

IRS-STLC 시스템을 위한 Greedy 기반 양자화 위상제어

김재홍, 정진곤*

중앙대학교 전자전기공학부

{kjhct9606, jgjong}@cau.ac.kr

Greedy-Based Quantized Phase Control for IRS-STLC Systems

Jaehong Kim, Jingon Joun*

Chung-Ang University, School of Electrical and Electronics Engineering

요약

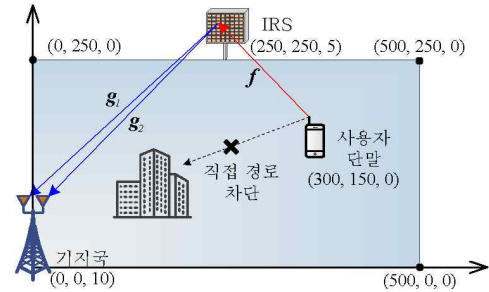
무선 채널로 전파되는 신호 위상을 조절할 수 있는 지능형 반사 표면(IRS: intelligent reflecting surface)은 기존 통신 시스템 성능 개선을 위한 새로운 패러다임으로 주목받고 있다. 본 논문에서는 최대 공간 다이버시티를 제공하는 시공간 선 부호화(STLC: space-time line code) 시스템에 IRS를 적용하고, 수신 신호 대 잡음비(SNR: signal-to-noise ratio)를 최대화하는 IRS 위상제어 설계 기법을 제안한다. 수신 SNR을 최대화하는 IRS 최적 위상제어 벡터는 semidefinite relaxation 기반 아날로그 위상제어 방식으로 생성할 수 있으나, IRS 위상제어 소자 수가 증가할수록 시그널 오버헤드가 심하게 증가하는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 IRS-STLC 시스템 오버헤드를 고려한 데이터 전송률을 정의하고, 낮은 오버헤드를 갖는 greedy 기반 IRS 양자화 위상제어 방식을 제안한다. 모의실험 결과 제안한 greedy 기반 양자화 위상제어 방식이 데이터 전송률을 향상할 수 있음을 확인하였다.

I. 서론

본 연구에서는 [1]에서 제안한 최대 공간 다이버시티 이득을 얻는 시공간 선 부호(STLC: space-time line code) 시스템에 지능형 반사 표면(IRS: intelligent reflecting surface) [2]를 적용한다. 한 송신 안테나와 두 수신 안테나로 이루어진 1x2 STLC 시스템에 N 개 위상제어 소자를 갖는 IRS를 배치하여 인위적인 통신 경로를 형성하고, 신호 대 잡음비(SNR: signal-to-noise ratio)를 최대화하는 IRS 위상제어 기법을 설계한다. 아날로그 위상제어를 위해 semidefinite relaxation (SDR) 기반 위상제어 기법은 SNR을 최대화하는 최적 위상 벡터를 설계하나, N 이 증가함에 따라 시스템 최적 위상 벡터 정보를 공유하기 위한 오버헤드가 증가하는 문제를 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 greedy 기반 양자화 위상제어 기법을 제안하고, 시스템 오버헤드를 고려한 데이터 전송률 성능을 검증한다. 모의실험 결과, N 이 증가함에 따라 1-bit greedy 기반 위상제어 기법이 최적 데이터 전송률 성능에 도달함을 확인하였다.

II. IRS-STLC 채널 및 신호 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 사용자 단말이 한 송신 안테나, 기지국 이 두 수신 안테나를 갖는 1x2 상향링크 시스템을 고려한다. 기지국과 사용자 단말은 $500 \times 250 \text{ m}^2$ 커리리지에 위치한다. 기지국과 사용자 단말 사이 직접 경로는 없다고 가정하며, N 개 위상제어 소자를 갖는 IRS를 $(250, 250, 5)$ 에 배치함으로써, 사용자 단말과 기지국 간 인위적 IRS 경로를 형성한다. 그림 1에서 확인할 수 있듯이, 송신 안테나와 IRS 사이 채널을 $\mathbf{f} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, IRS와 m 번째 수신 안테나 사이 채널을 $\mathbf{g}_m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 로 표기한다 ($m \in \{1, 2\}$). IRS 위상제어 벡터는 $\boldsymbol{\psi} = [e^{j\chi_1}, \dots, e^{j\chi_N}] \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 로 표기한다 ($\chi_n \in [0, 2\pi)$). 송신 안테나에서 IRS를 거쳐, 수신 안테나로 이어지는 실효 채널은 $h_m = \mathbf{g}_m^H \text{diag}(\boldsymbol{\psi}) \mathbf{f}$ 로 정의한다.



[그림 1] IRS-STLC 상향링크 시스템 모델.

