόνο τεχνική ωριμότητα, αλλά και σαφές οικονομικό μοντέλο. Εδώ εντοπίζεται μια ενδιαφέρουσα αντίφαση: τεχνικά, οι IRS εμφανίζονται ώριμες σε θεωρητικό επίπεδο. Πρακτικά, η μαζική υλοποίηση απαιτεί ακόμη απόδειξη βιωσιμότητας σε μεγάλης κλίμακας deployments.

Ένα ακόμη ουσιαστικό συμπέρασμα αφορά τα όρια της τεχνολογίας. Οι IRS δεν προσφέρουν οφέλη σε κάθε γεωμετρική διαμόρφωση. Σε περιβάλλοντα όπου υφίσταται ισχυρή άμεση ζεύξη LoS, το πρόσθετο κέρδος είναι συχνά περιορισμένο. Επίσης, όταν οι χρήστες βρίσκονται σε παρόμοιες γωνιακές θέσεις ως προς την επιφάνεια, η χωρική διακριτική ικανότητα μειώνεται. Η IRS δεν δημιουργεί απεριόριστους βαθμούς πολυπλεξίας. Το συμπέρασμα είναι ότι η τεχνολογία πρέπει να εφαρμόζεται στρατηγικά, με σαφή κατανόηση του περιβάλλοντος.

Παρά τις προκλήσεις, το συνολικό ισοζύγιο παραμένει θετικό. Οι IRS προσφέρουν μοναδικό συνδυασμό χαμηλής κατανάλωσης, χωρικής ευελιξίας και προγραμματιζόμενης συμπεριφοράς [1], [2]. Το πλεονέκτημα C-SWaP τις καθιστά ελκυστικές για πράσινες και βιώσιμες αρχιτεκτονικές [6]. Η δυνατότητα διαμόρφωσης του περιβάλλοντος χωρίς ενεργή ενίσχυση διαφοροποιεί ριζικά την προσέγγιση σε σχέση με προηγούμενες γενιές τεχνολογιών.

Αν επιχειρηθεί μια συνολική αποτίμηση, η τεχνολογία IRS μπορεί να ιδωθεί ως ο ενδιάμεσος κρίκος μεταξύ φυσικού χώρου και ψηφιακού ελέγχου. Ο φυσικός χώρος δεν είναι πλέον σταθερός γίνεται δυναμικά προσαρμόσιμος. Η επικοινωνία δεν πραγματοποιείται απλώς μέσα στο περιβάλλον πραγματοποιείται με το περιβάλλον.



Το ερώτημα που παραμένει ανοικτό δεν είναι αν οι IRS μπορούν να λειτουργήσουν – αυτό έχει ήδη αποδειχθεί σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Το ερώτημα είναι σε ποιο βαθμό θα ενσωματωθούν ολιστικά στα δίκτυα 6G και με ποια αρχιτεκτονική μορφή.

Η παρούσα εργασία καταλήγει ότι οι Intelligent Reflecting Surfaces δεν αποτελούν παροδική ερευνητική τάση. Αποτελούν ισχυρό υποψήφιο θεμέλιο των μελλοντικών προγραμματιζόμενων ραδιοπεριβαλλόντων. Η μετάβαση από «έξυπνα δίκτυα» σε «έξυπνα περιβάλλοντα» [2], [4] δεν είναι απλώς τεχνολογική εξέλιξη είναι αλλαγή παραδείγματος. Και σε αυτή τη μετατόπιση, οι IRS διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο.

Η συζήτηση μέχρι αυτό το σημείο κατέδειξε την τεχνολογική ωριμότητα και ταυτόχρονα τις προκλήσεις που συνοδεύουν τις Intelligent Reflecting Surfaces. Ωστόσο, ένα πλήρες συμπέρασμα δεν μπορεί να περιοριστεί στην αποτίμηση της παρούσας κατάστασης. Οφείλει να στραφεί και προς το μέλλον, εκεί όπου η τεχνολογία θα δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες, θα αλληλεπιδράσει με άλλες καινοτομίες και θα αναμετρηθεί με την πολυπλοκότητα των δικτύων 6G.

Μία από τις πλέον κρίσιμες μελλοντικές κατευθύνσεις αφορά τη σύγκλιση των IRS με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης. Η ανάγκη για ταχεία προσαρμογή σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα, με ελάχιστο overhead εκτίμησης καναλιού, καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους βελτιστοποίησης ενίοτε ανεπαρκείς. Οι τεχνικές βαθιάς μάθησης, ενισχυτικής μάθησης και μετα-μάθησης προτείνονται ως μηχανισμοί ικανοί να μοντελοποιήσουν την αντιστοίχιση μεταξύ κατάστασης καναλιού και βέλτιστων ρυθμίσεων φάσης [5], [10]. Το ενδιαφέρον δεν εντοπίζεται μόνο στη μείωση του υπολογιστικού κόστους, αλλά και στη δυνατότητα προσαρμογής σε μη στατικά, δυναμικά περιβάλλοντα με κινητικότητα χρηστών και πολυπλοκότητα παρεμβολών.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση ΑΙ δεν είναι πανάκεια. Τα μοντέλα μάθησης απαιτούν δεδομένα, χρόνο εκπαίδευσης και επαρκή γενίκευση. Σε περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες αλλάζουν γρήγορα ή απρόβλεπτα, η σταθερότητα και η αξιοπιστία τέτοιων μεθόδων πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά. Το μελλοντικό ερευνητικό πεδίο φαίνεται να βρίσκεται στη σύνθεση αναλυτικών μοντέλων με δεδομενοκεντρικές προσεγγίσεις.

