

밀리미터파 대역의 다중입출력 안테나 시스템에서 스펙트럼 효율 향상을 위한 적응적 빔 선택 기법

김 준 호*, 변 윤 식^o

Adaptive Beam Selection Method for Improvement of Spectral Efficiency in Millimeter-Wave MIMO

Jun-Ho Kim*, Youn-Shik Byun^o

요 약

최근 빠른속도로 발전하는 무선통신기술로 인하여 스마트 기기의 사용이 날로 증가하고 있다. 이에 따른 데이터 트래픽의 문제가 날로 증가함에 따라 네트워크의 용량 증대를 위하여 아직 개척되지 않은 새로운 영역인 6GHz 이상의 대역에 대한 연구가 진행되었다. 밀리미터파(Millimeter Wave, MmWave) 통신은 6GHz 이상의 대역을 이용하여 초당 기가비트의 데이터 전송률 달성을 가능하게 한다. 작은 파장으로 인한 경로 손실을 극복하기 위해 대량의 안테나 배열을 사용하여 이득을 높인다. 본 논문에서는 하이브리드 빔포밍(Hybrid beamforming)을 이용한 프리코딩 과정에서 시스템의 스펙트럼 효율(Spectral efficiency)을 최대화 하는 알고리즘을 제시하였다. 또한 스펙트럼 효율이 최대가 되는 빔 수의 최적화 방법을 수식을 통해 제안하였다. 제안한 방법으로 스펙트럼 효율을 최대화 하는 것을 확인하였다.

Key Words : Millimeter Wave, Hybrid beamforming, Spectral efficiency, Multiple-Input Multiple Output

ABSTRACT

As the wireless communication technique is developing rapidly, the use of smart devices is increasing. Due to gradually increasing data traffic, a new area, more than 6GHz of bandwidth to increase capacity of the network, has been studied. Millimeter Wave(MmWave) communications utilizes the bandwidth above 6GHz, which makes it possible to achieve one gigabit per second data rate. To overcome the path loss due to the smaller wavelength, the mass of the antenna arrangement is used. This paper presents an algorithm that maximizes the spectral efficiency of the system in the pre-coding process using a hybrid beamforming. Also it is suggested with the optimization of the number of beams that maximizes the spectral efficiency was maximized by the propose method.

I. 서 론

최근 무선통신의 발달로 인한 급격한 모바일 데이터 트래픽의 증가로 인하여 2020년에는 지금의 수십 배

이상이 될 것으로 예상되며, 네트워크의 용량 증대의 필요성이 날로 증가하고 있다. 그러나 추가 주파수 확보가 제한되어 있는 현재의 4세대 이동통신 기술로는 지속적으로 증가하는 데이터 트래픽에 따른 요구를 충

* 본 논문은 인천대학교 2015년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

• First Author : Incheon National University, Department of Electronic Engineering, junho_kim@inu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Incheon National University, Department of Electronic Engineering, byun@inu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-05-093, Received May 12, 2016; Revised August 1, 2016; Accepted August 19, 2016

족사킬 수 없기 때문에 초광대역 확보가 가능한 새로운 스펙트럼 밴드의 개척을 통한 네트워크 용량 증대가 해결책으로 제시되었다. 밀리미터파 통신은 수 기가에서 수십 기가대의 주파수를 이용하여 초당 기가비트의 데이터 전송률 달성을 가능케 하는 기술이다.^[1-3]

