

# 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에서 채널 추정과 아날로그 빔 선택 방법

김 명 진\*, 고 영 채<sup>o</sup>

## Channel Estimation and Analog Beam Selection for Uplink Multiuser Hybrid Beamforming System

Myeong-Jin Kim\*, Young-Chai Ko<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문에서는 하나의 AP가 다수의 사용자를 지원하는 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템을 고려한다. 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템의 성능은 채널에 아날로그 빔이 결합된 형태의 유효 채널에 의해서 결정된다. 따라서 시스템의 성능을 최대화하기 위해서는 채널의 정보를 획득하고 획득된 채널 정보를 이용해서 아날로그 빔을 적절히 선택해야 한다. 본 논문에서는 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에 적합한 채널 추정 방법과 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘을 제안한다. 또한 수학적으로 계산 복잡도 분석을 통해서 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘이 최적의 아날로그 빔 선택 알고리즘에 비해서 복잡도가 훨씬 작은 것을 보여준다. 모의 실험 결과를 통하여 동일한 조건 하에서 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘이 최적의 아날로그 빔 선택 알고리즘에 비해 줄어든 계산 복잡도에 비하여 성능 면에서 열화가 거의 없는 것을 확인한다.

**Key Words** : uplink multiuser hybrid beamforming, channel estimation

### ABSTRACT

In this paper, we consider an uplink multiuser hybrid beamforming system where an access point (AP) communicates with multiple users simultaneously. The performance of the uplink multiuser hybrid beamforming system depends on the effective channel which is given by the product of the channel matrix and the analog beams. Therefore, to maximize the performance, we need to obtain the channel information and then select the analog beams appropriately by using the acquired channel information. In this paper, we propose the channel estimation method and low complexity analog beam selection algorithm for the uplink multiuser hybrid beamforming system. Additionally, our analysis shows that the proposed low complexity analog beam selection algorithm provides much less complexity than the optimum analog beam selection algorithm. From the numerical results, we confirm that the proposed low complexity analog beam selection algorithm has little performance degradation in spite of much less complexity than the optimum analog beam selection algorithm under the equal system configuration.

\* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송연구개발사업[2014-044-006-004, 고성능, 고효율의 차세대 무선랜 무선전송 원천기술 개발]과 삼성전자 DMC 연구소의 지원으로 수행하였음.

• First Author : School of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea, smjkmj1004@korea.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea, koyc@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-02-031, Received February 12, 2015; Revised March 23, 2015; Accepted March 23, 2015

## I. 서 론

다중사용자 다중입출력 시스템은 무선 채널 환경에서 높은 전송률을 가능하게 하는 기술이므로 이미 무선랜 표준인 IEEE 802.11 ac에서 적용이 되었다<sup>1-3</sup>. 이러한 다중사용자 다중입출력 시스템에서 제로 포싱이나 최소 평균 제곱 에러와 같은 기존의 연구된 디지털 빔포밍 기법들을 사용하여 좋은 성능을 얻을 수 있다. 따라서 IEEE 802.11 ac 표준은 지금부터 수년간은 다양한 무선 기기들을 무선랜 환경에서 지원하는 데 큰 문제가 없을 것으로 보인다. 그러나 향후 지금에 비해서 훨씬 더 많은 AP (Access Point)들이 중첩되어 운영되며 수많은 단말이 동시에 통신을 하는 고밀도 네트워크에서 실제적인 체감 성능을 만족시키기 위해서는 보다 더 진보된 차세대 무선랜 표준이 필요하다. 그러한 목적으로 AP와 단말이 고밀도로 혼재된 실내외 환경에서 사용자가 실질적으로 체감할 수 있는 고효율의 무선랜 표준을 개발하기 위해서 차세대 무선랜 표준인 IEEE 802.11 ax에 대한 논의가 활발하게 진행 중이다<sup>4,5</sup>. 이와 더불어 주파수의 효율과 평균 전송률을 증가시키고 에너지의 효율성을 높이는 방안에 대하여 논의되고 있다. 이렇게 다양한 요구 사항을 가능하게 하는 기술로 거대 배열 다중입출력 시스템을 차세대 무선랜 표준에 적용하지는 내용의 기고가 발표되었다<sup>6,7</sup>.

