

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 Matryc Antenowych (ang. Reconfigurable Intelligent Surfaces – 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 rozważanych w kontekście rozwoju sieci bezprzewodowych jest wykorzystanie Rekonfigurowalnych Matryc Antenowych (ang. Reconfigurable Intelligent Surfaces – RIS) [1]. RIS to elementy umieszczone w środowisku propagacyjnym (pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem), których zdalne sterowanie umożliwia modyfikację charakterystyk kanału radiowego w celu uzyskania pożądanych efektów po stronie odbiornika [2]. Dzięki temu możliwa jest, np. zmiana kąta odbicia sygnału, niezależnie od reguł optyki geometrycznej, skutkując poprawą jakości odbieranego sygnału, np. zwiększeniem jego mocy lub redukcją zakłóceń [3]. Liczba elementów antenowych w matrycy wpływa na jej zdolność do kształtowania propagacji. Jeśli każdy z L elementów może przy-

jmować jeden z K stanów (np. fazowych), to możliwych jest K^L różnych wzorców odbicia.

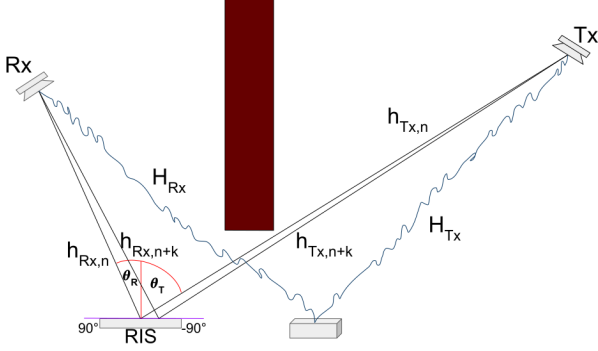
Ze względu na ogromną przestrzeń możliwości, praktyczne rozwiązania skupiają się na stosowaniu książek kodowych, bądź algorytmów korzystających z informacji kontekstowych. Książka kodowa to zbiór wzorców do stosowania z matrycą, gdzie wzorec stanowi zbiór stanów wszystkich elementów RIS. W literaturze opisano m.in. książki kodowe oparte na: losowości [4], odległościach Euklidesowych wzorców [5] oraz optymalizacji alternatywnej (AO) [6]. Drugą grupą opisanych metod wyznaczania wzorców do stosowania z matrycami RIS są metody algorytmiczne, do których można zaliczyć: modele matematyczne [7], metody uczenia maszynowego [8], czy też heurystyki dopasowujące kanał do odbiornika o nieznanej lokalizacji [9]. 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 [9] analizowano zmiany zysku mocy odebranej w komorze bezechowej. Z kolei autorzy [10] zastosowali okno czasowe na podstawie wcześniej wyznaczonego momentu odebrania fali, w prowizorycznej komorze bezechowej, osiągając dużą precyzję pomiaru. Podejścia te jednak pomijają wielodrogowość sygnałów w rzeczywistych systemach komunikacji radiowej. Systemy o wiele bliższe warunkom rzeczywistym przedstawione są w [7], [11]. Używane tam układy dobrze przedstawiały prawdziwe warunki, ale metodyka tworzenia książek kodowych i interpretacja wyników nie brały pod uwagę wielodrogowości lub pomiary wykonywano w specyficznych warunkach.

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 (UE), mogącego znajdować się w dowolnym punkcie wcześniej określonej przestrzeni. Między Rx a Tx postawiono ścianę silnie tłumiącą sygnały radiowe, aby do Tx dochodził tylko sygnał z dróg bez widoczności bezpośredniej anten (NLoS) (Rys. 1).



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

Rx sprawdza na częstotliwości nośnej poziom mocy, który 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, H_i to zespolona odpowiedź kanału wszystkich dróg poza drogą przez RIS, $h_{n,i}$ to odpowiedź impulsowa n -tego elementu RIS dla i -tej lokalizacji Rx, a r_n to współczynnik odbicia n -tego elementu RIS.