고주파 대역의 특징인 자유공간에서의 경로손실을 보완하기 위하여 무선 채널 환경에서 높은 전송률을 달성할 수 있는 대량의 안테나 배열을 이용한 다중 입출력 안테나(Multiple-Input Multiple-Output) 기술이 필수적이다. 또한, 밀리미터파 통신의 특징인 짧은 파장으로 인해 직진성이 강하므로 위상의 조절이 가능한 디지털 빔포밍을 통해서 좋은 성능을 얻을 수 있다. 그러나 기존의 프리코딩의 경우 캐리어 주파수는 동일하지만 밀리미터파 통신에서의 신호 처리의 경우 일련의 제한이 적용된다. 예를 들어, 기존의 MIMO 시스템에서는 기저대역에서 디지털 방식으로 수행되었지만 밀리미터파 통신 시스템의 경우 각 안테나 요소에 대한 전용 기저대역 및 RF(Radio Frequency) 하드웨어를 필요로 한다. 그러나 하드웨어의 높은 비용과 복잡도 및 소비전력이 이러한 송수신기 구조에 많은 제약을 준다. 따라서 디지털 빔포밍을 사용하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 제약들을 극복하기 위하여 위상 시프터를 이용한 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍이 적절하게 결합된 하이브리드 빔포밍이 제안되었으며 현재 활발한 연구가 진행중이다.^[4,7]

밀리미터파 통신의 채널 환경에서는 자유공간에서의 경로 손실과 다중 경로 신호의 산란 특성으로 인하여 항상 높은 성능을 기대하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 밀리미터파 통신에서의 단일 사용자 하이브리드 빔포밍 시스템을 고려하며, 스펙트럼 효율 성능 향상을 위한 빔 선택 알고리즘을 제안한다. 하이브리드 빔포밍 과정에서의 시스템 효율 향상을 위하여 본 논문에서 제안하는 빔 수 조절 방법을 통하여 이상적인 값인 밀리미터파 채널 행렬의 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD) 방법에 수치적으로 가장 근접하는 최적의 값의 수식을 통하여 구할 것이다. 제안하는 방법은 먼저 미리 정해진 다수의 빔 집합들 중에서 하나를 선택한 후 알고리즘을 통하여 사용자가 선택할 빔 집합을 결정한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 밀리미터파 통신의 채널 특성과 시스템 모델에 대하여 정의하고, III장에서는 제안하는 스펙트럼 효율 성능 향상 방법에 대하여 서술한다. 다음 IV장에서는 프리코딩 과정에서의 스펙트럼 효율 성능 향상을 위한 빔 선택 알고리즘을 제안하고 이어서 V장에서는 모의실험을 통

하여 기존 방식과의 비교를 통해 제안하는 빔 선택 알고리즘의 성능을 확인하고, 마지막으로 VI장에서는 본 논문에 대한 결론을 내리며 마무리를 짓는다.

본 논문은 다음의 표기법을 사용한다. X 는 행렬을 의미하며, x 는 벡터를 의미한다. $(\cdot)^*$ 와 $(\cdot)^T$ 는 각각 conjugate transpose와 transpose를 나타낸다. $diag(X)$ 는 행렬 X 의 대각요소에 의해 형성되는 벡터이다. $\|X\|_F$ 는 Frobenius norm을 나타낸다. $(\cdot)_{l,l}$ 은 l 번 째 대각 요소를 나타낸다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 밀리미터파 통신에서의 단일사용자 하이브리드 빔포밍 시스템을 고려한다. N_{BS} 개의 송신단에서 N_{MS} 개의 수신단까지 N_S 개의 데이터 스트림을 통하여 신호를 전달한다. 멀티 스트림 통신을 가능하게 하기 위하여 송신단에는 N_{BS}^{RF} 개의 RF 체인을 갖추고 있다. 심볼 s 는 기저대역의 프리코더 적용 후에 N_{BS}^{RF} 개의 RF 체인을 통과한 후 RF 단의 프리코더를 거쳐 송신안테나로 전달된다. 이 때, 송신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

$$x = F_{RF} F_{BS} s \tag{1}$$

F_{RF} 는 아날로그 위상 시프터를 사용하여 실행되기 때문에 그 요소의 값은 $(F_{RF}^{(i)} F_{RF}^{(i)*})_{l,l} = N_{BS}^{-1}$ 을 만족하도록 설계되며 F_{RF} 의 모든 요소들은 같은 norm 값을 갖는다. 따라서 수신 신호는 아래와 같다.^[1]

