

GENEROWANIE I ZASTOSOWANIE OGRANICZONEJ KSIĄŻKI KODOWEJ DLA RIS W SCENARIUSZU WEWNĄTRZBUDYKOWYM CREATION AND APPLICATION OF CONSTRAINED CODEBOOK FOR RIS IN INDOOR PROPAGATION SCENARIOS

Tomasz Jaworski¹; Cyryl Prentki¹; Paweł Kryszkiewicz²; Adrian Kliks²;

¹ Politechnika Poznańska, Poznań, imie.nazwisko@student.put.poznan.pl

² Politechnika Poznańska, Poznań, imie.nazwisko@put.poznan.pl

Streszczenie: Artykuł omawia zastosowanie Rekonfigurowalnych Matrycy Antenowych (ang. Reconfigurable Intelligent Surface – RIS) w systemach bezprzewodowych jako narzędzia poprawy jakości sygnału poprzez kształtowanie propagacji fal. Przedstawiono model systemu zawierający RIS, nadajnik i odbiornik w środowisku bez widoczności bezpośredniej, oraz sposób obliczania współczynników odbicia w celu maksymalizacji mocy odbieranej. Zaproponowano metodę tworzenia ograniczonej książki kodowej, przy zachowaniu efektywności. Przeprowadzono testy eksperymentalne, wykazując wzrost mocy sygnału i przepływności przy użyciu RIS z ograniczoną książką kodową

Abstract: This paper discusses the use of Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) in wireless systems as a tool to improve signal quality by shaping wave propagation. A system model incorporating an RIS, transmitter and receiver in a non-line-of-sight (NLOS) environment, and how to calculate reflection coefficients to maximise received power is presented. A method for creating a constrained, while maintaining efficiency, codebook was proposed. Experimental tests were carried out, showing an increase in signal power and channel bit rate using RIS with a limited codebook.

Słowa kluczowe: RIS, książka kodowa, wzorce

Keywords: RIS, codebook, patterns

1. WSTĘP

Jednym z rozwiązań szeroko rozważanych w kontekście rozwoju sieci bezprzewodowych jest wykorzystanie Rekonfigurowalnych Matryc Antenowych (ang. Reconfigurable Intelligent Surface – RIS) [5, 6]. RIS to elementy umieszczane w środowisku propagacyjnym (pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem), których zdalne sterowanie umożliwia modyfikację charakterystyk kanału radiowego w celu uzyskania pożądanych efektów po stronie odbiornika [10]. Dzięki temu możliwa jest np. zmiana kąta odbicia sygnału niezależnie od reguł optyki geometrycznej. Może to skutkować poprawą jakości odbieranego sygnału, np. zwiększeniem jego mocy lub redukcją zakłóceń [8].

RIS'y są często określane jako quasi-pasywne — same elementy antenowe nie wymagają zasilania, a energia

zużywana jest głównie przez układ sterujący [6]. Liczba elementów antenowych w matrycy wpływa na jej zdolność do kształtowania propagacji. Jeśli każdy z L elementów może przyjmować jeden z K stanów (np. fazowych), to możliwych jest L^K różnych wzorców odbicia.

Ze względu na ogromną przestrzeń możliwości, praktyczne rozwiązania skupiają się na stosowaniu książek kodowych bądź algorytmów korzystających z informacji kontekstowych. W literaturze opisano m.in. książki kodowe oparte na: losowości [11], odległościach Euklidesowych wzorcy [4] oraz optymalizacji alternatywnej (AO) [7]. Drugą grupą opisanych metod wyznaczania wzorcy do stosowania z matrycami RIS są metody algorytmiczne, do których można zaliczyć: modele matematyczne [3], metody uczenia maszynowego [9], czy też heurystyki dopasowujące kanał do odbiornika o nieznanej lokalizacji [2]. Rozwiązania te mają jednak szereg różnych wad, do których można zaliczyć: długi czas wyboru wzorca, wysoką złożoność obliczeniową, duże zużycie energii lub konieczność częstego przełączania matrycy RIS.

