

경사 하강법을 이용한 개선된 계층적 코드북 설계

윤성근*, 이승준**

An Improved Hierarchical Codebook Design Based on the Gradient Descent Method

Sung-Geun Yoon*, Seung Joon Lee**

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.
(No. NRF-2017R1D1A3B03032125)

요 약

밀리미터파 대용량 다중 입력 다중 출력 시스템의 효율적인 빔 검색을 위한 기존의 계층적 코드북의 특성 및 단점을 분석한다. 바람직한 계층적 코드북을 위해서는 구현의 편의를 위해 모든 코드워드가 동일 크기 성분 특성을 가져야 하며, 총 전력 손실을 막기 위해 모든 코드워드가 모든 안테나를 활성화하여야 하며, 높은 SNR에서 이웃 코드워드 빔 사이에 간섭이 없어야 한다. 하지만 기존의 코드북 중에는 위의 모든 성질을 동시에 만족하는 것이 없다. 본 논문에서는 반복적 최적화 방식 중의 하나인 경사 하강법을 이용하여 위의 모든 조건을 만족하는 코드북을 설계한다. 제안된 방식으로 유도된 코드북이 기존의 코드북보다 더 큰 전송 용량을 가짐을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인한다.

Abstract

The characteristics and demerits of the conventional hierarchical codebooks are investigated, which have been reported for an efficient beam search in millimeter wave massive multi-input multi-output systems. The followings are required for desirable hierarchical codebooks: every codeword should have constant modulus entries for feasible implementation, every codeword should force all the antenna elements to be active for preventing from total antenna power loss, and neighboring codeword beams should have no interference with each other for high SNR. However there is no conventional scheme satisfying all the requirements. In this paper, the gradient descent method, which is one of the iterative optimization approaches, is applied to derive the codebook meeting all the requirements. It is confirmed by computer simulations that the codebook obtained by the proposed method has larger achievable data rates than the conventional ones.

Keywords

beamforming, gradient descent, hierarchical codebook, hybrid precoding, massive MIMO, millimeter-wave

* 강원대학교 BIT 의료융합학과 박사과정
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6946-0131>
** 강원대학교 IT 대학 전자공학과 및 BIT 의료융합학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3503-1769>

• Received: Jan. 21, 2020, Revised: Feb. 17, 2020, Accepted: Feb. 20, 2020
• Corresponding Author: Seung Joon Lee
Dept. of Electronics Engineering, Kangwon National University
Chunchon, Gangwon-do, 200-701 Korea,
Tel.: +82-33-250-6300, Email: s.j.lee@kangwon.ac.kr

1. 서 론

5G 이동통신의 밀리미터파 대용량 다중 입력 다중 출력(Massive MIMO)시스템에서 높은 성능을 달성하면서도 소수의 RF 체인을 효율적으로 사용하기 위해 아날로그 빔포밍(Beamforming)과 디지털 프리코딩 기술을 결합한 하이브리드 프리코딩(Hybrid precoding) 구조가 제안되었다[1][2]. 하이브리드 프리코딩 구조에서 빔포밍을 위해서는 채널을 추정해야 하는데, 이를 위한 방법들은 크게 압축 센싱(Compressed sensing)기반의 채널 추정[3]과 빔 트레이닝(Beam training) 기반의 채널 추정[4]-[7]으로 나누어진다. 본 논문에서는 빔 트레이닝 기반 채널 추정 접근방법을 고려한다.

빔 트레이닝 기반의 채널 추정을 위해 흔히 사용하는 방법은 준비된 유한 개수의 빔 중에 가장 적합한 빔을 선택하는 것(이를 ‘빔 검색’이라 부름)이다. 이때 준비된 각 빔을 형성하기 위해 사용되는 안테나 가중치 벡터를 코드워드(Codeword)라 부르고 모든 코드워드를 모아둔 집합을 코드북(Codebook)이라 부른다.

일반적으로 코드워드의 개수는 안테나 개수에 비례하기 때문에 많은 안테나를 사용하는 massive MIMO 시스템에선 코드워드의 개수가 많고 이로 인해 빔 검색 시간도 길어진다. 빔 검색 시간을 줄이기 위해 흔히 계층적(Hierarchical) 빔 검색 방식을 사용하고 이를 위해 계층적 코드북이 사용된다. 빔 검색 성능(즉, 채널 추정 성능)은 설계된 계층적 코드북의 특성에 크게 영향을 받는다.

본 논문에서는 기존의 계층적 코드북의 특성을 분석하고 기존의 계층적 코드북의 단점을 극복하는 새로운 계층적 코드북 설계방식을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 전송 용량 측면에서 제안된 방식의 코드북을 기존의 방식들과 비교함으로써 제안된 방식의 우수성을 입증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템과 채널 모델, 계층적 코드북의 개념 및 기존의 계층적 코드북의 특성 및 단점을 검토한다. 3장에서는 기존의 계층적 코드북의 단점을 극복하기 위한 새로운 계층적 코드북의 설계방식과 이 방식을 통해 유도된 코드북 및 그 코드북의 특성을 제시한다.