거대 배열 다중입출력 시스템은 가중치 값과 위상을 정확하게 조절할 수 있는 디지털 빔포밍을 통해서 좋은 성능을 얻을 수 있다<sup>8</sup>. 하지만 그러기 위해서는 각 안테나마다 RF (Radio Frequency) 체인이 필요하므로 가격, 복잡성, 전력 소비 측면에서 효율적이지 못하다<sup>9</sup>. 따라서 디지털 빔포밍을 실제 거대 배열 다중입출력 시스템에 적용하는 것은 비현실적일 수가 있다. 그러므로 저렴한 위상 변환기를 사용하여 각 안테나에서 보내는 신호의 위상을 조절하는 아날로그 빔포밍이 경제적인 측면에서는 디지털 빔포밍에 비해서 훨씬 효율적이다<sup>10</sup>. 하지만 아날로그 빔포밍은 미리 정해진 위상값들 중에서만 위상을 변화시킬 수 있으므로 디지털 빔포밍에 비해서 성능의 열화가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍이 결합된 하이브리드 빔포밍 시스템이 제안되었다<sup>11,12</sup>. 하이브리드 빔포밍에 관한 많은 연구들이 진행되었지만 대부분의 연구는 일대일 통신을 가정하였다<sup>13,14</sup>.

본 논문에서는 상향링크 다중 사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에서 채널 획득 방법과 저복잡도 아날

로그 빔 선택 알고리즘을 제안한다. 하이브리드 빔포밍 시스템에서는 성능을 최적화하기 위해서는 채널 정보가 필요하다. 하지만 아날로그디지털 컨버터의 수가 안테나 개수만큼 존재하지 않기 때문에 여러 개의 안테나에서 받은 신호들이 결합되어 아날로그디지털 컨버터로 입력된다. 따라서 하이브리드 빔포밍 시스템에서는 한 파일럿 구간 동안 모든 채널 정보를 얻는 것이 불가능하므로 기존의 다중입출력 시스템에서 사용하는 채널 획득 방법과는 다른 하이브리드 빔포밍 시스템에 적합한 채널 획득 방법이 필요하다. 따라서 본 논문에서 미리 정해진 순서대로 안테나를 On/Off 하면서 한 번의 파일럿 구간 동안 부분 채널을 획득함으로써 다수의 파일럿 구간 동안 전체 채널을 획득하는 방식을 제안한다.

하이브리드 빔포밍 시스템에서는 실제 채널에 아날로그 빔이 곱해진 형태의 유효 채널이 시스템의 성능을 결정하기 때문에 아날로그 빔의 선택에 따라서 시스템의 성능이 결정된다. AP와 다수의 사용자가 이러한 하이브리드 빔포밍 시스템을 가지는 경우에 최적의 성능을 가져다주는 아날로그 빔을 찾는 방법으로는 과도한 검색 (exhaustive search)이 있지만 이 방법은 모든 가능한 경우에 대하여 고려해야 되기 때문에 복잡도가 너무 높아서 상당한 시간을 소요하게 된다. 따라서 이와 같은 최적의 방법인 과도한 검색은 실제 시스템에 적용하는데 있어서 어려움이 있다. 그러므로 본 논문에서는 최적의 방법에 비해서 복잡도가 상당히 줄어들지만 성능의 저하가 거의 발생하지 않는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘을 제안한다. 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘은 먼저 AP에서 미리 정해진 다수의 아날로그 빔들 중에서 하나를 아날로그 빔으로 선택한 후 본 논문에서 소개된 메트릭을 사용하여 사용자들의 아날로그 빔을 결정한 후 총 전송률을 구한다. 이러한 방식으로 AP에서 미리 정해진 다수의 아날로그 빔들에 대한 총 전송률을 구한 후 그 값들을 비교하여 가장 큰 총 전송률을 가지는 경우에 해당하는 아날로그 빔들을 AP와 사용자들의 아날로그 빔으로 선택하는 방식이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 시스템 모델을 정의한다. 3장에서는 하이브리드 빔포밍 시스템에 적합한 채널 추정 방법을 제안한다. 4장에서는 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘에 대하여 설명하고 복잡도를 비교한다. 이어서 5장에서는 모의 실험을 통하여 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘의 성능을 확인하고 6장에서 본 논문에 대한 간단한 결론을 내리며 마무리를 짓는다.

본 논문에서는 다음과 같은 표기법을 따른다. 볼드체 대문자와 소문자는 각각 행렬과 벡터를 의미한다.  $(\cdot)^T$ 와  $(\cdot)^H$ 는 행렬의 transpose와 conjugate transpose를 나타내며  $\|\cdot\|^2$ 는 벡터 놈을 나타낸다.