Jeśli RIS znajduje się w polu dalekim względem Tx i Rx, to amplituda odpowiedzi impulsowych kanałów odbitych od RIS jest równa dla każdego elementu, co można zapisać jako: $\forall_{n \neq \bar{n}} |h_{n,i}| = |h_{\bar{n},i}|$. 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. Znaleźnię właściwych r_n jest jednak bardzo trudne, jeśli znana jest tylko odpowiedź połączonego kanału lub moc przy Rx. Najprostszą metodą było by wykonanie N pomiarów, każdy dla zmienionego jednego elementu RIS [9]. Takie podejście może okazać się bardzo czasochłonne, szczególnie dla matryc z dużą ilością elementów lub długimi czasami przełączania elementów. Dodatkowo jeśli H_i jest zależne od czasu koherencji kanału, na przykład w przypadku ruchu samego lub nomadycznego UE, niemożliwym może okazać się sprawdzenie dostatecznie dużej ilości elementów RIS do wiarygodnego wyznaczenia r_n . Na przykład dla używanego w tej pracy RIS (OpenSourceRIS [12]) według wykonanych przez autorów 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 Tx) oraz właściwości kanałów widoczności bezpośredniej (LoS): Tx-RIS oraz RIS-Rx.

Dla płaskiego RIS, współczynniki odbicia dla n -tego elementu RIS równają się [7]:

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

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 N -tego elementu matrycy RIS.

Jednak r_n obliczony w powyższy sposób może nie być zgodny z kanałem H_i . 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, które można 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 Heavyside'a. Należy zauważyć, że w przypadku praktycznej realizacji RIS to odwzorowanie może być nieco inne i może zmieniać się wraz z częstotliwością roboczą [12].

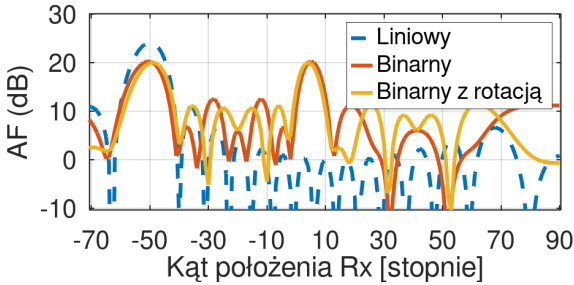
Książkę kodową można zaprojektować przy użyciu informacji kontekstowych o geometrii Tx–RIS–Rx. Bez utraty ogólności można założyć, że wszystkie elementy znajdują się na tej samej wysokości, co daje $\phi_T = \phi_R = 0$. Ponadto, jeżeli położenie Tx w stosunku do RIS nie zmienia się, można założyć, że θ_T jest stałą. Należy jednak wziąć pod uwagę wiele azymutów Rx, oznaczonych jako zbiór \mathbb{R} , o mocy $|\mathbb{R}|$, z $\theta_T \in \mathbb{R}$. Dla każdej lokalizacji geometrycznej Rx powinniśmy rozważyć wiele obrotów prekodera, oznaczonych jako zbiór \mathbb{S} ($\varphi_s \in \mathbb{S}$). Wówczas całkowita liczba elementów w książce kodowej (zbiór \mathcal{P}) wyniesie $|\mathbb{S}||\mathbb{R}|$. Zakładając, że Rx są rozmieszczone w azymutach od 0° do 90° , z rozdzielczością 1° i $\mathbb{S} = \{0, 1, \dots, 359\}$, całkowita liczba elementów w książce kodowej wyniesie 32400.

Zaobserwowano jednak, że taka 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, Tx umieszczonym w $\theta_T = 20^\circ$, Rx pod $\theta_R = -50^\circ$ i odpowiednio zaprojektowanymi r_n , uzyskamy AF, przedstawiony na Rys. 2. Kąty elewacji są równe 0° . Przedstawiony *Liniowy* AF, zakłada, że RIS pozwala na ciągłe dostrajanie r_n w zakresie $[0; 2\pi]$. Ma on pojedyncze maksimum wynoszące 24 dB. Jednakże, jeśli używana jest binarna matryca RIS, maksymalny zysk wynikający z jej zastosowania, zmniejsza się do około 20 dB. Interesujące jest drugie otrzymywane maksimum dla kąta Rx $\theta \approx 5^\circ$. W kontekście projektowania książki kodowej oznacza to, że jeden wzór odbicia może obsługiwać UE znajdujący 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 przesunięte o $\varphi_s = 90^\circ$, w celu wyrównania odbicia RIS z fazą H_i , otrzymamy AF o bardzo podobnych maksimach.



Rysunek 2: Przykładowy teoretyczny AF wzorca dla: $\theta_T = 20$, $\theta_R = -50$; Liniowy – zakłada możliwość liniowego dostrajania r_n w zakresie $[0; 2\pi]$; Binarny – AF wzorca skwantowanego binarnie z $\varphi_s = 0$; Binarny z rotacją – AF wzorca skwantowanego binarnie z $\varphi_s = 90$.