4장에서는 제안된 코드북과 기존 코드북의 전송 용량을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교한다. 5장에서 결론을 맺는다.

II. 연구배경

2.1 밀리미터파 MIMO 채널 모델

5G 밀리미터파 다중 입력 다중 출력 전송 시스템에서 제한된 개수의 전송 경로를 가지는 채널 모델을 고려한다[8][9]. 그림 1[9]과 같이 서로 다른 경로들은 송신측과 수신측에서 각각 다른 발사각(AoD, Angle-of-Departure) ϕ_l 과 도래각(AoA, Angle-of-Arrival) θ_l 을 가진다.

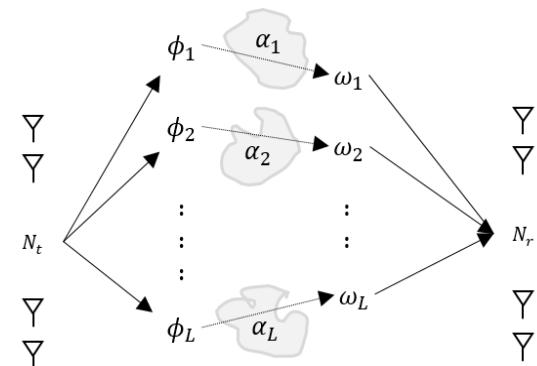


그림 1. 다중안테나 밀리미터파 전파 공간채널모델
Fig. 1. A spatial channel model for multi-antenna millimeter-wave propagation

안테나들이 반 파장의 등 간격으로 배치된 선형 안테나 배열을 가정한다. N_T 개의 안테나를 가지는 송신부(TX)에서 N_R 개의 안테나를 가지는 수신부(RX)로의 채널 행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_T N_R}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}(N_R, \omega_l) \mathbf{a}^H(N_T, \phi_l) \quad (1)$$

여기서 L 과 α_l 은 각각 채널 경로의 개수와 l 번째 경로의 복소 가우시안(Complex Gaussian) 이득을 나타낸다. l 번째 경로의 도래각 ω_l 과 발사각 ϕ_l 의 값은 $[0, 2\pi)$ 에서 균일한 분포를 가진다. $\mathbf{a}(N, \epsilon)$ 은 N 개의 안테나를 사용하는 등 간격 선형 안테나의 배

열 응답 벡터로 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{a}(N, \epsilon) = \frac{1}{N} [1, e^{j\pi \sin(\epsilon)}, e^{j2\pi \sin(\epsilon)}, \dots, e^{j(N-1)\pi \sin(\epsilon)}]^T \quad (2)$$

채널 행렬 \mathbf{H} 의 성분들을 개별적으로 추정하고자 한다면, 채널을 이루고 있는 송수신 안테나의 개수가 증가할수록 구현복잡도가 커져서 채널을 추정하는 것이 어려워진다. 하지만, 식 (1)의 채널 모델에 기반 한다면 다중 경로 개수만큼의 AoA와 AoD만을 추정하면 된다.

2.2 계층적 코드북의 개념

계층적 코드북은 그림 2처럼 U 개의 계층으로 구성되며 서로 다른 계층의 코드워드들은 각도 ($\sin(\epsilon)$) 영역에서 서로 다른 빔 폭을 가지며, u 번째 ($u = 1, 2, \dots, U$) 계층은 동일한 빔 폭을 가지면서 서로 다른 방향으로 향하는 M^u 개의 코드워드 $\mathbf{c}(u, n)$ ($n = 1, 2, \dots, M^u$) 들로 구성되어있다.

그림 2에서 가로축은 각도(ϵ radian)의 함수인 $\sin(\epsilon)$ 로, 본 논문에서 각도 영역이란 이 가로축을 의미한다. M 은 계층 상수라 불리며 계층적 코드북 구조에서 하나의 부모 코드워드에 포함되는 자식 코드워드의 개수로 정의된다. 각도 영역에서 모든 m 에 대한 $\mathbf{c}(u+1, (n-1)M+m)_{m=1,2,\dots,M}$ 의 빔 폭의 합은 바로 위 계층의 $\mathbf{c}(u, n)$ 의 빔 폭과 일치한다. 이때 $\mathbf{c}(u, n)$ 를 $\mathbf{c}(u+1, (n-1)M+m)_{m=1,2,\dots,M}$ 의 부모(parent) 코드워드라 부르고, $\mathbf{c}(u+1, (n-1)M+m)_{m=1,2,\dots,M}$ 를 $\mathbf{c}(u, n)$ 의 자식(child) 코드워드라 부른다. 이와 같은 코드북의 특성을 이용하여 데이터 전송을 위한 빔포밍을 위해

상위계층부터 빔 검색을 시작한다. 만약 u 번째 계층에서 한 코드워드가 선정되면, 그 바로 아래 $u+1$ 번째 계층에선 그 선정된 코드워드의 자식 코드워드들만 검색한다. 검색 과정의 성능을 향상하기 위해 검색 시작 계층을 첫 번째 계층이 아닌 u_0 번째 계층($u_0 \geq 2$)으로 할 수도 있다.