사용자 단말이 채널 정보와 IRS 위상제어 벡터 $\boldsymbol{\psi}$ 를 알고 있다고 가정하고 다음과 같은 STLC 심볼을 생성한다 [1]:

$$s_1 = \frac{1}{\sqrt{\boldsymbol{\psi}^H \mathbf{M}_c \boldsymbol{\psi}}} (h_1^* x_1 + h_2^* x_2^*), \quad (1a)$$

$$s_2 = \frac{1}{\sqrt{\boldsymbol{\psi}^H \mathbf{M}_c \boldsymbol{\psi}}} (h_2^* x_1^* - h_1^* x_2^*). \quad (1b)$$

여기서 x_k 는 k 번째 정보 심볼이며, $\mathbb{E}[|x_k|^2] = \sigma_x^2$ 를 만족한다. s_t 는 시간 t 에 송신하는 STLC 심볼이다 ($k, t \in \{1, 2\}$). STLC 심볼은 $\boldsymbol{\psi}^H \mathbf{M}_c \boldsymbol{\psi}$ 을 사용하여 송신 전력을 정규화하며, $\mathbf{M}_c \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 다음과 같이 정의한다:

$$\mathbf{M}_c = \text{diag}(\mathbf{f})^H (\mathbf{g}_1 \mathbf{g}_1^H + \mathbf{g}_2 \mathbf{g}_2^H) \text{diag}(\mathbf{f}). \quad (2)$$

(1)에 두 STLC 심볼을 연달아 송신하고, IRS에 반사되어 기지국 두 수신 안테나에 수신된 심볼은 다음과 같이 행렬 형태로 쓸 수 있다:

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} \\ z_{2,1} & z_{2,2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

여기서, $r_{m,t}$ 는 m 번째 수신 안테나가 시간 t 에 수신 신호이며, $z_{m,t}$ 는

가우시안 잡음으로 평균이 0이며 분산이 σ_z^2 인 복소 정규 분포를 따른다.

기지국은 네 수신 신호를 선형 결합하여, 아래와 같이 x_k 를 추정한다:

$$r_{1,1} + r_{2,2}^* = \sqrt{\psi^H \mathbf{M}_c \psi} x_1 + z_{1,1} + z_{2,2}^*, \quad (4a)$$

$$r_{2,1}^* - r_{1,2} = \sqrt{\psi^H \mathbf{M}_c \psi} x_2 + z_{2,1}^* - z_{1,2}. \quad (4b)$$

이때 수신 SNR = $0.5\psi^H \mathbf{M}_c \psi \sigma_z^{-2}$ 이 된다.

III. 수신 SNR 최적화 설계 기법

1. SDR 기반 IRS 아날로그 위상제어 기법

수신 SNR을 최대화하는 IRS 위상제어 벡터 설계 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$\max_{\psi} \psi^H \mathbf{M}_c \psi \quad (5a)$$

$$\text{s.t. } |\psi_n| = 1, \forall n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}. \quad (5b)$$

문제 (5)는 non-convex이며, SDR 방식을 통해 다음과 같이 변형된다 [3]:

$$\max_{\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{2N \times 2N}} \text{tr}(\mathbf{M}\mathbf{Q}) \quad (6a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{Q}_{n,n} + \mathbf{Q}_{n+N,n+N} = \mathbf{I}, \forall n \in \mathcal{N}. \quad (6b)$$

여기서 \mathbf{M} 과 \mathbf{Q} 는 각각 complex-valued positive semidefinite 행렬인 \mathbf{M}_c 와 $\psi\psi^H$ 를 실수화한 행렬을 의미한다. Convex 문제인 (6)의 해 \mathbf{Q} 는 (5b)를 만족하기 위해 rank가 1이 되도록 Gaussian randomization 과정을 거친다.

2. Greedy 알고리즘 기반 IRS 양자화 위상제어 기법

시스템 오버헤드를 줄이기 위한 IRS 위상제어 기법으로 greedy 알고리즘을 활용한 IRS 양자화 위상제어 기법을 제안한다. 먼저, Q -bit 균일 양자화를 통한 2^Q 개 위상값 후보는 집합 \mathcal{X} 에 속한다:

$$\mathcal{X} = \left\{0, \frac{1}{2^Q}2\pi, \frac{2}{2^Q}2\pi, \dots, \frac{2^Q-1}{2^Q}2\pi\right\}. \quad (7)$$

수신 SNR 최적화하는 양자화한 IRS 위상제어 설계 문제는 다음과 같다:

$$\max_{\psi} \psi^H \mathbf{M}_c \psi \quad (8a)$$

$$\text{s.t. } \psi_n = e^{j\chi_n}, \chi_n \in \mathcal{X}, \forall n \in \mathcal{N}. \quad (8b)$$