Μια δεύτερη κατεύθυνση σχετίζεται με τη θεμελιώδη φυσική κατανόηση των μεγάλων επιφανειών. Καθώς οι IRS αυξάνονται σε διαστάσεις και λειτουργούν σε καθεστώς κοντινού πεδίου, τα απλοποιημένα μοντέλα επίπεδου κύματος καθίστανται ανεπαρκή. Η μετάβαση σε beam focusing και spatially non-stationary μοντέλα απαιτεί στενότερη σύνδεση της θεωρίας



επικοινωνιών με την ηλεκτρομαγνητική φυσική [2], [7]. Το ερώτημα δεν είναι μόνο πώς θα βελτιστοποιηθεί η φάση, αλλά πώς ακριβώς διαμορφώνεται το πεδίο στο χώρο και ποια είναι τα όρια που επιβάλλει η φυσική. Η σύζευξη αυτών των δύο κόσμων – θεωρίας πληροφορίας και ηλεκτρομαγνητισμού – αποτελεί ίσως τη βαθύτερη επιστημονική πρόκληση της επόμενης δεκαετίας.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η ενοποίηση των IRS με ετερογενή δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων non-terrestrial networks (NTN), UAV πλατφορμών και δορυφορικών συστημάτων [6]. Η δυνατότητα τοποθέτησης ελαφρών, χαμηλής κατανάλωσης επιφανειών σε κινητές πλατφόρμες ανοίγει νέα πεδία εφαρμογών. Σε σενάρια φυσικών καταστροφών ή απομακρυσμένων περιοχών, μια IRS τοποθετημένη σε UAV μπορεί να λειτουργήσει ως προσαρμοστικός ανακλαστήρας, βελτιώνοντας προσωρινά την κάλυψη. Ωστόσο, η κινητικότητα της ίδιας της επιφάνειας εισάγει επιπλέον πολυπλοκότητα στην εκτίμηση καναλιού και στον έλεγχο.

Στο επίπεδο τυποποίησης, το μέλλον των IRS εξαρτάται από τη σταδιακή ενσωμάτωσή τους σε διεθνή πρότυπα. Η αναφορά σε “Reconfigurable Intelligent Surfaces” ή “Reconfigurable Intelligent Environments” σε τεχνικές αναφορές υποδηλώνει ότι η τεχνολογία έχει ήδη προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας. Παρ’ όλα αυτά, η ευρεία υιοθέτηση απαιτεί σαφή ορισμό διεπαφών, μηχανισμών ελέγχου και πρωτοκόλλων σηματοδότησης. Το τεχνολογικό όραμα πρέπει να μετατραπεί σε υλοποιήσιμη αρχιτεκτονική.

Ένα ακόμη συμπέρασμα αφορά την οικονομική διάσταση. Οι IRS παρουσιάζονται συχνά ως χαμηλού κόστους λύση σε σχέση με την πυκνή ανάπτυξη σταθμών βάσης. Ωστόσο, το συνολικό κόστος περιλαμβάνει εγκατάσταση, συντήρηση, διασύνδεση με δίκτυο ελέγχου και πιθανή αναβάθμιση υφιστάμενων υποδομών. Το επιχειρηματικό μοντέλο δεν είναι ακόμη πλήρως καθορισμένο. Η επιτυχία δεν θα εξαρτηθεί μόνο από τεχνικούς δείκτες, αλλά και από την οικονομική βιωσιμότητα.

Συνοψίζοντας τα συνολικά συμπεράσματα της εργασίας, μπορούν να διατυπωθούν ορισμένες κεντρικές διαπιστώσεις. Πρώτον, οι Intelligent Reflecting Surfaces αποτελούν θεμελιώδη τεχνολογία για την υλοποίηση προγραμματιζόμενων ραδιοπεριβαλλόντων [1], [2]. Δεύτερον, προσφέρουν σημαντικά οφέλη σε ενεργειακή αποδοτικότητα και χωρική διαμόρφωση σήματος χωρίς προσθήκη θορύβου [1], [9]. Τρίτον, η επιτυχής υλοποίησή τους εξαρτάται από αποδοτικές μεθόδους εκτίμησης καναλιού και αλγοριθμικής κλιμάκωσης [5], [12]. Τέταρτον, η πλήρης αξιοποίησή τους απαιτεί cross-layer αρχιτεκτονική και ενσωμάτωση σε πρότυπα και επιχειρηματικά μοντέλα [10], [11].