2.3 기존의 계층적 코드북

계층적 코드북 설계는 채널 추정 정확도 및 전송 용량 등의 성능에 큰 영향을 줄 수 있는 중요한 부분이다. 우선 기존의 계층적 코드북 설계 사례의 특징 및 문제점을 살펴본다. 참고문헌 [4]에서는 넓은 빔 폭의 코드워드 생성을 위해 빔 폭에 비례하는 만큼 개수의 안테나를 비활성화(즉, 전송전력을 0으로 함)시킨다. 즉, 활성화되는 안테나의 개수는 빔 폭에 반비례하게 된다. 일반적으로 크기에 제약이 많은 송수신 모듈로 구성된 밀리미터파 통신 시스템에서는 각 안테나에서 송신되는 전력이 제한될 수도 있으므로 활성화되지 못하는 안테나 개수가 늘어나면 그만큼 총 전력 손실이 발생한다. 참고문헌 [5]에서는 위와 같은 전력 손실 문제점을 완화하기 위한 코드북을 제안하여 성능 개선을 이루었지만, 역시 일부 계층(맨 아래부터 짝수 번째 위치한 계층)에선 절반의 안테나만 활성화되는 문제점이 여전히 존재한다.

참고문헌 [7]에서는 자식 코드워드들을 합하여 넓은 빔 폭을 가지는 코드워드를 생성함으로써 코드북의 모든 계층에서 모든 안테나가 활성화되도록 하였지만, 맨 아래 계층을 제외한 다른 모든 계층의 코드워드들은 동일 크기(Constant modulus) 성분 특성을 만족하지 않아서 구현에 어려움이 있다.

1st layer	$\mathbf{c}(1,1)$				$\mathbf{c}(1,2)$			
2nd layer	$\mathbf{c}(2,1)$		$\mathbf{c}(2,2)$		$\mathbf{c}(2,3)$		$\mathbf{c}(2,4)$	
3rd layer	$\mathbf{c}(3,1)$	$\mathbf{c}(3,2)$	$\mathbf{c}(3,3)$	$\mathbf{c}(3,4)$	$\mathbf{c}(3,5)$	$\mathbf{c}(3,6)$	$\mathbf{c}(3,7)$	$\mathbf{c}(3,8)$
...	...							
U -th layer	$\mathbf{c}(U,1)$	$\mathbf{c}(U,2)$...				$\mathbf{c}(U,2^u)$	
	-1			Angle ($\sin(\epsilon)$)				1

그림 2. 계층적 코드북 구조 ($M=2$)
Fig. 2. A structure of the hierarchical codebook ($M=2$)

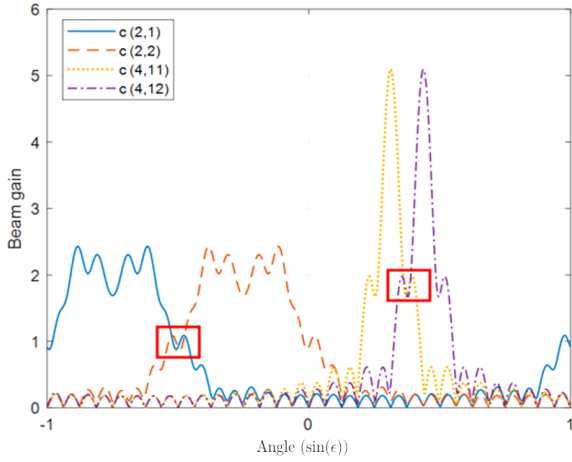


그림 3. 참고문헌 [6]의 코드북의 빔 패턴 ($N=32$)
Fig. 3. Beam patterns of reference [6] for $N=32$

참고문헌 [6]에서는 모든 안테나를 활성화하면서도 동일 크기 성분 특성을 만족하는 코드워드들로 구성된 계층적 코드북이 제안되었지만, 그림 3에서 볼 수 있듯이 맨 아래에서 짝수 번째 위치한 계층에서는 자신의 빔 폭 내부 일부 영역(빨강 네모로 표시된 영역)에서 자신의 빔 이득보다 인접한 빔의 이득이 더 커서 심각한 빔 간 간섭 문제를 일으킨다.