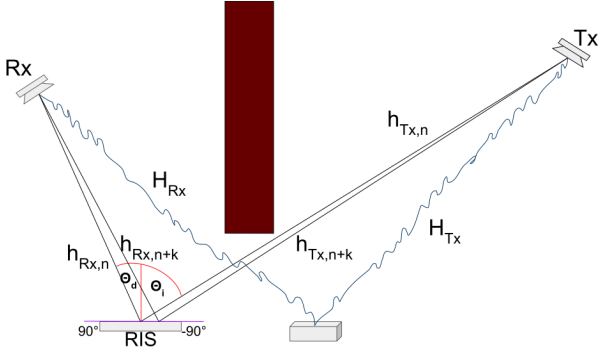
Ze względu na specyfikę matryc RIS, ich pomiar wymaga szczególnego podejścia. Metody pomiarowe zależą od oczekiwanych wyników i nie zawsze są wymienne. W [2] analizowano zmianę parametru s_{21} za pomocą wektorowego analizatora sieci (VNA), pomijając potrzebę szybkiego uzyskiwania wyników i minimalizacji sprzężenia zwrotnego. Z kolei autorzy [13] zastosowali czasowe oknowanie na podstawie wcześniej wyznaczonego momentu, w prowizorycznej komorze bez ehowej, osiągając dużą precyzję. Podejście to jednak pomija wielodrogowość rzeczywistych systemów komunikacji radiowej. Systemy o wiele bliższe warunkom rzeczywistym przedstawione są w [12, 3]. Używane tam układy dobrze przedstawiały prawdziwe warunki, ale metodyka tworzenia książek kodowych i interpretacja wyników nie brała pod uwagę wielodrogowości (w konsekwencji może dojść do interferencji destrukcyjnej).

W niniejszej pracy, przedstawiono metodę tworzenia książki kodowej, która stara się jak najlepiej uwzględnić powyższe ograniczenia istniejących rozwiązań. Poprzez model matematyczny stworzono zbiór rozwiązań, którego rozmiar następnie zminimalizowano prostymi metodami w celu otrzymania niewielkiej, lecz skutecznej książki kodowej, jednocześnie uwzględniającej wielodrogową naturę

propagacji fal elektromagnetycznych.

2. MODEL SYSTEMU

W ramach tej publikacji zaprojektowano system transmisyjny, zawierający jedną matrycę RIS, statyczny nadajnik (Tx) pełniący rolę stacji bazowej oraz odbiornik (Rx) pełniący rolę użytkownika, mogącego znajdować się w dowolnym punkcie wcześniej określonej przestrzeni. Między odbiornikiem a nadajnikiem postawiono ścianę silnie tłumiącą sygnały radiowe, co spowodowało, że do odbiornika dochodził tylko sygnał z ścieżek NLOS, tak jak pokazano na rysunku 1.



Rysunek 1: Diagram przedstawiający układ pomiarowy oraz zjawisko wielodrogowości występujące w nim

Odbiornik, składający się z układu antena-analizator widma, sprawdzał poziom mocy na częstotliwości nośnej. Tę odbieraną moc można opisać jako:

$$P_i = \left| H_i + \sum_n h_{n,i} r_n \right|^2 |x|^2 \quad (1)$$

gdzie x to przesłany, zespolony symbol, A_i to zespolona odpowiedź kanału wszystkich ścieżek poza ścieżką przez RIS, $h_{n,i}$ to odpowiedź impulsowa n -tego elementu RIS dla i -tej lokalizacji odbiornika, a r_n to współczynnik odbicia n -tego elementu RIS.

Jeśli RIS znajduje się w polu dalekim względem nadajnika i odbiornika, to amplituda kanałów odbitych od RIS jest równa dla każdego elementu, to jest: $\forall n \neq \bar{n} |h_{n,i}| = |h_{\bar{n},i}|$. W takim przypadku maksymalizacja odbieranej mocy może zostać osiągnięta ustawiając współczynniki odbicia na:

$$r_n = \exp(-j \arg(h_{n,i}) + j \arg(H_i)), \quad (2)$$

Gdzie $\arg(\cdot)$ oznacza argument liczby zespolonej. Znalezienie właściwych współczynników odbicia jest jednak bardzo trudne jeśli znana jest tylko odpowiedź połączonego kanału, lub moc przy odbiorniku. Najprostszą metodą było by wykonanie N pomiarów, każdy dla zmienionego jednego elementu RIS [2]. Taka metoda jednak może okazać się bardzo czasochłonna, szczególnie dla matrycy z dużą ilością elementów lub długimi czasami przełączania elementów. Dodatkowo jeśli H_i jest zależne od czasu koherencji kanału, na przykład w przypadku ruchomego lub pustelniczego UE, niemożliwym może okazać się sprawdzenie dostatecznie dużej ilości elementów RIS do wiarygodnego wyznaczenia r_n . Na przykład dla używanego przez nas RIS (OpenSourceRIS [1]) według naszych pomiarów czas przełączania wzorca wynosił $T_{\text{RIS}} = 22\text{ms}$,

