

위상 조향 기법을 적용한 시공간 선 부호의 공간 다중화

이기훈(충남대학교), 정방철(충남대학교), 정진곤(중앙대학교)

kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr, jgjoung@cau.ac.kr

Spatial Multiplexing of Space-Time Line Codes with Phase Steering

Ki-Hun Lee(CNU), Bang Chul Jung(CNU), Jingon Joung(CAU)

요약

본 논문은 송신안테나가 N 개이고 수신안테나가 2개인 multiple-input multiple-output (MIMO) 통신 시스템에서 시공간 선 부호 기법(Space-Time Line Code: STLC)의 공간 다중화(Spatial Multiplexing: SMX) 방법을 제안하고 모의실험을 통해 성능을 분석한다. 실험 결과 송신안테나가 두 개 보다 많아지는 경우 제안하는 STLC-SMX 시스템의 성능이 기존 STLC보다 저하되는 것을 확인하였으며, 이를 보완할 수 있는 추가적인 연구의 필요성을 확인하였다.

I. 서론

공간 다중화(Spatial Multiplexing: SMX)는 다중 안테나를 갖는 송신단이자 안테나를 통해 서로 다른 데이터 스트림을 동시에 전송함으로써 전송률을 증가시키는 기법이다. 구체적으로 송신단은 다중 안테나로부터 형성되는 다수의 독립 공간 채널에 서로 다른 스트림을 동시에 송신하고, 수신단에서 각 데이터를 검출함으로써 추가적인 시간, 주파수 자원 활용 없이 전송률을 증가시킬 수 있다 [1]. 한편, 시공간 선 부호(Space-Time Line Codes: STLC)는 송신단만 무선 채널 정보를 알고 있는 통신 환경에서 최적 공간 다이버시티 이득을 달성할 수 있는 기법이다 [2]. 최근 기존 통신 시스템 기법 중 비직교 다중 접속 및 공간 변조에 STLC 적용하고 성능을 확인하였다 [3, 4]. 본 논문에서는 [3], [4]를 기반으로 STLC의 SMX 기법(STLC-SMX)을 제안하고 그 성능을 확인한다. 특히, STLC-SMX와 기존 STLC가 같은 전송률을 가질 때, 비트 당 오류율(Bit-Error Rate: BER) 성능을 비교·분석하고 제안하는 STLC-SMX의 활용 가능성에 대해 시사한다.

II. 시공간 선 부호의 공간 다중화 시스템

본 논문에서는 송신안테나가 N 개이고 수신안테나가 2개인 통신 환경을 고려하며, 이에 따라 N 개의 독립 공간 채널이 형성된다고 가정한다. 송신단은 전송할 데이터 스트림을 송신안테나 수와 M -QAM¹의 변조 차수에 따라 $2N$ 개의 M -QAM 신호로 변조하며, 이를 STLC 신호로 부호화한 후 각 안테나를 통해 전송한다. STLC 부호화 과정에서 위상 조향 기법 [3]을 적용하며, 이로부터 각 안테나로 송신되는 STLC 신호는 다음과 같이 정의된다:

$$s_{n,1} = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{h_{n,1}^* x_{2n-1} e^{j\theta_n} + h_{n,2}^* x_{2n} e^{-j\theta_n}}{\sqrt{\gamma_n}},$$

$$s_{n,2} = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{h_{n,2}^* x_{2n-1} e^{-j\theta_n} - h_{n,1}^* x_{2n} e^{j\theta_n}}{\sqrt{\gamma_n}}, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

여기서 $x_k (k \in \{1, 2, \dots, 2N\})$ 와 $s_{n,t} (t \in \{1, 2\})$ 는 각각 송신단의 k 째 M -QAM 신호와 n 째 송신안테나로 t 째 시간 슬롯에 전송하는 STLC 신호를 의미한다. 또한, $h_{n,m} (m \in \{1, 2\})$ 은 n 째 송신안테나와 수신단의 m 째 안테나 사이 무선 채널을 의미하며, 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 두 시간 슬롯에 해당하는 STLC 신호의 전력을 정규화 하는 $\gamma_n = \|h_n\|^2$ 은 n 째 송신안테나의 무선 채널 이득을 나타내며, 여기서 $h_n = [h_{n,1} \ h_{n,2}]^T$ 는 n 째 송신안테나와 두 수신안테나 사이 무선 채널 벡터를 나타낸다. 또한, 각 송신안테나의 위상 조향 각 θ_n 은 아래와 같이 정의한다:

$$\theta_n = 2\pi(n-1)/M^N.$$

부호화된 $2N$ 개의 STLC 신호는 두 시간 슬롯에 걸쳐 N 개씩 ($s_{n,1}, s_{n,2}$) 전송되며, 수신단의 두 안테나로 수신되는 STLC 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$y_{m,t} = \sum_{n=1}^N h_{n,m} s_{n,t} + w_{m,t},$$