III. 경사 하강법을 이용한 새로운 계층적 코드북 설계

참고문헌 [6]에서 모든 안테나를 활성화하면서도 동일 크기 조건을 만족하는 계층적 코드북이 이론적으로 유도되었지만 앞서 언급된 빔 간 간섭 문제점과 4장의 성능 시뮬레이션 결과에서 보듯이 개선 효과는 만족스럽지 못하다. 여러 시도 경험에 따르면 이론적 접근방법으로는 참고문헌 [5]의 코드북보다 더 우수한 성능을 가지면서도 모든 안테나를 활성화하는 동일 크기 성분 특성의 코드북 설계가 쉽지 않은 것으로 파악된다. 따라서 본 논문에서는 반복적 최적화 방식 중의 하나인 경사 하강(Gradient

descent)법을 이용하여 모든 안테나를 활성화하고 동일 크기 조건을 만족하면서도 개선된 채널 용량 성능을 갖는 계층적 코드북을 설계하고자 한다.

3.1 코드워드 설계를 위한 최적화 문제 정의

N 개의 안테나를 사용하면서 동일 크기 성분 조건을 만족하는 안테나 가중치 벡터 \mathbf{c} 를 다음과 같이 정의하자.

$$\mathbf{c} = [c_0 \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{N-1}] \quad (3)$$

$$c_n = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\theta_n} \quad (n=0,1,\dots,N-1)$$

여기서 $\theta_n (n=0,1,\dots,N-1)$ 은 각 안테나 신호의 위상값이다. 각도 Ω 에서 \mathbf{c} 의 빔 이득 $|A(\{\theta_n\}, \Omega)|$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$|A(\{\theta_n\}, \Omega)| = \left| \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{-j\pi n \Omega} \right| \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{N}} \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\theta_n} e^{-j\pi n \Omega} \right|$$

우선 빔의 중심이 원점($\Omega=0$)에 위치하며(빔의 방향각이 0이고) 빔 모양이 원점을 중심으로 좌우 대칭인(즉, $|A(\{\theta_n\}, \Omega)|$ 이 Ω 에 대해 우함수인) 경우를 고려하자. 이를 위해 $\theta_n = \theta_{N-1-n}$ ($n=0,1,2,\dots,\frac{N}{2}-1$)이 성립해야 한다. 이 성질을 이용하여 $|A(\{\theta_n\}, \Omega)|$ 를 $\{\theta_n, n=0,1,\dots,\frac{N}{2}-1\}$ 의 함수로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 따라서 최적화하고자 하는 변수의 개수는 N 일 필요 없이 $\frac{N}{2}$ ($\{\theta_n, n=0,1,\dots,\frac{N}{2}-1\}$)이다.

$$|A(\{\theta_n\}, \Omega)| = \frac{1}{\sqrt{N}} \left| \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} e^{j\theta_n} (e^{-j\pi n \Omega} + e^{-j\pi (N-1-n) \Omega}) \right| \quad (5)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{N}} \left| e^{-j\pi \frac{(N-1)}{2} \Omega} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} e^{j\theta_n} (e^{-j\pi n \Omega} e^{j\pi \frac{N-1}{2} \Omega} + e^{j\pi n \Omega} e^{-j\pi \frac{N-1}{2} \Omega}) \right| = \frac{1}{\sqrt{N}} \left| \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} e^{j\theta_n} \cos \left\{ \pi \Omega \left(n - \frac{N-1}{2} \right) \right\} \right|$$

설계하고자 하는 \mathbf{c} 의 빔 모양이 원점을 중심으로 크기 B 의 빔 폭을 갖는다고 가정하자. 샘플링 각도 Ω_l 이 빔 폭 내에 속하면(즉, $|\Omega_l| < \frac{B}{2}$) $|A(\{\theta_n\}, \Omega_l)|$ 은 될수록 커야 하며, 그렇지 않으면(즉, $|\Omega_l| > \frac{B}{2}$) $|A(\{\theta_n\}, \Omega_l)|$ 은 될수록 작아야 한다. 따라서 최적화 문제를 위한 비용함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J(\{\theta_n\}) = \sum_{l, |\Omega_l| > \frac{B}{2}} \ln |A(\{\theta_n\}, \Omega_l)|^2 - \sum_{l, |\Omega_l| < \frac{B}{2}} \ln |A(\{\theta_n\}, \Omega_l)|^2 \quad (6)$$

샘플링 각도 값들 $\{\Omega_l : |\Omega_l| < \frac{B}{2}\}$ 과 $\{\Omega_l : |\Omega_l| > \frac{B}{2}\}$ 은 직관과 시행착오를 통해 선택한다. 식 (6)을 최소화하는 위상값과 이러한 위상값들로 구성된 안테나 가중치 벡터를 각각 다음과 같이 정의하자.

$$\{\theta_n^*\} = \arg \min_{\{\theta_n\}} J(\{\theta_n\}) \quad (7)$$

$$\mathbf{c}^* = [e^{j\theta_0^*} \ e^{j\theta_1^*} \ \dots \ e^{j\theta_{N-1}^*}] \quad (8)$$