Ένα από τα πιο ουσιαστικά συμπεράσματα είναι εννοιολογικό. Οι IRS μεταβάλλουν τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζεται ο φυσικός χώρος στην επικοινωνία. Το περιβάλλον δεν θεωρείται πλέον ουδέτερο ή παθητικό, αλλά διαμορφώσιμο και ενεργό στοιχείο του σχεδιασμού.

Εάν τα 5G χαρακτηρίστηκαν από αυξημένη πυκνότητα και υψηλές συχνότητες, τα 6G ενδέχεται να χαρακτηριστούν από προγραμματιζόμενα περιβάλλοντα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Intelligent Reflecting Surfaces δεν είναι απλώς ακόμη μία τεχνολογία. Είναι ο μηχανισμός μέσω του οποίου ο φυσικός κόσμος ενσωματώνεται ενεργά στη διαδικασία επικοινωνίας.

Η παρούσα εργασία, επομένως, δεν ολοκληρώνεται με ένα κλείσιμο που δηλώνει οριστικότητα. Αντιθέτως, καταλήγει σε μια ανοιχτή προοπτική. Οι IRS έχουν ήδη μεταβάλει το ερευνητικό τοπίο. Το κατά πόσο θα μεταβάλουν και το τεχνολογικό τοπίο των πραγματικών δικτύων θα εξαρτηθεί από την επόμενη φάση καινοτομίας, συνεργασίας και τυποποίησης.

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία των Intelligent Reflecting Surfaces δεν αποτελεί απλώς λύση σε ένα τεχνικό πρόβλημα, αλλά πρόταση για μια διαφορετική προσέγγιση ως προς τη φύση της ασύρματης επικοινωνίας στον 21ο αιώνα.



11. Ανοιχτές Προκλήσεις και Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στη μελέτη των Intelligent Reflecting Surfaces, η τεχνολογία αυτή δεν έχει ακόμη φτάσει σε ένα πλήρως ώριμο στάδιο εφαρμογής. Αντίθετα, όσο περισσότερο αναπτύσσεται η σχετική βιβλιογραφία, τόσο πιο καθαρά φαίνεται ότι οι IRS δεν αποτελούν απλώς ένα πρόσθετο εξάρτημα στο ασύρματο δίκτυο, αλλά έναν νέο τρόπο σκέψης για το ίδιο το περιβάλλον διάδοσης. Το περιβάλλον, δηλαδή, παύει να θεωρείται παθητικό εμπόδιο και αρχίζει να αντιμετωπίζεται ως προγραμματιζόμενος και αξιοποιήσιμος πόρος [1], [2], [9].

Η ιδέα αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική, ειδικά για τα δίκτυα 5G και τις μελλοντικές αρχιτεκτονικές 6G, όπου η ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλότερη καθυστέρηση, ενεργειακή αποδοτικότητα και καλύτερη κάλυψη γίνεται όλο και πιο πιεστική. Ωστόσο, η μετάβαση από το θεωρητικό μοντέλο στην πραγματική εγκατάσταση δεν είναι απλή. Κάπως εκεί η τεχνολογία συναντά τα όριά της. Η εκτίμηση καναλιού, η βελτιστοποίηση των φάσεων, οι περιορισμοί υλικού, η ασφάλεια, η τυποποίηση και η πειραματική επαλήθευση εξακολουθούν να αποτελούν ζητήματα ανοιχτά, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν με πιο συστηματικό τρόπο [2], [4].

11.1 Κλιμακούμενη εκτίμηση καναλιού, βελτιστοποίηση και τεχνητή νοημοσύνη

Μία από τις βασικότερες προκλήσεις των IRS αφορά την ακριβή και αποδοτική εκτίμηση του καναλιού. Σε αντίθεση με ένα συμβατικό ασύρματο σύστημα, όπου η επικοινωνία εξετάζεται κυρίως μέσω του απευθείας καναλιού μεταξύ πομπού και δέκτη, στα IRS το συνολικό κανάλι περιλαμβάνει το τμήμα BS–IRS και το τμήμα IRS–UE. Δημιουργείται έτσι ένα αλυσιδωτό, ή cascaded, κανάλι, το οποίο είναι σαφώς πιο δύσκολο να εκτιμηθεί και να παρακολουθηθεί δυναμικά [5], [12].

Το πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο σύνθετο όταν η επιφάνεια περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό ανακλαστικών στοιχείων. Σε ένα ιδανικό θεωρητικό σενάριο, κάθε στοιχείο μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια, ώστε να διαμορφώνεται κατάλληλα η φάση του προσπίπτοντος σήματος. Στην πράξη, όμως, αυτό σημαίνει υψηλό pilot overhead, αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα και ανάγκη για γρήγορη προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο. Αν το δίκτυο



χρειάζεται υπερβολικά μεγάλο χρόνο μόνο για να εκτιμήσει το κανάλι, τότε ένα μέρος του θεωρητικού κέρδους της IRS χάνεται πριν καν αξιοποιηθεί.

Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία στρέφεται όλο και περισσότερο σε τεχνικές μειωμένης πολυπλοκότητας, όπως η συμπίεστική εκτίμηση καναλιού, οι ιεραρχικές μέθοδοι αναζήτησης, η ομαδοποίηση στοιχείων της επιφάνειας και οι προσεγγίσεις progressive refinement [5], [12]. Η βασική ιδέα είναι να μη χρειάζεται το σύστημα να εκτιμά και να ελέγχει κάθε στοιχείο μεμονωμένα σε κάθε χρονική στιγμή. Αντίθετα, μπορεί να λειτουργεί σε επίπεδο υπο-επιφανειών ή ομάδων στοιχείων, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των παραμέτρων ελέγχου. Αυτή η λύση δεν είναι τέλεια· ίσως να οδηγεί σε μικρή απώλεια απόδοσης. Παρ' όλα αυτά, σε ένα πραγματικό δίκτυο, η ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση μπορεί να είναι προτιμότερη από μία θεωρητικά βέλτιστη αλλά πρακτικά αργή λύση.

Στο ίδιο πλαίσιο εντάσσεται και η αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης. Τεχνικές βαθιάς μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του καναλιού, την πρόβλεψη της κατάστασης του περιβάλλοντος και τη γρήγορη επιλογή κατάλληλων διαμορφώσεων της IRS [5]. Παράλληλα, η ενισχυτική μάθηση παρουσιάζει ενδιαφέρον, επειδή επιτρέπει στο σύστημα να «μαθαίνει» μέσα από την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, προσαρμόζοντας σταδιακά τις αποφάσεις του. Εδώ όμως εμφανίζεται ένα γνωστό και κάπως ενοχλητικό ερώτημα: πόσο καλά λειτουργεί ένα μοντέλο όταν βρεθεί σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές στις οποίες εκπαιδεύτηκε;

Η γενίκευση σε μη ορατές συνθήκες, δηλαδή το out-of-distribution generalization, παραμένει ανοιχτό ζήτημα. Ένα μοντέλο μπορεί να παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση σε προσομοιώσεις, αλλά να αποτυγχάνει σε ένα πραγματικό περιβάλλον με κινητούς χρήστες, εμπόδια, παρεμβολές και μη ιδανικά χαρακτηριστικά υλικού. Επιπλέον, η ερμηνευσιμότητα των αποφάσεων αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Δεν αρκεί το σύστημα να επιλέγει μία διαμόρφωση φάσεων που «δουλεύει». Χρειάζεται να μπορεί να αιτιολογηθεί, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό, γιατί η συγκεκριμένη επιλογή είναι κατάλληλη και πώς επηρεάζει την ποιότητα υπηρεσίας [4], [11].

Η μελλοντική έρευνα, επομένως, δεν πρέπει να περιοριστεί μόνο στη βελτίωση της ακρίβειας των αλγορίθμων. Πρέπει να εξετάσει και το αν αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να λειτουργήσουν με περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους, σε πραγματικό χρόνο και με αποδεκτό κόστος σηματοδότησης. Η IRS, όσο «έξυπνη» και αν παρουσιάζεται, δεν μπορεί να γίνει πρακτικά χρήσιμη αν απαιτεί υπερβολικά πολύπλοκο έλεγχο.

11.2 Λειτουργία σε near-field, μεγάλες επιφάνειες και περιορισμοί υλικού

Μια δεύτερη κρίσιμη ερευνητική κατεύθυνση αφορά τη λειτουργία των IRS σε συνθήκες near-field και σε πολύ μεγάλες επιφάνειες. Στα παραδοσιακά μοντέλα ασύρματης διάδοσης, συχνά θεωρείται ότι οι χρήστες βρίσκονται στο far-field της κεραίας ή της ανακλαστικής επιφάνειας. Αυτό επιτρέπει απλούστερη μαθηματική μοντελοποίηση, καθώς το κύμα μπορεί να προσεγγιστεί ως επίπεδο. Όμως, όσο αυξάνονται οι διαστάσεις των IRS και όσο χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες, όπως mmWave και sub-THz, η υπόθεση αυτή δεν είναι πάντα ρεαλιστική [2], [7].

Στο near-field, το ζητούμενο δεν είναι μόνο η κατεύθυνση της δέσμης προς μια συγκεκριμένη γωνία, αλλά η εστίαση της ενέργειας σε συγκεκριμένη χωρική περιοχή. Αυτό αλλάζει αρκετά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται οι αλγόριθμοι beamforming. Η IRS δεν λειτουργεί απλώς σαν ένας επίπεδος καθρέφτης που στρέφει το σήμα προς μία κατεύθυνση. Μοιάζει περισσότερο με μία επιφάνεια που μπορεί να «πλάθει» το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον χώρο, κάτι που ανοίγει νέες δυνατότητες αλλά και νέες δυσκολίες [7].