$$y = \sqrt{\rho} H F_{RF} F_{BS} s + n \tag{2}$$

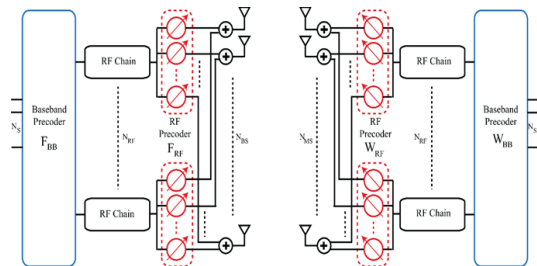


그림 1. 밀리미터파 통신의 하이브리드 프리코딩 시스템 블록도
Fig. 1. System block diagram of hybrid precoding in MmWave communication

y 는 $N_S \times 1$ 인 수신벡터, H 는 $N_{MS} \times N_{BS}$ 인 채널 행렬이다. ρ 는 평균수신전력을 나타내고 n 은 가우시안 백색 잡음을 나타낸다. 원활한 프리코딩을 위하여 채널 H 는 송신단과 수신단 모두에서 완전하게 정보를 알 수 있다고 가정한다. 밀리미터파 통신의 특징인 높은 자유공간 경로 손실을 극복하기 위해 대량의 밀집된 안테나 배열을 사용하여 안테나 상관도가 높은 레벨이 되도록 한다. 다중 경로 신호의 산란 특성을 고려하여 클러스터화 된 채널 모델을 고려한다. 따라서 채널은 다음과 같이 쓸 수 있다.^[5,6]

$$H = \sqrt{\frac{N_{BS} N_{MS}}{N_d^2 N_{ray}}} \sum_{i,l} \alpha_{il} A_{MS}(\Phi_{il}^{MS}, \theta_{il}^{MS}) A_{BS}(\Phi_{il}^{BS}, \theta_{il}^{BS}) a_{MS}(\Phi_{il}^{MS}, \theta_{il}^{MS}) a_{BS}(\Phi_{il}^{BS}, \theta_{il}^{BS})^* \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 나타낸바와 같이 a_{il} 은 i 번 째 산란된 클러스터에서 l 번 째 빔의 이득이다. Φ 와 θ 는 각각 도착지점과 출발지점의 방위각과 상하각을 나타낸다. A 는 각각 출발지점과 도착지점에 대응하는 각도의 송수신안테나 요소이득을 나타낸다. 마지막으로 벡터 a 는 정규화된 송신단과 수신단 안테나 배열응답 벡터를 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 여러 가지 안테나 배열에 적용될 수 있지만 모의실험에서 균일 평면 배열(UPA, Uniform Planar Array)을 사용하였으므로, 이때의 배열 응답 벡터를 제시하였다. 수식은 다음과 같이 주어진다.^[6,10]

$$a(\Phi, \theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, \dots, e^{jkd(m \times \sin(\Phi)\sin(\theta) + n \times \cos(\theta))}, \dots, e^{jkd((W-1)\sin(\Phi)\sin(\theta) + (H-1)\cos(\theta))}]^T \quad (4)$$

수신단은 처리된 수신신호를 얻기 위하여 N_{MS}^{RF} 개의 RF 체인과 아날로그 위상 시프터를 이용하여 다음과 같은 처리된 수신 신호를 얻을 수 있다.^[1,5,10]

$$\tilde{y} = \sqrt{\rho} W_{BB}^* W_{RF}^* H F_{RF} F_{BS} + W_{BB}^* W_{RF}^* n \quad (5)$$

W_{RF} 는 $N_{MS} \times N_{MS}^{RF}$ 인 수신단 결합 행렬이고 W_{BB} 는 $N_{MS}^{RF} \times N_S$ 인 기저대역 결합 행렬이다. 그러므로 $(W_{RF}^{(i)} W_{RF}^{(i)*})_{l,l} = N_{MS}^{-1}$ 을 만족한다. 밀리미터파 채널에서의 심볼 전송 시 얻을 수 있는 스펙트럼 효율 식은 다음과 같다.^[6]

$$R = \log \left(\left(I_{N_S} + \frac{\rho}{N_S} R_n^{-1} W_{BB}^* W_{RF}^* H F_{RF} F_{BB} \times F_{BB}^* F_{RF}^* H W_{RF} W_{BB} \right) \right) \quad (6)$$

$R_n = \sigma_n^2 W_{BB}^* W_{RF}^* W_{RF} W_{BB}$ 는 결합 후의 잡음 분산 행렬이다.