안테나 개수가 N 일 때, u 번째 계층의 코드워드 $\mathbf{c}(u, n)$ 의 방향각은 $-1 + B/2 + B(n-1) = -1 + B(n-1/2)$ 이므로 $\mathbf{c}(u, n)$ 은 방향각 회전 식[5]을 이용하여 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\mathbf{c}(u, n) = \mathbf{c}^* \circ \sqrt{N} \mathbf{a} \left(N, 1 + B \left(n - \frac{1}{2} \right) \right) \quad (9)$$

여기서 \circ 은 성분끼리의(Entry-wise) 곱을 의미한다.

3.2 경사 하강법을 이용한 최적 코드워드 설계

식 (7)로 주어진 최적의 위상값 $\{\theta_n^*\}$ 을 찾기 위해 경사 하강법을 사용하기로 한다. 경사 하강법에 따라 위상값들은 다음과 같은 수식에 의해 반복적으로 갱신된다.

$$\theta_{n_0}(t+1) = \theta_{n_0}(t) - \mu \frac{\partial \mathcal{J}(\{\theta_n(t)\})}{\partial \theta_{n_0}(t)} \quad (10)$$

한 번 갱신에 의한 위상값 변동량을 조절하는 μ 는 시행착오를 통해 적정값을 선택한다. 초기 위상값들 $\{\theta_n, n=0, 1, \dots, \frac{N}{2}-1\}$ 은 $[0, 2\pi)$ 범위에서 서로 독립적으로 랜덤하게 설정된다.

안테나 개수 $N=32$ 에 대해 경사 하강법을 이용해 얻은 안테나 가중치 벡터(\mathbf{c}^*)의 빔 모양을 기존의 빔 모양과 비교해서 그림 4에 제시하였다. 제시된 빔 모양을 얻기 위해 사용된 샘플링 각도는 표 1과 같다. 이를 위해 우선 빔 폭 내부 영역에선 일정한 간격으로 샘플링 각도를 선정하였으며, 이를 기반으로 경사 하강법에 의해 얻어진 빔 모양이 빔 폭 외부의 특정 각도에서 빔 이득 값이 너무 크면 그 각도를 $\{\Omega_l : |\Omega_l| > \frac{B}{2}\}$ 에 추가하여 원하는 빔을 얻을 수 있다. 경사 하강법에 의해 최종적으로 유도된 안테나 가중치 벡터(\mathbf{c}^*)의 위상값 $\{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{\frac{N}{2}-1}\}$ 을 표 2에 제시하였다.

그림 4에서 볼 수 있듯이, 제안된 방식으로 얻어진 \mathbf{c}^* 는 자신의 빔 폭 내부의 모든 영역에서 가장 큰 빔 이득을 갖기 때문에 참고문헌 [6]의 인접 코드워드간 심각한 간섭 문제를 극복한다. 또한, SNR이 낮을 때 빔 검색 성공률을 높이기 위해서는 빔 간 경계에서 빔 이득 곡선의 경사가 커야 한다. 1 계층~3 계층에서 제안된 빔 이득의 곡선이 기존(참고문헌 [5] & [6])의 빔에 비해 빔 간 경계에서 훨씬 큰 경사를 가짐을 확인할 수 있다. 맨 아래서 두 번째 계층인 4번째 계층의 경우에는 빔 간 경계에서의 빔 곡선의 경사가 다른 계층만큼 큰 값을 얻는 것이 어려웠다. 그 외에 참고로 맨 아래 계층의 빔 모양은 3가지 방식([5], [6] 및 제안된 방식) 모두 동일하고, 맨 아래에서 홀수 번째 계층에선 참고문헌 [5]와 [6] 방식의 빔 모양이 동일하며, 맨 아래에서 짝수 번째의 계층에선 참고문헌 [5]의 방식은 절반의 안테나만 활성화하기 때문에 총 전력 손실 때문에 빔의 크기가 다른 방식의 빔에 비해 작음을 볼 수 있다. 또한, 빔 폭을 표시하기 위해 이상적인 빔 모양('Ideal')도 추가하였다.