Ένα σχετικό πρόβλημα είναι η χωρική μη στασιμότητα. Σε πολύ μεγάλες επιφάνειες, διαφορετικά τμήματα της IRS μπορεί να «βλέπουν» διαφορετικές συνθήκες διάδοσης. Ένας χρήστης μπορεί να βρίσκεται κοντά σε ένα τμήμα της επιφάνειας, ενώ ένα άλλο τμήμα να συνεισφέρει ελάχιστα ή με διαφορετικό τρόπο στο συνολικό σήμα. Άρα, τα απλά μοντέλα που θεωρούν ομοιόμορφη συμπεριφορά σε όλη την επιφάνεια δεν επαρκούν πάντα. Η πρόκληση εδώ είναι διπλή: χρειάζεται ακριβέστερη ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση, αλλά και αλγόριθμοι αρκετά πρακτικοί ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν.

Πέρα από τα θεωρητικά μοντέλα, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι περιορισμοί υλικού. Πολλά θεωρητικά σχήματα υποθέτουν ιδανικές μετατοπίσεις φάσης, τέλεια ανάκλαση και απουσία απωλειών. Στην πράξη, όμως, τα στοιχεία της IRS έχουν πεπερασμένη ανάλυση φάσης, απώλειες, μη γραμμικότητες και περιορισμούς ελέγχου. Η χρήση διακριτών phase shifts έχει ήδη μελετηθεί σε αρκετές εργασίες, δείχνοντας ότι η μη ιδανικότητα της επιφάνειας επηρεάζει ουσιαστικά την τελική απόδοση [3], [12]. Παράλληλα, οι ατέλειες στον πομποδέκτη, όπως θόρυβος, μη ιδανικοί ενισχυτές και περιορισμοί RF αλυσίδων, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση [8].

Αυτό το σημείο είναι σημαντικό, γιατί πολλές φορές η θεωρητική συζήτηση γύρω από τις IRS είναι κάπως αισιόδοξη. Παρουσιάζει εντυπωσιακά κέρδη, αλλά με υποθέσεις που δύσκολα συναντώνται σε πραγματικές εγκαταστάσεις. Η μελλοντική έρευνα πρέπει, λοιπόν, να



μετακινηθεί από τα υπερβολικά ιδανικά μοντέλα προς πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις, όπου η απόδοση εξετάζεται μαζί με τις απώλειες, το κόστος, την ανθεκτικότητα και την κατασκευαστική πολυπλοκότητα.

11.3 Πολλαπλές IRS, διαστρωματικός έλεγχος και ενσωμάτωση στο δίκτυο

Η χρήση μίας μόνο IRS μπορεί να βελτιώσει την κάλυψη και την ποιότητα σύνδεσης σε συγκεκριμένα σενάρια. Ωστόσο, σε μελλοντικά πυκνά δίκτυα, είναι πιθανό να απαιτείται η ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών IRS. Αυτό οδηγεί σε ένα πολύ πιο σύνθετο πρόβλημα συντονισμού. Κάθε επιφάνεια δεν επηρεάζει μόνο τον χρήστη που εξυπηρετεί άμεσα, αλλά και το συνολικό περιβάλλον παρεμβολών του δικτύου. Με άλλα λόγια, η απόφαση μιας IRS μπορεί να βοηθά έναν σύνδεσμο και ταυτόχρονα να επιβαρύνει έναν άλλο. Το δίκτυο αρχίζει να μοιάζει με έναν ζωντανό μηχανισμό που πρέπει να συντονίζεται προσεκτικά.

Η κατανεμημένη βελτιστοποίηση αποτελεί βασική κατεύθυνση για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Αν όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται κεντρικά, τότε η ανάγκη για πληροφορία καναλιού και σηματοδοσία μπορεί να γίνει υπερβολικά μεγάλη. Από την άλλη πλευρά, αν κάθε IRS λειτουργεί πλήρως ανεξάρτητα, είναι πιθανό να προκύψουν ασύμβατες ή μη βέλτιστες διαμορφώσεις. Χρειάζεται λοιπόν μια ενδιάμεση λύση, στην οποία οι επιφάνειες συνεργάζονται σε κάποιο βαθμό, χωρίς να καταρρέει το σύστημα από το βάρος της πολυπλοκότητας [4], [11].

Το ζήτημα γίνεται ακόμη πιο ενδιαφέρον όταν οι IRS ενσωματωθούν στα ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Μέχρι σήμερα, μεγάλο μέρος της έρευνας επικεντρώνεται στο φυσικό επίπεδο, δηλαδή στο κανάλι, στο beamforming και στην ισχύ μετάδοσης. Όμως, για να λειτουργήσει μια IRS σε πραγματικό δίκτυο, πρέπει να συνδεθεί και με διαδικασίες MAC, scheduling, resource allocation, handover και QoS. Για παράδειγμα, σε ένα OFDMA σύστημα, η κατανομή πόρων και η παθητική διαμόρφωση της IRS δεν μπορούν να εξετάζονται ανεξάρτητα. Η μία απόφαση επηρεάζει άμεσα την άλλη [10].

Αντίστοιχα, σε περιβάλλοντα πολλών χρηστών, η βελτιστοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας, μεταβολές στην κίνηση των χρηστών και διαφορετικές απαιτήσεις εφαρμογών [11]. Ένας χρήστης που παρακολουθεί βίντεο υψηλής ανάλυσης, ένας αισθητήρας IoT και μια εφαρμογή εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης δεν έχουν τις ίδιες ανάγκες. Η IRS, επομένως, δεν μπορεί να λειτουργεί μόνο με στόχο τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης. Πρέπει να ενταχθεί σε ένα ευρύτερο πλαίσιο διαχείρισης πόρων.



Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι εφαρμογές σε δίκτυα IoT και δορυφορική συνδεσιμότητα, όπου οι IRS μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ζεύξης, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου η απευθείας σύνδεση είναι ασθενής ή διακόπτεται εύκολα [6]. Σε τέτοια σενάρια, όμως, οι απαιτήσεις ενέργειας, καθυστέρησης και αξιοπιστίας είναι συχνά πιο αυστηρές. Δεν αρκεί να αποδειχθεί ότι η IRS βελτιώνει το link budget. Πρέπει να φανεί και ότι μπορεί να λειτουργήσει σταθερά, χωρίς υπερβολική ανάγκη συντήρησης ή περίπλοκης διαχείρισης.

11.4 Τυποποίηση, ασφάλεια και ρυθμιστικές προϋποθέσεις

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα αφορά την τυποποίηση και την ασφάλεια. Όσο οι IRS παραμένουν κυρίως αντικείμενο ερευνητικών προσομοιώσεων, τα προβλήματα αυτά μπορεί να φαίνονται δευτερεύοντα. Όταν όμως η τεχνολογία πλησιάζει την πρακτική υλοποίηση, γίνονται κεντρικά. Για να ενσωματωθούν οι IRS σε εμπορικά δίκτυα, πρέπει να οριστούν σαφείς διεπαφές ελέγχου, διαδικασίες σηματοδότησης, μηχανισμοί πιστοποίησης και κανόνες διαλειτουργικότητας [2], [4].

Η τυποποίηση είναι απαραίτητη, γιατί χωρίς κοινές προδιαγραφές κάθε κατασκευαστής ή πάροχος θα μπορούσε να υλοποιεί την IRS με διαφορετικό τρόπο. Αυτό θα δυσκόλευε την ενσωμάτωση στο δίκτυο και θα περιόριζε την εμπορική υιοθέτηση. Επιπλέον, πρέπει να αποφασιστεί ποιος ελέγχει την επιφάνεια, με ποιο πρωτόκολλο, με ποια συχνότητα ενημέρωσης και με ποια δικαιώματα πρόσβασης. Το ερώτημα φαίνεται τεχνικό, αλλά έχει και οργανωτική διάσταση. Μια IRS εγκατεστημένη σε κτίριο, δρόμο, σταθμό ή εσωτερικό χώρο δεν είναι απλώς μια κεραία. Είναι τμήμα του περιβάλλοντος.

Η ασφάλεια αποτελεί εξίσου σοβαρό ζήτημα. Αν μια IRS μπορεί να ανακατευθύνει ή να ενισχύσει το ασύρματο σήμα, τότε μια κακόβουλη διαμόρφωση θα μπορούσε να δημιουργήσει παρεμβολές, να υποβαθμίσει την ποιότητα υπηρεσίας ή ακόμη και να ευνοήσει επιθέσεις υποκλοπής. Η ίδια ιδιότητα που καθιστά την τεχνολογία χρήσιμη, δηλαδή ο έλεγχος του περιβάλλοντος διάδοσης, μπορεί να γίνει αδύναμο σημείο αν δεν προστατευθεί σωστά [4]. Κάπως παράδοξο, αλλά αναμενόμενο.

Παράλληλα, τίθενται ζητήματα ιδιωτικότητας. Η IRS δεν συλλέγει απαραίτητα δεδομένα με τον ίδιο τρόπο που το κάνει ένας αισθητήρας ή μια κάμερα. Ωστόσο, η διαμόρφωση του καναλιού και η γνώση της θέσης ή της κατεύθυνσης των χρηστών μπορεί να δημιουργήσουν έμμεσες πληροφορίες για την κίνησή τους. Επομένως, οι μηχανισμοί ελέγχου πρέπει να



σχεδιαστούν με τρόπο που να περιορίζει την κατάχρηση και να διασφαλίζει ότι η πληροφορία που απαιτείται για τη λειτουργία της IRS δεν μετατρέπεται σε εργαλείο παρακολούθησης.

Η μελλοντική έρευνα χρειάζεται να εξετάσει πιο αναλυτικά ζητήματα secure control, authentication, πρόσβασης στις ρυθμίσεις της επιφάνειας και ανθεκτικότητας σε επιθέσεις. Δεν είναι αρκετό να βελτιώνεται μόνο η φασματική ή ενεργειακή απόδοση. Ένα σύστημα που δεν είναι ασφαλές δύσκολα μπορεί να θεωρηθεί ώριμο για μαζική χρήση.