### II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템을 고려한다.  $N_{BS}$ 개의 안테나를 가지는 한 개의 AP가  $N_{user}$ 개의 안테나를 가지는  $K$ 명의 사용자를 지원한다. 각 사용자는 아날로그 빔포밍을 통해 RF 빔을 형성하기 때문에  $N_{user}$ 개의 안테나를 가지고 있다. AP는 아날로그 빔포밍을 형성하는 부분과 디지털 빔포밍을 형성하는 부분이 합쳐진 하이브리드 빔포밍 구조를 가지고 있다. AP의 디지털 빔포밍 단에서는  $K$ 명의 사용자들의 서로 다른 데이터를 복호하기 위해서  $N_s \geq K$ 개의 RF 체인을 가지고 있다. AP의 아날로그 빔포밍 단에서는 RF 빔을 형성하기 위해서 각 RF 체인에  $N_{BS}^{RF}$ 개의 안테나가 있다. 그러므로 AP는 총  $N_{BS} = N_s \times N_{BS}^{RF}$ 개의 안테나를 가지고 있다.

$i$ 번째 사용자가 한 개의 데이터 스트림을 전송한다고 할 때 보내는 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{t}_i s_i \tag{1}$$

여기서  $s_i$ 는  $i$ 번째 사용자의 데이터 스트림이며

$\mathbf{t}_i = [t_{i1} \dots t_{iN_{user}}]$ 는 아날로그 빔포밍 벡터이다. 각 사용자의 전송 전력을  $P$ 라 할 때  $\|\mathbf{x}_i\|^2 \leq P$ 의 전력 제약 조건을 만족한다. 따라서 AP에서 받은 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{n} = \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{t}_i s_i + \mathbf{n} \tag{2}$$

여기서  $\mathbf{H}_i$ 는 AP와  $i$ 번째 사용자 간의 채널 행렬을 나타낸다.  $\mathbf{n}$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 복소 가우시안 잡음 벡터를 의미한다.  $l$ 번째 RF 체인에서  $j$ 번째 위상 변이의 값을  $b_{lj}^l$ 라고 할 경우  $l$ 번째 RF 체인에 해당하는 아날로그 빔포밍 벡터  $\mathbf{b}_l$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{b}_l = [b_{l1}^l \dots b_{lN_{BS}^{RF}}^l]^T \tag{3}$$

따라서 모든 RF 체인에 대한 아날로그 빔포밍 행렬  $\mathbf{B}$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^T & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{b}_{N_s}^T \end{bmatrix} = \text{diag}[\mathbf{b}_1^T \dots \mathbf{b}_{N_s}^T] = \text{mat}[\mathbf{b}] \tag{4}$$

여기서  $\mathbf{b} = [\mathbf{b}_1^T \dots \mathbf{b}_{N_s}^T]^T$ 는 AP의 모든 위상 변이의 값들로 이루어진 벡터를 나타낸다. 따라서 아날로그 빔포밍을 통과한 신호는 다음과 같다.

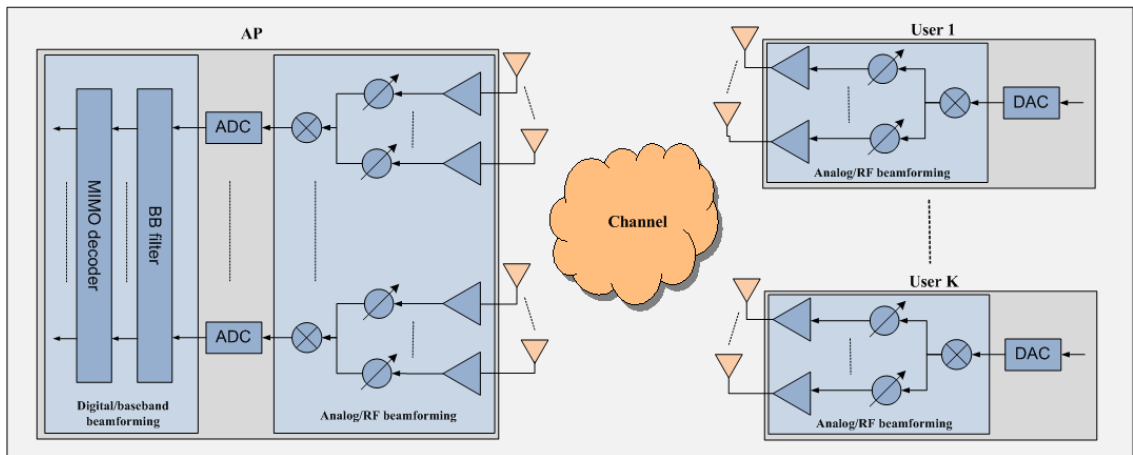


그림 1. 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템  
Fig. 1. Uplink multiuser hybrid beamforming system

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{y}} &= \mathbf{B} \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{B} \mathbf{n} \\
 &= \sum_{i=1}^K \mathbf{B} \mathbf{H}_i \mathbf{t}_i s_i + \bar{\mathbf{n}} \\
 &= \sum_{i=1}^K \mathbf{h}_i^{eff} s_i + \bar{\mathbf{n}} \\
 &= \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^{eff} & \dots & \mathbf{h}_K^{eff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_K \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{n}} \\
 &= \mathbf{H}^{eff} \mathbf{s} + \bar{\mathbf{n}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $\mathbf{h}_i^{eff} = \mathbf{B} \mathbf{H}_i \mathbf{t}_i$ 는  $i$ 번째 사용자와 AP 사이의 유효 채널 벡터로써 실제 채널에 AP와  $i$ 번째 사용자의 아날로그 빔포밍이 곱해진 형태이다. 식 (5)를 통해서 유효 채널에 의해서 시스템의 성능이 결정되는 것을 알 수 있다.

