

주파수 효율을 향상한 시공간 선 부호기반 공간 변조 기법

이기훈, 염정선, 정방철, 정진곤*

충남대학교, *중앙대학교

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

A Spectrally-Efficient Spatial Modulation with Space-Time Line Codes

Ki-Hun Lee, Jeong Seon Yeom, Bang Chul Jung, Jington Joung*

Chungnam National University, *Chung-Ang University

요약

본 논문은 송수신단 모두 두 안테나를 갖는 multiple-input multiple-output (MIMO) 통신 환경에서, 시공간 선 부호 (Space-Time Line Codes: STLC) 기반 공간 변조 (Spatial Modulation: SM) 시스템에 코드북을 적용한 통신 기법을 제안하고, 모의실험을 통해 성능을 분석한다. 제안한 기법을 통해 기존 STLC 시스템에 단순히 SM을 적용해 전송할 때의 평균 SM 비트 수를 L 에서 $2L-1$ 로 개선하였다. 하지만 실험 결과 최적 시공간 다이버시티 이득은 얻지 못하는 것을 확인하였다. 차후 최적 시공간 다이버시티 이득을 달성할 방법과 송신단 안테나 확장에 관한 연구를 수행할 예정이다.

I. 서론

시공간 선 부호 (Space-Time Line Codes: STLC) 기법은 채널 정보를 송신단만 알고 있는 통신 환경에서 최적 시공간 다이버시티 이득을 달성할 수 있는 부호화 기법이다. 본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 송신단과 두 안테나를 갖는 수신단으로 구성된 간단한 STLC 시스템을 고려한다. 송신단은 채널 정보를 사용하여 두 시간 슬롯에 해당하는 변조 심벌을 두 개의 STLC 신호로 부호화하여 각각 전송한다. 수신단은 두 시간 슬롯에 걸쳐 두 안테나로 수신된 STLC 신호의 선형조합을 통해 전송된 심벌을 복호한다 [1]. 최근 STLC를 기존 통신 시스템에 적용하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다 [2], [3].

공간 변조 (Spatial Modulation: SM)는 송신단이 다중 안테나를 가질 때, 다수의 안테나 중 전송하고자 하는 정보신호에 따라 일부를 선택하여 신호를 전송하는 기법이다. 송신단은 선택한 안테나를 통해 진폭 및 위상 변조 심벌을 전송하며, 수신단은 수신된 신호로부터 송신단이 전송한 변조 심벌과 전송에 사용된 안테나의 인덱스를 검파함으로써, 안테나 인덱스로부터 추가적인 정보를 얻을 수 있다. 다수의 안테나 중 일부 안테나를 선택하여 통신함으로써 다른 채널로부터 발생하는 간섭으로 인한 성능 감소를 완화할 수 있으며, 선택한 안테나의 인덱스를 추가적인 정보신호로 활용함으로써 주파수 효율을 높일 수 있다 [4].

최근 [3]에서는 송수신단이 다중 안테나를 갖는 multiple-input multiple-output (MIMO) 통신 시스템에 STLC를 적용할 때 발생하는 채널 간 간섭 문제와 송수신단 복잡도 문제를 해결하기 위해 공간 변조의 적용 (STLC-SM)을 제안했다. 여기서 두 시간 슬롯 동안 변하지 않는 채널을 가정하고 이때 두 심벌을 부호화하는 STLC 특성에 따라 두 심벌마다 송신 안테나 인덱스를 선택할 수 있다. 이는 두 심벌마다 공간 변조를 통해 오직 한 개의 정보만을 추가로 표현한다는 한계점을 가진다.

본 논문에서는 선택 안테나 인덱스에 대한 코드북 (Codebook)을 적용하여 기존의 STLC-SM에서 공간 변조를 통해 표현 가능한 정보신호를 확장한다 [5]. 특히, 송신단 안테나가 두 개인 경우를 고려하며, 모의실험을 통해 제안한 기법과 기존 STLC-SM과 비트 오류율 (Bit-Error Rate: BER) 성능을 비교하고, 추가로 평균 전송 비트 수를 비교한다.

표 1. $L = 2$ 일 때, 공간 변조 안테나 인덱스 조합 코드북 (a_{it})

i		t			
		1	2	3	4
기존 방식	1	0	0	0	0
	2	0	0	1	1
	3	1	1	0	0
	4	1	1	1	1
+ CB 방식	5	0	1	0	1
	6	0	1	1	0
	7	1	0	0	1
	8	1	1	1	1

II. 주파수 효율을 향상시킨 시공간 선 부호기반 공간 변조

본 논문에서는 송수신단 모두 두 개의 안테나를 갖는 통신 환경에서 코드북 기반의 STLC-SM을 제안한다. 이때, 송수신단 각 안테나 사이의 무선 채널 정보는 송신단만 알고 있다고 가정하며, 수신단은 블라인드 복호화 기법을 통해 채널 이득 값을 알고 있다고 가정한다 [2]. 송수신단은 사전에 정의한 동일한 코드북을 사용한다.