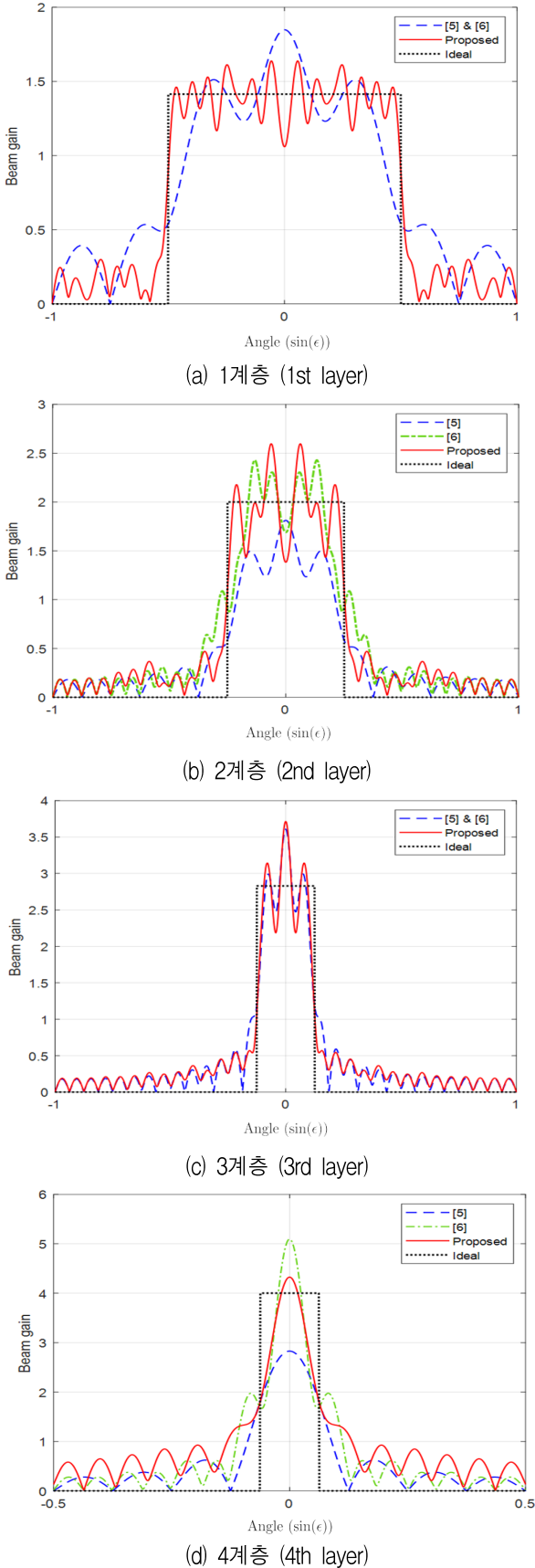


그림 4. 계층별 빔 모양 비교, $N=32$
 Fig. 4. Beam pattern comparison for each layer ($N=32$)

표 1. 경사 하강법을 이용한 빔 최적화에 사용된 샘플링 각도 ($\sin(\epsilon)$)

Table 1. Sampling angles for beam optimization by the gradient descent method ($\sin(\epsilon)$)

Layer	$\frac{B}{2}$	$\{\Omega_l\}$	$\{\Omega_i\}$
1st	0.5	{0.01, 0.02, ..., 0.5}	{0.65}
2nd	0.25	{0.01, 0.02, ..., 0.24}	{0.275, 0.3}
3rd	0.125	{0.01, 0.02, ..., 0.115}	{0.16, 0.27}
4th	0.0625	{0.01, 0.02, ..., 0.0625}	{0.15}

표 2. 제안된 방식에 의해 유도된 안테나 위상값

Table 2. Antenna phases derived by the proposed method

Layer	$\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{\frac{N}{2}-1}$ [radian]
1st	3.24, 3.99, 5.09, 6.22, 1.19, 2.42, 3.52, 5.15, 5.91, 0.31, 0.44, 0.22, 0.69, 1.73, 2.14, 2.29
2nd	4.40, 3.96, 3.61, 3.20, 2.51, 1.73, 1.26, 0.91, 0.47, 6.22, 5.72, 5.47, 5.37, 5.47, 5.81, 6.19
3rd	3.30, 3.74, 3.90, 3.90, 3.86, 3.90, 4.02, 4.24, 4.46, 4.71, 4.96, 5.25, 5.59, 5.84, 6.00, 6.06
4th	4.46, 4.21, 3.42, 2.73, 2.61, 2.61, 2.61, 2.61, 2.51, 2.42, 2.29, 2.17, 2.07, 1.98, 1.95, 1.92

IV. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 성능평가

제안된 방법을 통해 얻은 코드북과 기존 코드북을 검색 성능과 전송 용량 측면에서 비교한다. 송수신 안테나 개수 $N_T = N_R = 32$, 채널 경로의 개수 $L=7$, 안테나 간 거리 $d = \frac{\lambda}{2}$, 계층 상수 $M=2$ 를 고려하고, 송수신 RF 체인의 개수는 전송 데이터 스트림의 개수와 같다고($N_S = N_T^{RF} = N_R^{RF}$) 가정한다. 계층적 코드북 구조에서 다중 데이터 스트림 전송을 위한 다중 빔 검색 알고리즘은 [10]에서 제안된 방법을 사용한다.