a czas koherencji kanału dla używanej przez nas częstotliwości (5,59 GHz) może sięgać 30 ms. Nawet zakładając, że T_{RIS} dla nowoczesnych RIS może być 10-krotnie mniejszy, to nadal możliwe będzie przebadanie tylko 13 konfiguracji przed tym jak kanał radiowy ulegnie zmianie. Z tych powodów aby efektywnie używać RIS do określenia optymalnych wzorców RIS dla danego środowiska, potrzeba jak najmocniej ograniczyć ilość badanych konfiguracji.

3. GENEROWANIE OGRANICZONEJ KSIĄŻKI KODOWEJ

Jedną z opcji jest zbudowanie książki kodowej wykorzystującej wiedzę na temat informacji kontekstowych (np. na temat lokalizacji RIS i nadajnika) oraz właściwości kanału LoS, zarówno dla kanałów TX-RIS, jak i RIS-RX.

Dla płaskiego RIS, współczynniki odbicia dla n -tego elementu RIS równają się [3]:

$$r_n^{(LoS)}(\phi_T, \theta_T, \phi_R, \theta_R) = \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta_T \cos \phi_T + y_n \sin \theta_T \sin \phi_T) + j \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta_R \cos \phi_R + y_n \sin \theta_R \sin \phi_R)\right), \quad (3)$$

gdzie: Tx znajduje się pod kątem elewacji ϕ_T i kątem azymutu θ_T , Rx znajduje się pod kątem elewacji ϕ_R i kątem azymutu θ_R , z kątami równymi 0, jeśli dana pozycja znajduje się na normalnej do centrum powierzchni RIS, a x_n i y_n to współrzędne geometryczne MN-tego elementu matrycy RIS.

Jednak współczynnik odbicia obliczony w powyższy sposób może nie być zgodny z kanałem H_i niebędącym kanałem z matrycą RIS. Dlatego nawet dla znanych kątów azymutu i elewacji TX-RIS-RX, wielokrotne przesunięcia fazy prekodera φ_s , które są równoważne $\arg(H_i)$ w (2). Co więcej, ponieważ wiele praktycznych realizacji RIS ma tylko kilka możliwych kątów odbicia na element, można je modelować za pomocą funkcji kwantyzacji fazy $Q(\cdot)$, co daje prekoder:

$$\tilde{r}_n(\phi_T, \theta_T, \phi_R, \theta_R, \varphi_s) = Q(r_n^{(LoS)}(\phi_T, \theta_T, \phi_R, \theta_R) \exp(j\varphi_s)). \quad (4)$$

Jeśli rozważany jest idealny binarny RIS, funkcja kwantyzacji może być modelowana jako

$$Q(x) = 2H(\text{Re}(x)), \quad (5)$$

gdzie $H(\cdot)$ oznacza funkcję skokową Heaviside'a. Należy zauważyć, że w przypadku praktycznej realizacji RIS to odwzorowanie może być nieco inne i może zmieniać się wraz z częstotliwością roboczą [1].

Książkę kodową można zaprojektować przy użyciu informacji kontekstowych o geometrii TX-RIS-RX. Bez utraty ogólności można założyć, że wszystkie elementy znajdują się na tej samej wysokości, co daje $\phi_T = \phi_R = 0$. Ponadto, podczas gdy położenie nadajnika w stosunku do RIS nie zmienia się, można założyć, że θ_T jest stałą. Należy jednak wziąć pod uwagę wiele azymutów RX, oznaczonych jako zbiór \mathbb{R} o mocy zbioru $|\mathbb{R}|$ z $\theta_T \in \mathbb{R}$. Podczas gdy dla każdej lokalizacji geometrycznej powinniśmy rozważyć wiele obrotów prekodera, oznaczonych jako zbiór \mathbb{S} z $\varphi_s \in \mathbb{S}$, całkowita liczba elementów w książce kodowej (zbiór \mathcal{P}) jest równa $|\mathbb{S}||\mathbb{R}|$. Zakładając, że UE są rozmieszczone w azymutach od 0° do 90° , z ziarnistością 1°

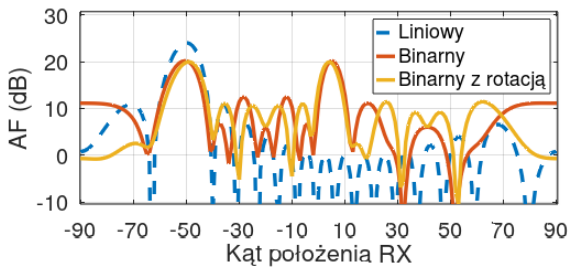
i $\mathbb{S} = \{0, 1, \dots, 359\}$, całkowita liczba elementów w książce kodowej wynosi 32400.