송신단은 $2L$ ($L \in \mathbb{Z}$) 시간 슬롯동안 사용할 안테나 인덱스를 코드북에 기반하여 선택한다. $L=2$ 일 때 코드북은 표 1과 같이 정의한다. 여기서 점선 위($i=1, 2, 3, 4$)의 안테나 인덱스 조합은 기존 STLC-SM을 통해 전송할 수 있는 인덱스 조합을 나타낸다. $2L$ 시간 슬롯을 고려하고 임의의 한 인덱스 조합에서 0의 개수를 z 라고 할 때, 공간 변조를 통해 표현 가능한 안테나 인덱스 조합의 수는 다음과 같다:

$$\sum_{z=0}^{2L} C_{2z} = 2^{2L-1}.$$

즉, a_{it} ($i \in \{1, 2, \dots, 2^{2L-1}\}$, $t \in \{1, 2, \dots, 2L\}$)는 i 번째 공간 변조 안테나 인덱스 조합의 t 번째 시간 슬롯에 해당하는 안테나 인덱스를 의미하며, 비트를 통해 표현된 0과 1은 각각 첫 번째 안테나와 두 번째 안테나에 대응된다. 또한, i 번째 공간 변조 안테나 인덱스의 조합을 벡터 $\mathbf{a}_i = [a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{i(2L)}]$ 로 표현한다.

이후, 선택한 안테나 인덱스 조합에 따라 M -QAM 변조 심벌을 STLC 신호로 부호화 한다. 이때, 첫 번째 시간 슬롯에 해당하는 변조 심벌부터

순차적으로 같은 안테나 인덱스를 갖는 심벌 두 개씩 쌍을 지어 부호화한다. 예를 들어 $L=3$ 으로 가정하고, 선택된 안테나 인덱스의 조합이 $\mathbf{a}_i = [a_{i1} \ a_{i2} \ a_{i3} \ a_{i4} \ a_{i5} \ a_{i6}] \triangleq [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$ 인 경우, (1, 4) 번째, (2, 3) 번째, (5, 6) 번째 M -QAM 변조 심벌이 각각 쌍이 되어 STLC 신호로 부호화된다. 본 논문에서는 무선 채널은 변조 심벌을 전송하는 $2L$ 시간 슬롯 동안은 변하지 않는 준-정적 채널 (Quasi static channel)을 가정하며, 부호화된 STLC 신호는 다음과 같이 표현된다:

$$s_{t_1} = \frac{h_{n,1}^* x_{t_1} + h_{n,2}^* x_{t_2}^*}{\sqrt{\gamma_n}}, \quad s_{t_2} = \frac{h_{n,2}^* x_{t_1}^* - h_{n,1}^* x_{t_2}}{\sqrt{\gamma_n}},$$

여기서 s_t 와 x_t 는 t 번째 시간 슬롯에 전송하는 STLC 신호 및 t 번째 시간 슬롯에 해당하는 M -QAM 변조 심벌을 각각 의미한다. t 의 아래첨자는 심벌 쌍 중 첫 번째 (t_1)와 두 번째 (t_2) 시간 슬롯에 해당하는 변조 심벌을 각각 나타낸다. 또한, $h_{n,m}$ 은 송신단의 $n = a_{it} + 1$ 번째 안테나와 수신단의 $m \in \{1, 2\}$ 번째 안테나 사이 무선 채널을 의미하며, 본 논문에서 모든 무선 채널은 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 분포를 따른다고 가정한다. 두 시간 슬롯에 해당하는 STLC 신호의 송신 전력을 정규화 하는 $\sqrt{\gamma_n} = \|\mathbf{h}_n\|$ 은 n 번째 송신 안테나의 무선 채널 이득으로 정의하며, 여기서 $\mathbf{h}_n = [h_{n,1} \ h_{n,2}]^T$ 은 n 번째 송신 안테나와 수신단의 두 안테나 사이 무선 채널 벡터를 나타낸다.

송신단은 부호화된 STLC 신호를 $2L$ 시간 슬롯에 걸쳐 전송한다. 무선 채널을 통과하여 수신단의 각 안테나로 수신된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$y_{1,t} = h_{n,1}s_t + w_{1,t}, \quad y_{2,t} = h_{n,2}s_t + w_{2,t},$$

여기서 $y_{m,t}$ 는 수신단의 m 번째 안테나로 t 번째 시간 슬롯에 수신된 신호이며, $w_{m,t}$ 는 이때 수신 안테나에서 발생하는 복소 가우시안 잡음을 의미하고, 모든 잡음은 $\mathcal{CN}(0, \sigma_0^2)$ 분포를 따른다고 가정한다.