우선 SNR이 매우 클 때, 검색 성공 확률을 살펴보기로 하자. 선택된 송신 코드워드와 수신 코드워드의 빔 폭 내에 각각 실제 채널의 AoD와 AoA가 포함되어 있으면 검색 성공으로 정의한다. 앞서 언급했듯이 참고문헌 [6]의 코드북의 경우, 자신의 빔 폭 내부 일부 영역에서 자신의 빔 이득보다 인접한 빔의 이득이 더 큰 문제가 발생하기 때문에 SNR이 크더라도 검색 성공 확률이 100%에 못 미치는 결과를 보인다.

표 3. SNR=∞인 경우의 참고문헌 [6] 코드북의 검색 성공 확률

Table 3. Success detection rate of codebook [6] for SNR=∞

Detection starting layer	$u_0 = 1$	$u_0 = 2$	$u_0 = 3$	$u_0 = 4$
Success detection rate	74.64%	50.34%	81.86%	50.77%

표 3은 검색 시작계층(u_0)에 따른 참고문헌 [6]의 코드북의 검색 성공 확률을 보여준다. SNR=∞일 때, 맨 아래에서 홀수 번째 계층($u = 1, 3, 5$)에선 빔 간 간섭이 없지만, 짝수 번째 계층($u = 2, 4$)에선 빔 간 간섭이 존재한다. 계층별 빔 간 간섭량이 유사하다면 일반적으로 검색 시작 계층이 커질수록 검색 성공 확률은 커지지만, 위의 경우에는 u_0 값이 작더라도, 빔 간 간섭 문제가 없는 계층을 검색 시작 계층으로 하는 것이 그렇지 않은 것에 비해 검색 성공 확률이 큼을 확인할 수 있다.

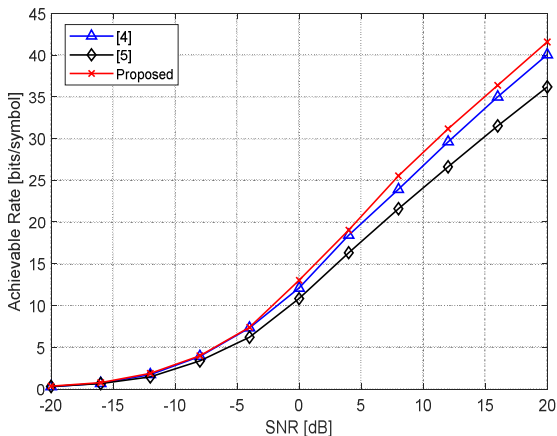


그림 5. SNR에 따른 전송속도 비교

Fig. 5. Comparison of achievable rates with varying SNR

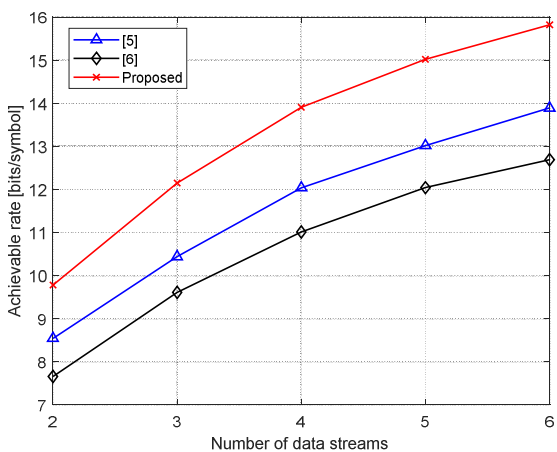


그림 6. 데이터 스트림 개수에 따른 전송속도 비교

Fig. 6. Comparison of achievable rates with varying N_s

그 이유는 검색 시작 계층(u_0)에서 올바른 코드워드가 선택되고 그 다음 계층($u_0 + 1$)에선 선택된 코드워드의 자식 코드워드들만 검색하게 되면 검색 오류를 일으킬 수 있는 코드워드들의 개수를 줄일 수 있기 때문이다. 참고문헌 [5]의 코드북과 본 논문에서 제안된 그림 3의 코드북은 SNR=∞일 때, 모든 계층에서 인접 코드워드간 간섭이 없으므로 항상 검색 성공 확률은 100%임을 확인하였다.