III. 스펙트럼 효율 향상을 위한 적응적 빔 선택 방법

본 장에서는 본 논문에서 고려하는 단일 사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에서 더 높은 스펙트럼 효율을 얻는 방법을 제안한다. 식 (6)에서 알 수 있듯이 밀리미터파 통신에서 스펙트럼 효율을 최대화하기 위해서는 다음의 $F_{RF}, F_{BB}, W_{RF}, W_{BB}$ 네 개의 변수가 영향을 미친다. 따라서 채널 H 에 대한 완전한 정보를 알 때, 제한 없는 프리코더인 F_{opt} 와 $F_{RF} \times F_{BB}$ 가 근사한 값을 찾고 이 정보를 다시 송신기에 피드백하는 방법을 사용한다.^[8] 그러나 밀리미터파 통신의 채널 환경에서는 자유공간에서의 경로손실과 다중경로에 의한 산란 현상이 송신 시마다 성능에 영향을 주기 때문에 전송 시에 사용자들에게 전달되는 발생 가능한 빔의 집합을 변화시켜가면서 신호를 전송한다.

그림 2는 각각 다른 빔 집합에 따른 SVD 방식과 하이브리드 프리코딩 방식의 스펙트럼 효율 성능을 나타낸 그래프이다. 앞서 언급한 바와 같이 빔 집합의 선택에 따라 스펙트럼 효율 성능의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 만약 전송 시에 생성할 수 있는 빔

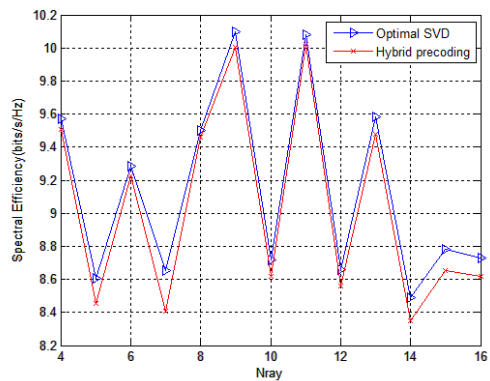


그림 2. N_{ray} 값에 따른 하이브리드 프리코딩의 스펙트럼 효율 성능 비교 그래프
Fig. 2. Spectral efficiency of hybrid precoding based on N_{ray}

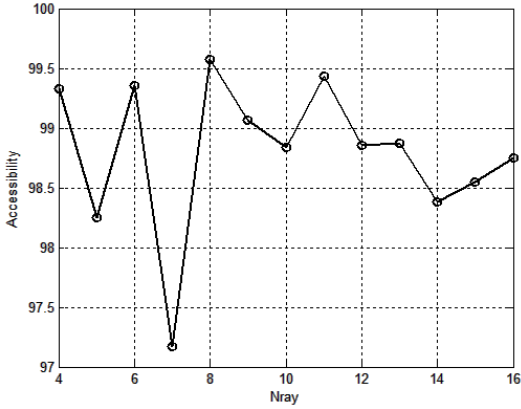


그림 3. N_{ray} 값에 따른 하이브리드 프리코딩의 Accessibility 그래프
 Fig. 3. Accessibility of hybrid precoding based on N_{ray}

의 집합이 제한되어 있다면 가장 이상적인 프리코더의 값으로 예상되는 SVD 방식에 가장 근접한 성능을 갖는 값을 선택하여 사용할 수 있다. 비교를 위하여 성능 근접에 대한 척도의 변수로 Accessibility를 정의하고 이를 수식으로 쓰면 다음과 같다.