수신단에서는 $2L$ 시간 슬롯동안 수신한 신호들로부터 송신단에서 전송한 M -QAM 변조 심벌과 안테나 인덱스를 검파한다. 먼저, 전력 검파 (energy detection) 기법을 통해 다음과 같이 안테나 인덱스를 검파한다:

$$\hat{\mathbf{a}}_i = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \mathbb{E}[(y_{it} - |\bar{y}_{it}|^2)^2],$$

여기서 $\sqrt{\gamma_{it}}$ 는 i 번째 안테나 인덱스 조합의 t 번째 시간 슬롯에 해당하는 무선 채널 이득이며, $\bar{y}_{it}$ 은 안테나 인덱스 조합을 선택했을 때 수행할 수 있는 STLC 선형결합 식을 나타내고, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\bar{y}_{it_1} = y_{1,it_1} + y_{2,it_2}^*, \quad \bar{y}_{it_2} = y_{2,it_1}^* - y_{1,it_2}.$$

송신단이 전송한 안테나 인덱스를 정확히 검출한 경우, 즉 $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{a}$ 일 때, 수신 신호 $\{y_{1,t}, y_{2,t}\}$ 의 선형결합 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\bar{y}_{t_1} = y_{1,t_1} + y_{2,t_2}^* = \sqrt{\gamma_n} x_{t_1} + w_{1,t_1} + w_{2,t_2}^*, \\ \bar{y}_{t_2} = y_{2,t_1}^* - y_{1,t_2} = \sqrt{\gamma_n} x_{t_2} + w_{2,t_1}^* - w_{1,t_2}.$$

마지막으로, 검파한 안테나 인덱스 조합 $\hat{\mathbf{a}}_i$ 을 통해 선형결합한 신호로부터 maximum likelihood (ML) 검출 기법을 사용하여 다음과 같이 송신단 각 시간 슬롯에 해당하는 변조 심벌을 복호한다:

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \underset{p}{\operatorname{argmin}} (\bar{y}_t - \sqrt{\gamma_n} p),$$

여기서 $p \in \mathcal{X}$ 는 성상도 상에 맵핑된 변조 심벌 점을 나타내며 $\mathcal{X}$ 는 정규화된 M -QAM 변조 심벌의 집합을 의미한다. 또한, $\hat{n} = \hat{a}_{it} + 1$ 이다.

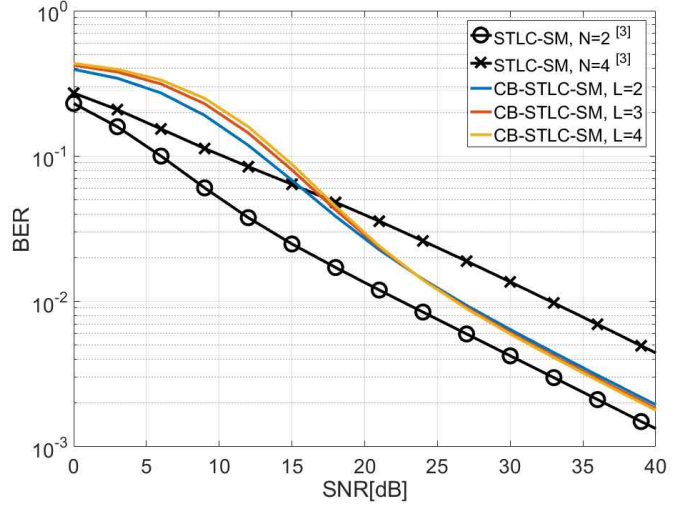


그림 1. CB-STLC-SM의 SNR 대비 BER 성능.

III. 모의실험 결과 및 결론

그림 1은 기존 STLC-SM과 본 논문에서 제안하는 코드북 기반 STLC-SM (CB-STLC-SM)의 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 대비 BER 성능 모의실험 결과이다. 본 실험에서는 변조 방식으로 4-QAM을 사용하였다. 실험 결과 BER 성능은 기존에 제한된 joint ML 검출기를 사용한 STLC-SM 보다 나빠지지만, 전송할 수 있는 안테나 인덱스의 조합이 증가하여 공간 변조를 통해 전송하는 평균 비트의 수가 증가한다. 기존 기법의 경우 $2L$ 변조 심벌 당 공간 변조를 통해 L 개의 비트를 전송할 수 있지만, 본 논문에서 제안한 기법은 평균 $\log_2 2^{2L-1} = 2L-1$ 개의 비트를 전송할 수 있다.

하지만, 여전히 최적 시공간 다이버시티 이득을 얻지 못하는 것을 확인하였다. 이에 따라 차후 연구에서는 본 논문에서 제안한 코드북 기반 STLC-SM의 송신단 안테나 수를 두 개 이상으로 확장함과 동시에 최적 시공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 방법에 관한 연구를 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2019-2017-0-01635)

참고 문헌

- [1] J. Joung, “Space-time line code,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1023-1041, Feb. 2018.
- [2] J. Joung and B. C. Jung, “Machine learning based blind decoding for space-time line code systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 5, May 2019.
- [3] 이기훈, 정방철, 정진곤, “시공간 선 부호기반 공간변조 기법의 성능분석,” *한국통신학회 동계종합학술발표회*, p. 412, Jan. 2019.
- [4] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, “Spatial modulation,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, Jul. 2008.
- [5] H. J. Yang, B. C. Jung, W.-Y. Shin, and A. Paulraj, “Codebook-based opportunistic interference alignment,” *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 62, nNo. 11, pp. 2922-2937, Jun. 2014.