11.5 C-SWaP, βιωσιμότητα και κύκλος ζωής της τεχνολογίας

Η αξιολόγηση των IRS πρέπει επίσης να επεκταθεί πέρα από τις κλασικές μετρικές απόδοσης. Στη βιβλιογραφία δίνεται συχνά έμφαση στη φασματική αποδοτικότητα, στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στη βελτίωση του SNR ή του SINR [1], [2], [9]. Αυτές οι μετρικές είναι αναγκαίες, αλλά δεν αρκούν. Για να αξιολογηθεί ρεαλιστικά η τεχνολογία, πρέπει να εξεταστεί το συνολικό πλαίσιο C-SWaP, δηλαδή κόστος, μέγεθος, βάρος και κατανάλωση ισχύος.

Σε ένα θεωρητικό μοντέλο, μια μεγάλη IRS μπορεί να φαίνεται εξαιρετικά αποδοτική. Στην πράξη, όμως, πρέπει να παραχθεί, να μεταφερθεί, να εγκατασταθεί, να τροφοδοτηθεί και να συντηρηθεί. Το κόστος αυτό δεν είναι αμελητέο. Αν η επιφάνεια απαιτεί συχνή συντήρηση ή αν η εγκατάστασή της είναι πολύπλοκη, τότε η τεχνολογία μπορεί να αποδειχθεί λιγότερο ελκυστική για τους παρόχους. Η οικονομική βιωσιμότητα, λοιπόν, πρέπει να εξετάζεται μαζί με την τεχνική απόδοση.

Επιπλέον, η περιβαλλοντική αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής της τεχνολογίας. Δεν αρκεί μια IRS να καταναλώνει λίγη ενέργεια κατά τη λειτουργία της. Πρέπει να ληφθούν υπόψη τα υλικά κατασκευής, η διαδικασία παραγωγής, η διάρκεια ζωής, η δυνατότητα ανακύκλωσης και το περιβαλλοντικό κόστος αντικατάστασης. Εδώ η συζήτηση συνδέεται άμεσα με τους στόχους των πράσινων δικτύων 6G, όπου η βιωσιμότητα δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως πρόσθετο πλεονέκτημα, αλλά ως βασική σχεδιαστική απαίτηση [4], [7].

Υπάρχει, βέβαια, μια λεπτή ισορροπία. Από τη μία πλευρά, οι IRS μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για ενεργοβόρες ενεργές υποδομές, βελτιώνοντας την κάλυψη χωρίς απαραίτητα να απαιτούν νέους σταθμούς βάσης. Από την άλλη, η μαζική εγκατάσταση χιλιάδων επιφανειών σε αστικά περιβάλλοντα δημιουργεί νέο υλικό αποτύπωμα. Άρα, η τεχνολογία μπορεί να είναι «πράσινη», αλλά όχι αυτόματα. Χρειάζεται προσεκτική αποτίμηση.



11.6 Πειραματική επαλήθευση, testbeds και μετάβαση σε πραγματικές εφαρμογές

Τέλος, μία από τις πιο σημαντικές ανοιχτές προκλήσεις είναι η πειραματική επαλήθευση. Μέχρι σήμερα, μεγάλο μέρος των αποτελεσμάτων για τις IRS βασίζεται σε αναλυτικά μοντέλα και προσομοιώσεις. Αυτό είναι λογικό για μια αναδυόμενη τεχνολογία. Ωστόσο, η απόσταση ανάμεσα στην προσομοίωση και στην πραγματική εγκατάσταση παραμένει μεγάλη [2], [4].

Τα πειραματικά testbeds είναι απαραίτητα, γιατί επιτρέπουν την αξιολόγηση της τεχνολογίας υπό πραγματικές συνθήκες διάδοσης. Σε έναν πραγματικό χώρο υπάρχουν ανακλάσεις, σκιάσεις, κινητά εμπόδια, μεταβαλλόμενη πυκνότητα χρηστών, ατέλειες υλικού και παρεμβολές από άλλα συστήματα. Αυτά τα στοιχεία δεν μπορούν πάντα να αναπαρασταθούν με ακρίβεια σε μια προσομοίωση. Και συχνά είναι ακριβώς αυτά που καθορίζουν αν μια τεχνολογία θα λειτουργήσει αξιόπιστα.

Η ανάπτυξη ανοιχτών και συγκρίσιμων testbeds θα βοηθούσε σημαντικά την ερευνητική κοινότητα. Σήμερα, διαφορετικές εργασίες χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα, διαφορετικές παραμέτρους και διαφορετικές μετρικές αξιολόγησης, γεγονός που δυσκολεύει τη σύγκριση αποτελεσμάτων. Για να υπάρξει πραγματική πρόοδος, χρειάζονται κοινά σενάρια αναφοράς, τυποποιημένες μετρικές και δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα. Μόνο έτσι μπορεί να φανεί αν οι IRS αποδίδουν σταθερά σε εσωτερικούς χώρους, σε αστικά περιβάλλοντα, σε βιομηχανικά δίκτυα ή σε δορυφορικές/IoT εφαρμογές [6], [7].