Zaobserwowano jednak, że ta książka kodowa może zostać zmniejszona bez utraty jej efektywności. Możemy tę własność przypisać funkcji kwantyzacji. Aby to uzasadnić, zacznijmy od zdefiniowania charakterystyki odbiciowej matrycy RIS (Array Factor – AF) dla kątów obserwacji: azymutu θ i elewacji ϕ jako:

$$\text{AF}(\theta, \phi) = \sum_n r_n \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta_T \cos \phi_T + y_n \sin \theta_T \sin \phi_T) - j \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta \cos \phi + y_n \sin \theta \sin \phi) \right), \quad (6)$$

gdzie θ_T i ϕ_T to rzeczywiste kąty azymutu i elewacji z perspektywy RIS, a r_n to wykorzystany współczynnik odbicia RIS w n -tym jej elemencie.

Biorąc pod uwagę matrycę RIS z 16 rzędami i 16 kolumnami, co daje $N = 256$ elementów, z nadajnikiem umieszczonym pod kątem azymutu $\theta_T = 20^\circ$, odbiornikiem pod $\theta_R = -50^\circ$ i odpowiednio zaprojektowanymi współczynnikami odbicia RIS, uzyskany AF jest przedstawiony na Rys. 2. Wszystkie kąty elewacji są równe 0° . Najpierw przedstawiono *Liniowy* AF, który zakłada, że RIS pozwala na ciągle dostrajanie współczynnika odbicia w zakresie $[0; 2\pi]$. Ma on pojedyncze maksimum wynoszące 24 dB. Jednakże, jeśli używana jest binarna matryca RIS, maksymalne wzmocnienie, w wyniku kwantyzacji, zmniejsza się do około 20 dB. Interesujące jest natomiast drugie otrzymywane maksimum dla kąta RX $\theta \approx 5^\circ$. W kontekście projektowania książki kodowej oznacza to, że jeden wzór odbicia może obsługiwać UE znajdujące się na znacznie różnych azymutach. Co więcej, szerokość wiązek obejmuje kilka stopni, co oznacza, że UE znajdujące się blisko siebie mogą być obsługiwane przez tę samą wiązkę. Dodatkowo należy zauważyć, że jeśli współczynniki odbicia zostaną obrócone o $\varphi_s = 90^\circ$, w celu wyrównania odbicia RIS z fazą H_i , otrzymamy nieco inne AF, jednak nadal mające niemal identyczne maksima na tych samych dwóch kierunkach.



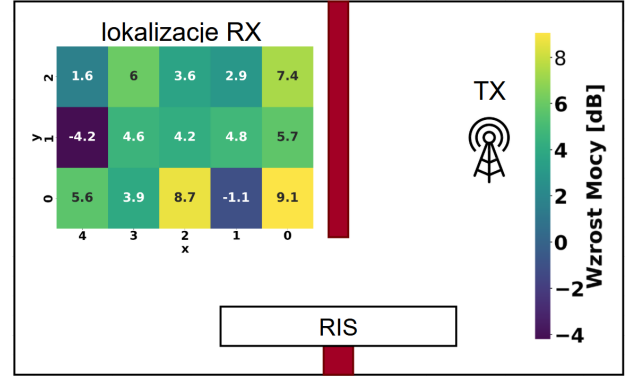
Rysunek 2: Przykładowa teoretyczna charakterystyka odbiciowa wzorca wygenerowanego dla $\theta_i = 20$ i $\theta_d = -50$; Liniowy – zakłada możliwość liniowego dostrajania współczynnika odbicia w zakresie $[0; 2\pi]$; Binarny – charakterystyka wzorca skwantowanego binarnie o $\varphi_s = 0$; Binarny z rotacją – charakterystyka wzorca skwantowanego binarnie o $\varphi_s = 90$