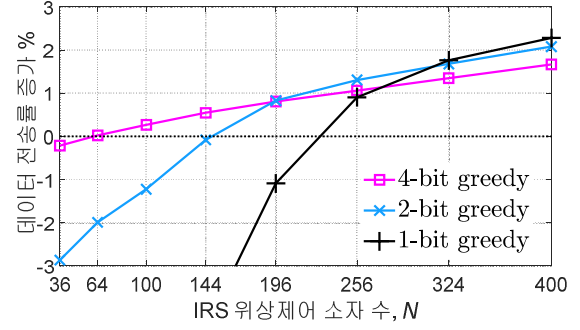
문제 (8)의 해는 알고리즘 1에 요약한 greedy 기반 방식으로 설계한다.

알고리즘 1: Greedy 기반 IRS 양자화 위상 제어 설계.

- 1 입력: 채널 정보 (\mathbf{f} , \mathbf{g}_1 , \mathbf{g}_2)와 양자화 파라미터 Q
- 2 출력: 양자화된 위상제어 벡터 $\psi_{gre}^* = [e^{j\chi_1^*}, e^{j\chi_2^*}, \dots, e^{j\chi_N^*}]$.
- 3 초기화: $\chi_n = 0, \forall n \in \mathcal{N}$, (7)에서 정의한 \mathcal{X}
- 4 \mathbf{M}_c 계산 (2)
- 5 for $n = 1$ to N 실행
- 6 $\chi_n^* = \underset{\chi_n \in \mathcal{X}}{\text{argmax}} \psi^H \mathbf{M}_c \psi$.
- 7 $\chi_n \leftarrow \chi_n^*$.
- 8 반환: $\psi_{gre}^* = [e^{j\chi_1^*}, e^{j\chi_2^*}, \dots, e^{j\chi_N^*}]$.

IV. 데이터 전송량 및 모의실험 결과

채널 추정 트레이닝과 사용자 단말에서 IRS로 전송하는 위상제어 시그널링을 포함한 IRS-STLC 시스템 오버헤드가 반영된 데이터 전송률을



[그림 2] SDR 기반 아날로그 위상제어 기법 대비 greedy 기반 양자화 위상제어 기법 데이터 전송률 증가 비율.

다음과 같이 정의한다.

$$R = (1-p)M_B \frac{T-t_p-t_c}{t_s T}. \quad (9)$$

여기서, p 는 비트오류율, M_B 는 변조 심볼당 비트 수, t_s 는 심볼 시간, 그리고 T 는 상향링크 데이터 전송 시간을 의미한다. 채널 추정을 위한 훈련 시간 $t_p = 2Nt_s$ 로, 사용자 단말에서 IRS로 보내는 위상제어 시그널링 전송 시간 $t_c = NQt_s$ 로 모델링 하였다.

그림 2는 Q -bit greedy 기법에 대한 SDR 기반 아날로그 위상제어 기법 대비 데이터 전송률 개선 비율을 비교한 결과이다. 상향링크 데이터 전송에는 16-QAM 변조 방식을 사용하였으며, $t_s = 0.1 \mu\text{sec}$, $T = 20 \text{ msec}$ 로 설정하였다. 모의실험 결과, 양자화 비트 수와 무관하게 N 이 커질수록 성능이 아날로그 위상제어 대비 데이터 전송률 향상 폭이 증가함을 확인할 수 있다. $N \leq 196$ 구간에서 4-bit greedy 기법이 가장 높은 성능을 보이나, $N \geq 324$ 부터 1-bit greedy 성능이 최적 성능을 보임을 확인하였으며, 이로써 IRS 위상제어 소자 수 N 에 따른 최적 위상 양자화 비트 수가 다르다는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 IRS-STLC 상향링크 통신을 위한 greedy 기반 양자화 위상제어 기법을 제안하였다. 제안한 greedy 기반 IRS 양자화 위상제어 기법은 SDR 기반 아날로그 위상제어 기법 대비 IRS-STLC 시스템 오버헤드를 줄여, 데이터 전송률을 향상할 수 있었다. 모의실험 결과, 1-bit greedy 기법이 N 이 324 이상인 대규모 IRS 위상제어에 가장 효과적인 위상제어 기법임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019R1A2C1084168 & 2021R1A4A2001316)

참고 문헌

- [1] J. Joung, "Space-time line code," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.
- [2] Q. Wu and R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 106-112, Jan. 2020.
- [3] Z. Luo, et al., "Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 27, no. 3, pp. 20-34, May 2010.