그림 5에서는 $N_s = 4$ 일 때, 전송 용량(최대 전송 속도[10, 식(2)]) 성능 측면에서 제안된 방식을 기존의 두 방식과 비교하였다. 검색 시작 계층은 참고문헌 [5]의 방식과 제안된 방식에서는 일반적으로 많이 사용하는 $u_0 = 2$ 를 가정했으며, 참고문헌 [6]의 방식을 위해서는 코드북 특성상(표 3 참조) $u_0 = 2$ 보다 성능이 더 좋은 $u_0 = 1$ 을 가정했다. 그림 6에서는 SNR=0 dB 일 때, 데이터 스트림 개수(N_s)에 따른 전송속도를 비교하였다. 기존 방식들에 비해 제안된 방식의 성능 개선(참고문헌 [5]와 [6]의 코드북에 비해 각각 약 8%와 20%의 용량증가)을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 massive MIMO 시스템에서 계층적 빔 검색을 위해 사용되는 기존의 계층적 코드북의 단점(일부 안테나가 비활성화되거나 높은 SNR에서 인접 코드워드 간 간섭이 존재하는 문제점)을 극복하기 위한 새로운 계층적 코드북 설계 방식을 제안하였다. 제안된 계층적 코드북 설계에서는 반복적 최적화 과정의 하나인 경사 하강법을 통해 안테나 가중치 벡터 및 코드워드를 유도하였다. 이와 같이 새롭게 얻어진 코드북은 기존 코드북의 단점을 극복하여 모든 계층에서 각 코드워드는 모든 안테나를 활성화하며 또한 높은 SNR에서 인접 코드워드의 빔 간 간섭이 없다. 전송 용량 측면에서도 제안된 계층적 코드북이 기존의 코드북에 비해 성능이 우수함(예를 들어, SNR=0 dB, 4 개의 다중 스트림 전송을 고려하면, 참고문헌 [5]와 [6]의 코드북에 비해 각각 약 8%와 20% 증가)을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

제안된 코드북이 기존의 코드북들에 비해 우수함을 확인하였지만, 이것이 최적의(최고의 용량을 얻는) 코드북임을 보장하지는 못한다. 제안된 경사 하강법에 의해 코드워드는 지역 최적값에 수렴하지만 광역 최적값에 수렴함을 보장할 수 없기 때문이다. 광역적인 최적 성능을 가진 코드북을 얻기 위한 시도가 추후 연구로 필요하다.

References

[1] A. Alkhateeb, J. Mo, N. González-Prelcic, and R. Heath, "MIMO precoding and combining solutions for millimeter-wave systems", *IEEE Communication Magazine*, Vol. 52, No. 12, pp. 122-131, Dec. 2014.

[2] W. Roh and J. Y. Seol, et al., "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular commun", *IEEE Communication Magazine*, Vol. 52, No. 2, pp. 106-113, Feb. 2014.

[3] A. Alkhateeb, O. E. Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, Jr., "Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 8, No. 5, pp. 831-846, Oct. 2014.

[4] T. He and Z. Xiao, "Suboptimal beam search algorithm and codebook design for millimeter-wave communications", *Mobile Networks and Applications*, Vol. 20, No. 1, pp. 86-97, Jan. 2015.

[5] Z. Xiao, T. He, P. Xia, and X. G. Xia, "Hierarchical codebook design for beamforming training in millimeter-wave communication", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 15, No. 5, pp. 3380-3392, May 2016.

[6] Z. Xiao, L. Bai, P. Xia, and X. G. Xia, "Enhanced channel estimation and codebook design for millimeter-wave communication", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 67, No. 10, pp. 9393-9405, Oct 2018.

[7] K. Chen and C. Qi, "Beam training based on dynamic hierarchical codebook for millimeter wave massive MIMO", *IEEE Communications Letters*,

Vol. 23, No. 1, pp. 132-135, Jan. 2019.

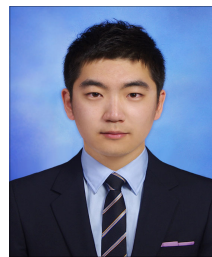
[8] A. A. M. Saleh and R. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 5, No. 2, pp. 128-137, Feb. 1987.

[9] A. M. Sayeed, "Deconstructing multi-antenna fading channels", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 50, No. 10, pp. 2563-2579, Oct. 2002.

[10] S. G. Yoon and S. J. Lee, "A novel hierarchical multi-beam search scheme based on codebook update for massive MIMO systems", *Journal of KIIT*, Vol. 18, No. 1, pp. 49-55, Jan. 2020.

저자소개

윤 성 근 (Sung-Geun Yoon)



2017년 2월 : 강원대학교
전자공학과(공학사)
2019년 2월 : 강원대학교
BIT의료융합학(공학석사)
2019년 2월 ~ 현재 : 강원대학교
BIT의료융합학(박사과정)
관심분야 : MIMO 무선전송기술

이 승 준 (Seung Joon LEE)



1991년 2월 : KAIST
전기및전자공학과(공학사)
1993년 2월 : KAIST
전기및전자공학과(공학석사)
1998년 2월 : KAIST
전기및전자공학과(공학박사)
1998년 2월 ~ 1999년 2월 :
현대전자
1999년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국전자통신연구원
2002년 12월 ~ 2003년 12월 : Canada, Alberta 대학교
전자컴퓨터공학부 박사 후 연구과정
2008년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 IT대학 전자공학과 교수
관심분야 : OFDM, MIMO, hybrid precoding, 무선
전송기술