Analizując dalej zawartość wygenerowanej książki kodowej, zauważono, co wynika z procesu binarnej kwantyzacji wyznaczonych przesunięć fazy, że wiele wzorców się powtarza, eliminując powtórzenia powstanie podzbiór wzorców $\tilde{\mathcal{P}}$:

$$\forall \mathcal{P}_j \in \{\mathcal{P}\} : (\mathcal{P}_j \notin \tilde{\mathcal{P}}) \implies \tilde{\mathcal{P}} \leftarrow (\tilde{\mathcal{P}} \cup \{\mathcal{P}_j\}). \quad (7)$$

Rozmiar zbioru $\tilde{\mathcal{P}}$ to zaledwie 495. Zatem sama ta operacja ogranicza rozpatrywaną przestrzeń rozwiązań o ponad 98%. Z tak przygotowaną książką kodową można podejść do wykonania pomiarów, ponieważ ilość wzorców w tak przygotowanej książce kodowej bez problemu można zmierzyć w wymiernym czasie.

Po wykonaniu pomiarów, można dodatkowo zredukować rozmiar książki kodowej, wybierając wzorce dające najwyższy poziom odebranej mocy w zadanych lokalizacjach. W niniejszej pracy w części doświadczalnej, przyjęto metodę, polegającą na prostym wybieraniu jednego wzorca dla jednej lokalizacji.



Rysunek 3: Heatmap'a przedstawiająca różnice w poziomie mocy w badanych punktach $R_{i=(y,x)}$ dla ograniczonej książki kodowej w odniesieniu do scenariusza bez RIS

4. TEST KSIĄŻKI KODOWEJ

W niniejszej pracy jako miarę parametrów radiowych, przyjęto przepływność kanału, obliczaną na podstawie twierdzenia Shannona:

$$\mathbf{C} = \mathbf{W} \log_2(1 + \text{SNR}), \quad (8)$$

gdzie, \mathbf{C} to całkowita przepływność kanału, \mathbf{W} to szerokość pasma, a SNR to stosunek sygnału do szumu. Założono, że szerokość pasma to 200 MHz, a poziom szumu to -50 dBm.

Pomiary poziomów mocy wykonano w pomieszczeniu, korzystając z analizatora widma R&S FSV3000 (Rx) oraz generatora sygnałów R&S SMM100A (Tx), anten kierunkowych METIS 5.1-5.8 GHz, matrycy RIS [1] umieszczonych na tej samej wysokości oraz modułów UWB DecaWave Trek1000 w celu pomiarów lokalizacji elementów systemu pomiarowego, zgodnego z 1.

Wykonano następujące serie pomiarowe mocy odbieranej przez odbiornik: pełnej książki kodowej, mocy referencyjnej (bez matrycy RIS) i ograniczonej książki kodowej. Podczas pomiarów ustawiano odbiornik, w 15 ustalonych położeniach. Po wykonaniu pomiarów pełnej książki kodowej przygotowano jej ograniczoną wersję do drugiej serii pomiarów, wybierając wzorce dające najwyższy odebrany poziom mocy dla każdej z lokalizacji. Następnie przetestowano wybrane 15 wzorców w drugiej iteracji pomiarów, ponownie umieszczając odbiornik w tych samych pozycjach. Wyniki pomiarów oraz obliczeń przepływności w danych pozycjach przedstawiono w tabeli 1. Geometryczny rozkład różnic mocy uzyskanych w przypadku stosowania matrycy RIS z ograniczoną książką kodową,

w stosunku do jej braku przedstawiono na rysunku 3. Celem wykonywania pomiarów z matrycą RIS w oddzielnych seriach, było nieidealne ponowne rozmieszczenie odbiornika, co pozwoliło sprawdzić zaproponowane rozwiązanie w praktycznym zastosowaniu.

Tabela 1: Moc odebrana przez odbiornik – P i przepływność kanału – C

$K\alpha t$ [°]	$P z$ RIS [dBm]	$P bez$ RIS [dBm]	$C z$ RIS [MB/s]	$C bez$ RIS [MB/s]
-3.7	-41.9	-46.7	89.2	50.2
-3.3	-45.4	-45.0	84.7	61.7
-1.8	-45.4	-48.9	77.2	24.9
10.8	-54.0	-50.2	44.9	7.4
15.0	-41.0	-42.5	89.1	73.7
22.4	-51.1	-39.8	79.5	83.0
27.9	-46.5	-44.5	79.7	64.6
35.6	-41.4	-42.7	86.9	72.8
40.8	-51.3	-48.3	74.7	34.4
43.9	-46.1	-49.7	79.0	8.2
49.0	-45.4	-46.3	76.7	53.5
51.8	-51.9	-47.6	55.1	41.8
55.5	-48.8	-43.9	37.0	67.6
59.3	-40.4	-45.1	78.7	61.3
66.9	-44.1	-50.1	64.5	3.2
ŚREDNIA	-41.89	-46.08	73.1	47.2