$$Accessibility_i = \frac{hybrid_i}{SVD_i} \times 100(\%) \quad (7)$$

위의 수식 (7)을 이용하여 Accessibility 값에 따라 제한된 상황에서의 빔 집합의 생성을 통해 이론치에 가장 근접한 성능을 얻을 수 있다.^[9]

위의 그림 3은 이론치에 가장 근접하는 스펙트럼 효율 값을 얻을 수 있는 빔 집합을 선택하기 위해 N_{ray} 의 값에 따른 Accessibility를 측정하였다. 값이 8일 때 가장 이론치에 근접한 것을 알 수 있다. 따라서 제한된 상황에서 이상적인 프리코더에 근접한 성능을 얻을 수 있는 파라미터를 선택하여 전송하면 시스템 효율을 높이는 데 이점을 얻을 수 있다. 그러나 본 논문에서는 가장 높은 스펙트럼 효율 성능을 얻기 위하여 전송 시에 발생할 수 있는 모든 빔 집합을 고려하고, 이에 따른 스펙트럼 효율 성능을 측정 후 SNR값의

변화에 따라 가장 높은 성능이 기대되는 빔 집합만을 적응적으로 선택하여 전송할 것이다.

따라서 제안하는 방식을 이용하면 정해진 범위 내에서 가장 높은 값을 선택하여 사용하므로 기존 시스템보다 전체적으로 높은 성능을 얻을 수 있다.

IV. 제안하는 적응적 빔 선택 알고리즘

본 장에서는 제안하는 알고리즘을 소개한다. 신호 전송 시에 미리 정해진 $length(Ray)$ 개의 빔 집합들 중에 하나를 선택하여 송신하게 된다. 이 때, $length(Ray)$ 개의 빔 집합을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{Beam} = [g_1, g_2, \dots, g_{length(Ray)}] \quad (8)$$

g_i 는 i 번 째 빔 집합을 나타낸다. 각 빔 집합이 가지고 있는 빔의 개수는 최대 송신 안테나의 수를 넘지 않는 것으로 가정하였다. 알고리즘에 따라 선택될 빔 집합을 저장하기 위하여 빈 공간인 Ad_{Beam} 행렬을 생성한다. 최소 4개에서 최대 16개의 빔을 생성한 후에 각각의 생성된 빔을 이용한 시행에서 가장 높은 스펙트럼 효율을 갖는 값을 도출해낸다. 이 때, 미리 언급된 바와 같이 위에 제시된 (6) 식을 통하여 계산된 스펙트럼 효율 성능을 비교하여 가장 높은 값을 갖는 g_i 를 찾고, 이를 전송 시 사용할 빔 집합으로 선택하게 된다. 이러한 방식으로 정해진 모든 SNR 범위 내에서 빔 집합이 선택될 때까지 반복적으로 수행하게 된다. 모든 계산이 완료되면 Ad_{Beam} 을 출력한다. 제안하는 적응적 빔 선택 알고리즘은 다음의 표 2과 같다.

또한, 표 1은 기존의 하이브리드 빔포밍 알고리즘과 제안하는 알고리즘의 복잡도를 비교하기 위하여 각각의 연산량을 비교한 것으로서, 계산에 요구되는 행렬의 합과 곱을 나타내었다. $N_{ray}^{(i)}$ 는 i 번째의 N_{ray} 값을 나타낸다. 제안하는 방식의 경우 스펙트럼 효율 향상을 위하여 (6) 수식을 이용하여 N_{ray} 에 변화에 따른 스펙트

표 1. 기존의 알고리즘과 제안하는 알고리즘의 계산 복잡도 비교
 Table 1. Comparison between the existion method and proposed method

Algorithm	Matrix multiplication	Matrix summation
Existing method	$(8 + N_{cl}N_{ray})N_{BS}^{RF}n$	$N_{BS}^{RF}n$
Proposed method	$\sum_{i=N_{ray}^{min}}^{N_{ray}^{max}} (8 + N_{cl}N_{ray}^{(i)})N_{BS}^{RF}n$	$N_{BS}^{RF}(N_{ray}^{max} - N_{ray}^{min} + 1)n$