Analizując zawartość wygenerowanej książki kodowej, zauważono, co wynika z procesu binarnej kwantyzacji RIS, 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 w analizowanym przypadku 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. Tak wybrane wzorce utworzą ograniczoną książkę kodową.

4. TEST KSIĄŻKI KODOWEJ

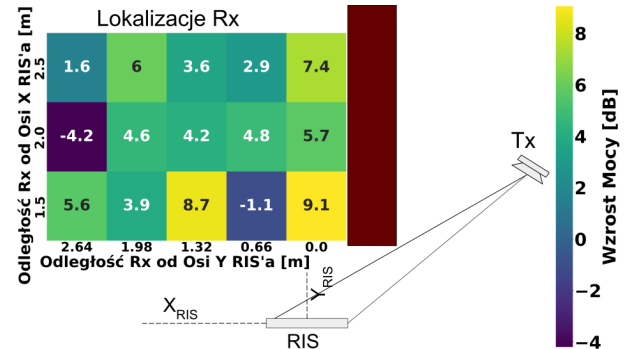
W niniejszej pracy jako miarę parametrów radiowych, przyjęto przepływność kanału, obliczaną na podstawie twierdzenia Shannona:

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

gdzie, C to całkowita przepływność kanału, W to szerokość pasma, a SNR to stosunek sygnału do szumu. Założono, że szerokość pasma to 80 MHz, a poziom szumu to -50 dBm.

Pomiary poziomów mocy wykonano w pomieszczeniu, dla częstotliwości nośnej 5,53 GHz, korzystając z analizatora widma R&S FSV3000 (Rx), generatora sygnałów R&S SMM100A (Tx), anten kierunkowych METIS 5.1-5.8 GHz, matrycy RIS [12] oraz modułów UWB DecaWave Trek1000. Anteny i RIS umieszczono na tej samej wysokości, a moduły UWB zastosowano w celu pomiarów lokalizacji elementów systemu pomiarowego.

W celu wykonania odniesienia, dla efektywności proponowanej przez nas metody, zastosowano zmodyfikowaną metodę element po elemencie [9], do metody kolumna po kolumnie [11].



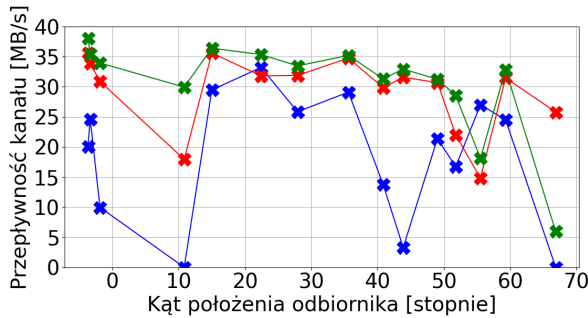
Rysunek 3: Heatmap'a przedstawiająca rozkład mocy odbieranej w badanych ustawieniach Rx, stosując ograniczoną książkę kodową. Moc przedstawiona jest w formie wzrostu względem scenariusza bez RIS. Oś X przedstawia odległość w metrach od ściany blokującej sygnał, a oś Y odległość od płaszczyzny, w której znajduje się RIS (również w metrach).

Pierwszy pomiar wykonano z pełną książką kodową. Następnie przygotowano ograniczoną wersję do drugiej serii pomiarów, w której wykonano pomiary poziomów mocy: referencyjnej (bez matrycy RIS), dla optymalizacji matrycy metodą kolumna po kolumnie i ograniczonej książki kodowej.

Podczas pomiarów ustawiano Rx, w 15 ustalonych położeniach (Rys. 3). Celem wykonywania pomiarów z

matrycą RIS w oddzielnych seriach, było nieidealne ponowne rozmieszczenie Rx, co pozwoliło sprawdzić zaproponowane rozwiązanie w bardziej praktycznym zastosowaniu.

Geometryczny rozkład wyników pomiarów poziomów mocy przedstawiono częściowo na rysunku 3. Na podstawie otrzymanych poziomów mocy dokonano obliczeń przepływności kanału, których wyniki przedstawiono na rysunku 4. Zastosowanie matrycy RIS podniosło przepływność kanału, z punktu widzenia użytkownika, szczególnie wtedy, kiedy przepływność bez RIS byłaby bliska zeru.



