講演番号：44

調整可能遅延 IRS のシングルキャリヤ空中等化への適用

Application of Adjustable-Delay IRS to Single-Carrier Spatial Equalization

倉島 賢人 Kento Kurashima　　**宮嶋 照行** Teruyuki Miyajima

茨城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

1　まえがき

知的反射板 (IRS) は多数の反射素子を備えており，各素子で反射波の位相を変化させることで無線通信環境を人工的に再構築することができる．最近，反射波に可変の遅延を与えることができる調整可能遅延 IRS(Adjustable-Delay IRS) が提案され，マルチキャリヤ伝送への応用が検討された [1]．一方，IRS の利用方法の一つとしてシングルキャリヤ伝送の空中等化がある [2]．これは送受信機で複雑な等化処理を行う必要がないという利点がある．本稿では，シングルキャリヤ伝送の空中等化に AD-IRS を用いることを検討する．

2　システムモデルと AD-IRS の設計法

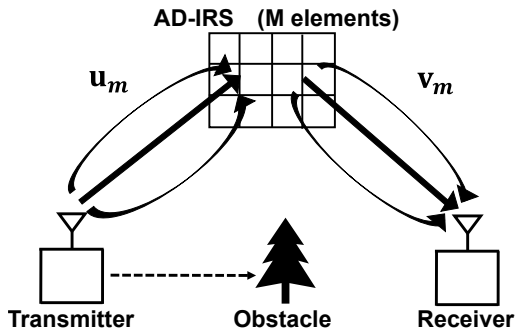

図 1　AD-IRS を用いる空中等化システム．

図 1 の空中等化システムを考える．単一アンテナの送受信機が M 個の素子を持つ AD-IRS を経由してシングルキャリヤ伝送を行う．送信機は時刻 k に情報シンボル s_k を送信する．送信機と IRS の m 番目の素子間，m 番目の素子と受信機間はいずれも周波数選択性通信路であり，通信路インパルス応答 (CIR) をそれぞれ $\mathbf{u}_m \in \mathbb{C}^{L_1+1}, \mathbf{v}_m \in \mathbb{C}^{L_2+1}$ とする．δ を判定遅延とする時，受信機では受信信号 r_k から $s_{k-\delta}$ を推定する．周波数選択性通信路により $s_{k-\delta}$ は符号間干渉 (ISI) を受けているので，AD-IRS の遅延 τ_m と位相シフト ϕ_m をうまく決めることで等化を行う（ISI を抑圧する）．

遅延 τ_m と位相シフト ϕ_m を決定する方法として最強タップ整列 (STA) 法がある [1]．これを利用して，受信信号 r_k における希望成分 $s_{k-\delta}$ の電力 P_δ を最大化することで相対的に符号間干渉を抑圧し通信路等化を行うことを考える．受信信号 r_k における希望成分 $s_{k-\delta}$ の電力は $P_\delta = P\left|\sum_{m=1}^{M} e^{j\phi_m} h_{m,\delta-\tau_m}\right|^2$ となる．ここで，P は送信電力，$\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{L_1+L_2+1}$ は $\mathbf{u}_m$ と $\mathbf{v}_m$ の畳み込みで表される合成通信路の CIR であり，$h_{m,i}$ は $\mathbf{h}_m$ の i 番目の要素である．STA 法の手順を以下に示す．

- $\mathbf{h}_m$ について最大のゲインを持つ $h_{m,l}$ の要素番号を $\hat{l}_m$ とする．

$$\hat{l}_m = \arg\max_{l\in\mathcal{L}} |h_{m,l}|^2, \forall m. \tag{1}$$

ここで，$\mathcal{L} = \{\max(0, \delta-\tau_{\max}), \cdots, \min(\delta, L_1+L_2)\}$，$\tau_{\max}$ は AD-IRS で実現可能な最大の遅延時間である．

- 遅延 τ_m と位相シフト ϕ_m を以下のように決定．

$$\phi_m = e^{-j\arg\left(h_{m,\hat{l}_m}\right)}, \forall m, \tag{2}$$

$$\tau_m = \delta - \hat{l}_m, \forall m. \tag{3}$$

3　シミュレーション結果

シミュレーションにより，提案法の性能を確認する．$L_1 = L_2 = 5, \delta = \tau_{\max} = L_1 + L_2$, 雑音電力 $\sigma^2 = -100$dBm，変調方式は QPSK，試行回数は 10^4 とした．送信機，AD-IRS，受信機はそれぞれ (0m,0m,10m),(100m,-20m,10m),(120m,0m,0m) に位置する．通信路はレイリーフェージング，電力遅延プロファイルは指数減衰を仮定し，距離減衰も考慮する．送信電力を変化させたときのビット誤り率 (BER) を図 2 に示す．IRS の素子数は 32 個または 64 個とし，それぞれにおける AD-IRS と従来の遅延固定 IRS の結果を示す．32 素子の AD-IRS で STA 法を用いた場合（AD-IRS(M=32)）と 64 素子の従来の IRS で従来法 [1] を用いた場合（IRS(M=64)）を比較すると，前者は半分の素子で後者と同等の BER を達成していることが確認できる．

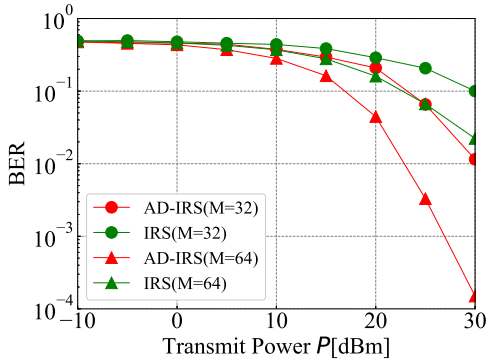

図 2　送信電力に対する BER 特性．

4　まとめ

シングルキャリヤ伝送において AD-IRS を用いた空中等化を検討し，シミュレーションにより BER 性能を評価した．

参考文献

[1] J. An, et al.,“Adjustable-Delay RIS...,” IEEE TVT, vol. 73, no. 7, pp. 9927-9942, Jul. 2024.

[2] H. Zhang, et al., “Spatial Equalization...,” Proc. IEEE ICASSP, pp. 8062–8066, Jun. 2021.

Copyright © 2025 IEICE