표 2. 제안하는 적응적 빔 선택 알고리즘
Table 2. Proposed an adaptive beam selection algorithm

Algorithm Selection for Beam group	
1.	$Ad_{Beam} = \text{Empty Matrix}$
2.	Ray $\rightarrow N_{Ray}$
3.	Ray = [4 : 16]
4.	for $k \leq \text{length}(SNR)$
5.	for $k \leq \text{length}(Ray)$
6.	calculate $R(i)$
7.	$m = \text{argmax}_{i=1,2,\dots,\text{length}(Ray)}(R(i))$
8.	$Ad_{Beam}(k) = [Ad_{Beam}(k) R(m)]$
9.	end
10.	end
11.	return Ad_{Beam}

럼 효율 값들을 출력하기 때문에 시스템의 Bit Error Rate(BER)에 직접적인 영향을 미치는 처리된 수신신호 \tilde{y} 값을 통한 신호 전송 및 검출 과정은 기존 방식과 차이가 없으며, 제안하는 방식의 SNR에 따른 BER 성능은 기존 방식과 차이를 갖지 않는다. 따라서, N_{ray} 에 의하여 발생하는 집합들의 수에 비례하여 행렬 계산의 복잡도가 증가하지만 가장 큰 영향을 미치는 시행회수 n 의 차수는 증가하지 않으며, 모든 SNR 범위 내에서 스펙트럼 효율은 증가한다.

V. 모의실험 결과

본 장에서는 IV장에서 제안하는 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 기존 방법과 스펙트럼 효율 성능을 모의실험을 통하여 확인한다. SNR 값의 증가에 따른 스펙트럼 효율 성능을 비교하였다. 모의실험을 위하여 수신기가 비교적 작은 안테나 배열을 가진 $N_{BS} = 64$, $N_{MS} = 16$ 인 단일 사용자 하이브리드 빔포밍 시스템을 고려하였다.

송수신기는 각각 4개의 RF 체인을 사용하는 것으로 가정하였다. 대량의 안테나로 인한 공간적인 효율을 위하여 선형 배열이 아닌 정사각형 모양의 평면 안테나 배열을 가정하였으며 밀리미터파 대역의 전파 특성이 가장 알맞은 것으로 밝혀진 라플라시안 분포를 가정하였다. 송신기의 전송 빔 폭은 방위각 60° , 상하각 20° 로 가정하였다. 수신기의 경우 실제 시스템과 같이 어느 방향에서든 빔을 수신할 수 있다. 이상의 매개

변수들을 정리하면 아래의 표 3과 같다.

그림 4는 제안하는 알고리즘에 따라 계산된 Ad_{beam} 의 다수의 시행에 따른 평균값을 빔 집합을 고려하지 않은 기존의 방법과 비교하기 위하여 SNR의 변화에 따라 출력한 그래프이다. 앞서 언급한 바와 같이 스펙트럼 효율 성능 그래프는 정해진 임의의 구간 내에서 항상 높은 스펙트럼 효율값을 갖는 것을 알 수 있다.

표 3. 모의실험 매개변수
Table 3. Simulation parameters

Parameter	Value
SNR(dB)	-40 ~ 0
Angular spread	7.5°
Antenna array	Uniform planar array
Transmit antenna	64
Receiver antenna	16
Number of RF chain	4
Azimuth angle - transmit	60°
Elevation angle - transmit	20°