5. PODSUMOWANIE

Zaproponowane rozwiązanie w niniejszej pracy uważalnie poprawia przepływność kanału. Metoda ta pozostawia jednak dalsze pole do rozwoju, nad czym autorzy aktualnie pracują. Odpowiednie dobranie wzorczy, podczas minimalizowania rozmiarów książki kodowej jest zadaniem trudnym. Rozważyć należy podejścia oparte na uczeniu maszynowym (jednak tutaj znów wraca problem zapotrzebowania na moc obliczeniową), klastrowaniu (metoda ta prawdopodobnie dała by lepsze rezultaty, gdyby zagęszczono sieć pomiarów) lub algorytmach genetycznych (tutaj wyzwaniem jest odpowiednie zdefiniowanie problemu).

6. PODZIĘKOWANIA

Praca powstała w ramach projektu badawczego OPUS 2021/43/B/ST7/01365 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w Polsce.

LITERATURA

- [1] Heinrichs, Markus, Aydin, Sezgin, and Rainer, Kronberger. "Open Source Reconfigurable Intelligent Surface for the Frequency Range of 5 GHz WiFi." In 2023 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP) (pp. 1-2).2023.
- [2] Tewes, Simon, Markus, Heinrichs, Kevin, Weinberger, Rainer, Kronberger, and Aydin, Sezgin. "A comprehensive dataset of RIS-based channel measurements in the 5GHz band." In 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring) (pp. 1-5).2023.
- [3] Trichopoulos, Georgios C., Panagiotis, Theofanopoulos, Bharath, Kashyap, Aditya, Shekhawat, Anuj, Modi, Tawfik, Osman, Sanjay, Kumar, Anand, Sengar, Arkajyoti, Chang, and Ahmed, Alkhateeb. "Design and Evaluation of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Real-World Environment".IEEE Open Journal of the Communications Society 3 (2022): 462-474.
- [4] J. An, C. Xu, L. Wang, Y. Liu, L. Gan and L. Hanzo, "Joint Training of the Superimposed Direct and Reflected Links in Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Multiuser Communications," in IEEE Transactions on Green Communications and Networking, vol. 6, no. 2, pp. 739-754, June 2022, doi: 10.1109/TGCN.2022.3143226.
- [5] Zhang, Hongliang, and Boya, Di. "Intelligent Omni-Surfaces: Simultaneous Refraction and Reflection for Full-Dimensional Wireless Communications".IEEE Communications Surveys & Tutorials 24, no.4 (2022): 1997-2028.
- [6] ETSI, . 2023. "Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Use Cases, Deployment Scenarios and Requirements." ETSI, 2023.
- [7] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 11, pp. 5394-5409, Nov. 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2936025.
- [8] Liu, Ruiqi, Jianwu, Dou, Ping, Li, Jianjun, Wu, and Yijun, Cui. "Simulation and Field Trial Results of Reconfigurable Intelligent Surfaces in 5G Networks".IEEE Access 10 (2022): 122786-122795.
- [9] Huiying Yang, Rujing Xiong, Yao Xiao, Zhijie Fan, Tiebin Mi, Robert Caiming Qiu, Zenan Ling. "Codebook Configuration for RIS-aided Systems via Implicit Neural Representations", arXiv:2306.00544
- [10] Renzo, DT. et al.. "Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come".EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2019, no.129 (2019).
- [11] J. An and L. Gan, "The Low-Complexity Design and Optimal Training Overhead for IRS-Assisted MISO Systems," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 8, pp. 1820-1824, Aug. 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3082773
- [12] X. Pei et al., "RIS-Aided Wireless Communications: Prototyping, Adaptive Beamforming, and Indoor/Outdoor Field Trials," in IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 12, pp. 8627-8640, Dec. 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2021.3116151
- [13] H. -D. Lang et al., "Validating Convex Optimization of Reconfigurable Intelligent Surfaces via Measurements," 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Glasgow, United Kingdom, 2024, pp. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501015.