여기서 $y_{m,t}$ 와 $w_{m,t}$ 는 각각 수신단의 m 째 안테나로 t 째 시간 슬롯에 수신된 신호와 수신 과정에서 발생하는 잡음을 나타내며, 본 논문에서 모든 잡음은 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

수신단은 STLC 신호로 부호화된 M -QAM 신호를 복호하기 위해 네 개의 수신신호 $\{y_{m,t}\}$ 를 아래와 같이 선형 결합한다.

$$\bar{y}_1 = y_{1,1} + y_{2,2}^* = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sqrt{\gamma_n} x_{2n-1} e^{j\theta_n} + w_{1,1} + w_{2,2}^*,$$

$$\bar{y}_2 = y_{2,1}^* - y_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \sqrt{\gamma_n} x_{2n} e^{j\theta_n} + w_{2,1}^* - w_{1,2}.$$

¹QAM: Quadrature Amplitude Modulation

마지막으로 각 송신안테나의 무선 채널 이득과 조향 각을 고려한 결합 최대 우도 검파기를 통해 송신단에서 전송한 $2N$ 개의 M -QAM 신호를 아래와 같이 검파한다.

$\hat{\mathbf{x}}_o = \underset{\mathbf{x} \in \mathcal{X}^N}{\operatorname{argmin}} \left| \bar{y}_1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N x_n e^{j\theta_n} \right|^2$, $\hat{\mathbf{x}}_e = \underset{\mathbf{x} \in \mathcal{X}^N}{\operatorname{argmin}} \left| \bar{y}_2 - \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N x_n e^{j\theta_n} \right|^2$, 여기서 $\hat{\mathbf{x}}_o = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_3 \ \dots \ \hat{x}_{2N-1}]$ 과 $\hat{\mathbf{x}}_e = [\hat{x}_2 \ \hat{x}_4 \ \dots \ \hat{x}_{2N}]$ 는 각각 홀수 및 짝수 시간 슬롯에 해당하는 검파 신호 벡터를 의미한다. 또한, $\mathcal{X}$ 는 정규화된 M -QAM 변조 신호의 집합을 의미하며, x_n 은 변조 차수에 따라 성상도 상에 맵핑되는 M -QAM 신호 점을 나타낸다.

III. 모의실험 결과 분석 및 결론

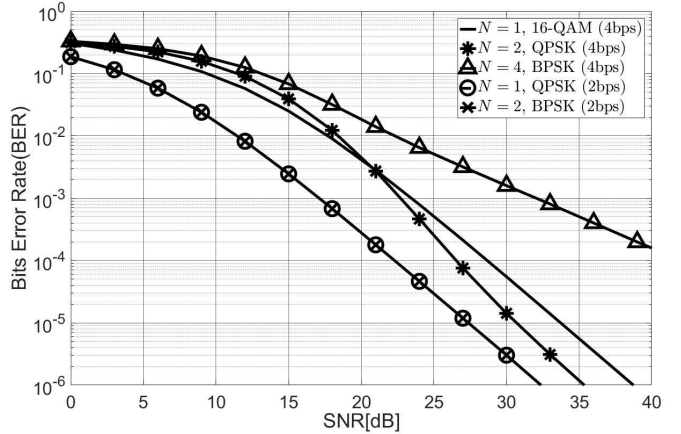


그림 1. 제안한 STLC-SMX 시스템의 BER 성능 모의실험 결과

그림 1은 본 논문에서 제안한 STLC-SMX 시스템의 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio: SNR) 대비 BER 성능 모의실험 결과이다. 같은 전송률을 갖는 조건하에서 성능을 비교하기 위해 송신안테나 수 N 에 따라 변조 차수 M 을 다르게 정의하였다. 주목할 점은 전송률 4bps를 두 송신안테나와 QPSK 변조를 통해 구현하는 STLC-SMX 경우 (*: $N=2, M=4$)가 기존 16-QAM 변조 신호를 STLC 하는 경우 (—: $N=1, M=16$) 보다 높은 SNR 구간에서 향상된 BER 성능을 갖는 것을 확인하였다. 하지만, 송신안테나가 두 개보다 많아지는 경우 (Δ : $N=4, M=2$) BER 성능이 오히려 저하됨과 동시에 최적 다이버시티 이득을 달성하지 못 하는 것을 확인하였다. 즉, 본 연구 결과로부터 STLC-SMX 시스템의 성능 향상을 위한 연구가 필요함을 확인하였으며, 차후 이에 대한 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2019R1F1A1061023).

참고 문헌

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–59, Autumn 1996.
- [2] J. Joung, "Space-time line code," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1023–1041, Feb. 2018.
- [3] K. -H. Lee, J. S. Yeom, B. C. Jung and J. Joung, "A Novel Non-Orthogonal Multiple Access with Space-Time Line Codes for Massive IoT Networks," *IEEE VTC2019-Fall*, Sept. 2019.
- [4] 이기훈, 정방철, 정진곤, "시공간 선 부호기반 공간변조 기법의 성능분석," *한국통신학회 동계종합학술발표회*, p. 412, Jan. 2019.