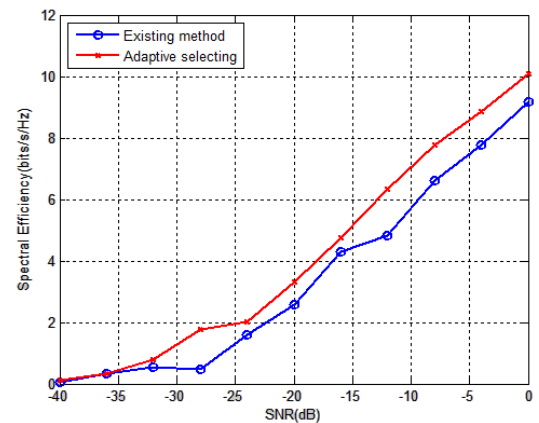


그림 4. 제안하는 알고리즘의 SNR 값에 따른 스펙트럼 효율 성능 비교 그래프

Fig. 4. Spectral efficiency of the proposed algorithm based on SNR

VI. 결론

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 단일사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에서 높은 스펙트럼 효율값을 얻기 위한 방법을 제안하였다. 밀리미터파 대역의 특성인 다중경로에 의한 산란 현상을 고려하여 전송 시 빔의

변화에 따른 성능을 분석한 결과를 적응적으로 선택하여 알고리즘을 설계하였다. 본 실험을 통해 전송 시 선택하는 빔이 스펙트럼 효율 성능 변화에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었으며, 제안한 알고리즘을 적용시킨 방법이 기존의 방법과 비교해 볼 때 제안한 방법이 모의실험에서 제시한 모든 SNR 값 내에서 전체적으로 높은 성능을 얻을 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 제안하는 방법이 고 효율 전송 방식을 지향하는 밀리미터파 통신에서의 적용에 이점을 가질 것으로 예상되며 향후 5세대 이동통신에서의 적용을 위하여 실제 환경을 고려하는 시스템에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

[1] E. Torkildson, C. Sheldon, U. Madhow, and M. Rodwell, "Millimeter-Wave spatial multiplexing in an indoor environment," in *Proc. 2009 IEEE GLOBECOM Wksp.*, pp.1-6, 2009.

[2] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE -advanced : next-generation wireless broadband technology," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 10-22, 2010.

[3] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. no. 6, pp. 101-107, Jun. 2011.

[4] O. El Ayach, R. W. Heath, Jr., S. Abu-Surra, S. Rajagopal, and Z. Pi, "Low complexity precoding for large millimeter wave MIMO systems," in *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 3724-3729, 2012.

[5] A. Alkhateeb, O. El Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, Jr., "Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge," in *Proc. Inf. Theory Appl. Wksp.*, pp. 1-5, San Diego, 2013.

[6] O. El Ayach, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, Jr., "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 13, pp. 1499-1513, Mar. 2014.

[7] T. S. Rappaport, R. W. Heath Jr., R. C. Danniels, and J. N. Murdock, *Millimeter Wave Wireless Communications*, PRENTICE HALL,

2014.

[8] C. Z. Zhan, Y. L. Chen, and Y. Wu, "Iterative superlinear-convergence SVD beamforming algorithm and architecture for MIMO-OFDM systems," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 60, no. 6, pp. 3264-3277, 2012.

[9] J. Kim and Y. Byun, "A study on the beam selection for the maximizing spectral efficiency of a hybrid precoding in mmWave band systems," *KICS Int. Conf. Commun.*, vol. 58 no. 8C-14, pp. 556-557, Seoul, Korea, Nov. 2015.

[10] X. Gao, L. Dai, S. Han, I. Cihn-Lin, and R. W. Heath, "Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 998-1009, Apr. 2016.

김 준 호 (Jun-Ho Kim)



2015년 2월 : 인천대학교 전자공학과 졸업
 2015년 3월~현재 : 인천대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> MmWave MIMO, 디지털 통신 및 신호처리

변 윤 식 (Youn-Shik Byun)



1978년 2월 : 연세대학교 전기공학과 졸업
 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
 1985년 2월 : 연세대학교 전자공학과 박사
 1990년 8월~1991년 7월 : 미국 Stanford대학 전자공학과 객원교수
 2004년 9월~2005년 8월 : 고려대학교 전파통신 공학과 객원 교수
 2006년 7월~2008년 2월 : 인천대학교 공과대학장
 2008년 3월~2008년 7월 : 인천대학교 교무처장
 2010년 8월~2011년 12월 : 인천대학교 대학원장
 1987년 3월~현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 디지털 통신 및 신호처리