Rysunek 4: Wyniki obliczeń przepływności kanału w zmierzonych scenariuszach: *niebieski* – bez matrycy RIS, *czerwony* – z ograniczoną książką kodową, *zielony* – stosując metodę optymalizacji wzorca RIS kolumna po kolumnie.

5. PODSUMOWANIE

Rozwiązanie zaproponowane w niniejszej pracy zauważalnie poprawia przepływność kanału, szczególnie w sytuacjach skrajnych – kiedy kanał bez RIS zapewnia niewielką lub żadną przepływność, umieszczenie matrycy RIS z odpowiednim wzorcem zapewnia transmisję o zbliżonej przepustowości do pozostałych lokalizacji. Metoda ta daje bardzo zbliżone wyniki, w stosunku do optymalizacji elementów RIS metodą kolumna po kolumnie, zapewniając tylko jedno przełączenie matrycy, a więc nie przekraczając czasu koherencji kanału radiowego dla testowanej częstotliwości (co ma miejsce w przypadku optymalizacji). Kosztem tego rozwiązania jest potrzeba znajomości lokalizacji UE. Zastosowana w tej pracy metoda doboru wzorców, do ograniczonej książki, pozostawia też dalsze pole do jej rozwoju, nad czym autorzy aktualnie pracują. Odpowiednie dobranie wzorców, które podczas minimalizowania rozmiarów książki kodowej się w niej znajdują, jest zadaniem trudnym. Rozważyć należy podejścia oparte na: programowaniu liniowym (trudność stanowi maksymalizacja funkcji wypukłej), uczeniu maszynowym (jednak tutaj znów wraca problem zapotrzebowania na moc obliczeniową), klastrowaniu (metoda ta prawdopodobnie dała by dobre 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.

REFERENCES

- [1] ETSI, “Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Use Cases, Deployment Scenarios and Requirements,” ETSI, Tech. Rep. ETSI GR RIS 001 V1.1.1, 2023. [Online]. Available: <https://www.etsi.org/committee/1966-ris>.
- [2] M. Renzo, M. Debbah, and D. Phan-Huy, “Smart radio environments empowered by reconfigurable ai meta-surfaces: An idea whose time has come,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2019, no. 129, 2019. doi: 10.1186/s13638-019-1438-9.
- [3] R. Liu, J. Dou, P. Li, J. Wu, and Y. Cui, “Simulation and field trial results of reconfigurable intelligent surfaces in 5g networks,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 122 786–122 795, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3223447.
- [4] J. An and L. Gan, “The low-complexity design and optimal training overhead for irs-assisted miso systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. PP, pp. 1–1, May 2021. doi: 10.1109/LWC.2021.3082773.
- [5] 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,” *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 739–754, 2022. doi: 10.1109/TGCN.2022.3143226.
- [6] Q. Wu and R. Zhang, “Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, 2019. doi: 10.1109/TWC.2019.2936025.
- [7] G. C. Trichopoulos, P. Theofanopoulos, B. Kashyap, et al., “Design and evaluation of reconfigurable intelligent surfaces in real-world environment,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 462–474, 2022. doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3158310.
- [8] H. Yang, R. Xiong, Y. Xiao, et al., “Codebook configuration for ris-aided systems via implicit neural representations,” in *ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications*, 2024, pp. 1449–1454. doi: 10.1109/ICC51166.2024.10623051.
- [9] S. Tewes, M. Heinrichs, K. Weinberger, R. Kronberger, and A. Sezgin, “A comprehensive dataset of ris-based channel measurements in the 5ghz band,” in *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*, 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200973.
- [10] H.-D. Lang, M. A. Nyffenegger, S. Keller, et al., “Validating convex optimization of reconfigurable intelligent surfaces via measurements,” in *2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2024, pp. 1–5. doi: 10.23919/EuCAP60739.2024.10501015.
- [11] X. Pei, H. Yin, L. Tan, et al., “Ris-aided wireless communications: Prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 12, pp. 8627–8640, 2021. doi: 10.1109/TCOMM.2021.3116151.
- [12] M. Heinrichs, A. Sezgin, and R. Kronberger, “Open source reconfigurable intelligent surface for the frequency range of 5 ghz wifi,” in *2023 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP)*, 2023, pp. 1–2. doi: 10.1109/ISAP57493.2023.10389095.