Η μετάβαση σε πραγματικές εφαρμογές απαιτεί επίσης συνεργασία μεταξύ πανεπιστημίων, βιομηχανίας και φορέων τυποποίησης. Η έρευνα έχει ήδη δείξει ότι οι IRS μπορούν να βελτιώσουν την κάλυψη, την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη διαχείριση του ασύρματου περιβάλλοντος [1], [2], [9]. Το ζητούμενο πλέον είναι να αποδειχθεί ότι τα οφέλη αυτά παραμένουν σημαντικά και όταν ληφθούν υπόψη οι πραγματικοί περιορισμοί: κόστος, συντήρηση, ασφάλεια, υλικό, σηματοδότηση και ανθρώπινη χρήση του χώρου.

Συνολικά, οι Intelligent Reflecting Surfaces αποτελούν μία από τις πιο ενδιαφέρουσες τεχνολογικές κατευθύνσεις για τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Δεν είναι όμως μια έτοιμη λύση που μπορεί απλώς να προστεθεί στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές. Είναι περισσότερο ένα νέο επίπεδο ελέγχου του περιβάλλοντος, με όλες τις δυνατότητες και τις δυσκολίες που αυτό συνεπάγεται. Η επόμενη φάση της έρευνας θα πρέπει να είναι λιγότερο ιδανική και



περισσότερο εφαρμοσμένη. Ίσως εκεί να φανεί και η πραγματική αξία της τεχνολογίας: όχι μόνο στο πόσο εντυπωσιακά αποτελέσματα παράγει σε θεωρητικά μοντέλα, αλλά στο αν μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα, οικονομικά και με ασφάλεια μέσα στο πραγματικό δίκτυο.

Αναφορές

- [1] E. Basar, M. Di Renzo, J. de Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753–116773, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935192>.
- [2] M. Di Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M.-S. Alouini, C. Yuen, J. de Rosny, and S. Tretyakov, “Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and the Road Ahead,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2450–2525, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007211>.
- [3] S. Gong, Z. Yang, C. Xing, and L. Hanzo, “Beamforming optimization for intelligent reflecting surface-aided SWIPT IoT networks relying on discrete phase shifts,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 8585–8602, Jun. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3046929>.
- [4] A. Khan, S. A. H. Mohsan, A. I. Boghdady, M. A. Khan, I. M. Qureshi, and M. H. Alsharif, “A Survey of Intelligent Reflecting Surfaces: Performance Analysis, Extensions, Potential Challenges, and Open Research Issues,” *Vehicular Communications*, vol. 51, Art. no. 100859, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2024.100859>.



- [5] S. Liu, Z. Gao, J. Zhang, M. Di Renzo, and M.-S. Alouini, "Deep denoising neural network assisted compressive channel estimation for mmWave intelligent reflecting surfaces," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 8, pp. 9223–9228, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3005402>.
- [6] C. O. Obidiozor et al., "Intelligent reflective surfaces in 5G and beyond: Optimizing uplink satellite connectivity for IoT," PeerJ Computer Science, vol. 11, e2726, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2726>.
- [7] C. Qian, L. Tian, and H. Chen, "Progress on intelligent metasurfaces for signal relay, transmitter, and processor," Light: Science & Applications, vol. 14, Art. no. 93, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01729-2>.
- [8] H. Shen, W. Xu, S. Gong, C. Zhao, and D. W. K. Ng, "Beamforming optimization for IRS-aided communications with transceiver hardware impairments," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 2, pp. 1214–1227, Feb. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3033575>.
- [9] Q. Wu and R. Zhang, "Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network," IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 1, pp. 106–112, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107>.
- [10] Y. Yang, S. Zhang, and R. Zhang, "IRS-enhanced OFDMA: Joint resource allocation and passive beamforming optimization," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 6, pp. 760–764, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2968303>.
- [11] M. M. Zhao, A. Liu, Y. Wan, and R. Zhang, "Two-timescale beamforming optimization for intelligent reflecting surface aided multiuser communication with QoS constraints," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 9, pp. 6179–6194, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3072382>.
- [12] B. Zheng, C. You, and R. Zhang, "Channel estimation and passive beamforming for intelligent reflecting surface: Discrete phase shift and progressive refinement," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 11, pp. 2604–2620, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007056>.



- [13] W. Zhang, H. Deng, Y. Li, Z. Zhu, C. Peng, and G. Liu, "Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surface-Assisted MIMO Systems," *Symmetry*, vol. 14, no. 8, Art. no. 1510, Jul. 2022, doi: 10.3390/sym14081510. Available: <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/8/1510>
- [14] H. Zhang, N. Shlezinger, F. Guidi, D. Dardari, and Y. C. Eldar, "6G Wireless Communications: From Far-Field Beam Steering to Near-Field Beam Focusing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 4, pp. 72–77, Apr. 2023, doi: 10.1109/MCOM.001.2200259. Available: https://www.weizmann.ac.il/math/yonina/sites/math.yonina/files/6G_Wireless_Communications_From_Far-Field_Beam_Steering_to_Near-Field_Beam_Focusing_1.pdf
- [15] M. A. S. Sejan, M. H. Rahman, B.-S. Shin, J.-H. Oh, Y.-H. You, and H.-K. Song, "Machine Learning for Intelligent-Reflecting-Surface-Based Wireless Communication towards 6G: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 14, Art. no. 5405, Jul. 2022, doi: 10.3390/s22145405. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/14/5405>