디지털 빔포밍 단에서는 사용자들 간의 간섭을 제거하기 위해서 제로 포싱 빔포밍을 고려한다. 따라서 제로 포싱 빔포밍 행렬  $\mathbf{W}$ 은  $\mathbf{H}^{eff}$ 의 의사역행렬이므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^{effH} \mathbf{H}^{eff})^{-1} \mathbf{H}^{eff} \tag{6}$$

이러한 디지털 빔포밍을 통과한 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{y}} &= \mathbf{W} \bar{\mathbf{y}} \\
 &= (\mathbf{H}^{effH} \mathbf{H}^{eff})^{-1} \mathbf{H}^{eff} \bar{\mathbf{y}} \\
 &= \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_K \end{bmatrix} + (\mathbf{H}^{effH} \mathbf{H}^{eff})^{-1} \mathbf{H}^{eff} \bar{\mathbf{n}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

따라서 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에서 총 전송률은 아래의 식 (8)과 같다. 식 (8)에서  $[\mathbf{A}]_{i,j}$ 는 행렬  $\mathbf{A}$ 의  $i$ 번째 행과  $j$ 번째 열이 교차하는 곳의 값이다.

### III. 제안하는 채널 추정

본 장에서는 본 논문에서 고려하는 상향링크 다중

사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에 적합한 채널 추정 방법을 제안한다. 식 (8)에서 알 수 있듯이 시스템의 성능은 유효 채널에 의해서 결정된다. 유효 채널은 각 사용자와 AP에서 사용하는 아날로그 빔과 채널에 의해서 결정된다. 따라서 상향링크 상황에서 AP는 채널을 추정하고 추정된 채널을 통해서 유효 채널을 계산한 뒤 최고의 성능을 제공하는 아날로그 빔을 선택해야 된다. AP에서 사용자들의 아날로그 빔을 정확하게 되면 사용자들이 사용할 아날로그 빔에 대한 정보를 각 사용자들에게 피드백 해주게 된다. 그러므로 이러한 절차를 위해서 AP는 일단 각 아날로그 빔에 따른 유효 채널을 계산하기 위해서 채널을 추정해야 한다. 하지만 하이브리드 빔포밍 시스템에서는 안테나의 개수가 아날로그 디지털 변환기의 개수보다 많기 때문에 한 번의 파일럿 구간 동안 전체 채널을 추정할 수가 없다. 다시 말해서 하나의 아날로그 디지털 변환기로 들어오는 신호는  $N_{BS}^{RF}$ 개의 안테나에서 받은 신호들이 결합되어 있기 채널을 추정 할 수 없게 되는 것이다. 따라서 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에 적합한 채널 추정 방법이 필요하다.

제안하는 방식은 한 번의 파일럿 구간 동안 부분 채널을 획득함으로써 다수의 파일럿 구간 동안 전체 채널을 획득하는 방식이다. 그림 2는 본 논문에서 제안하는 부분 채널 추정 방법의 예를 도시하였다. 한 번의 파일럿 구간 동안 하나의 RF 채널에 있는 여러 개의 안테나 중에서 연고자 하는 채널 계수에 해당하는 한 개의 안테나만 작동 시키고 나머지 안테나들은 작동을 정지시킨 상태에서 파일럿 시퀀스를 보낸다.  $i$ 번째 사용자의 파일럿 시퀀스는 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_i = [p_1^i \dots p_\tau^i]^T \tag{9}$$

여기서  $\tau$ 는 파일럿 시퀀스의 길이가 된다.  $K$ 명의 사용자가 존재하는 경우 각 사용자에 대한 채널 정보를 획득하기 위해서는 파일럿 시퀀스의 길이는 사용자의 수보다 크거나 같아야 한다. 즉,  $\tau \geq K$ 를 만족해야 한다. 한 번의 파일럿 구간 동안 받은 신호는 다음과 같다.

$$R = \sum_{i=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_{user} \times N_{BS}^{RF} \times \sigma^2 \times [(\mathbf{H}^{effH} \mathbf{H}^{eff})^{-1}]_{i,i}} \right) \tag{8}$$

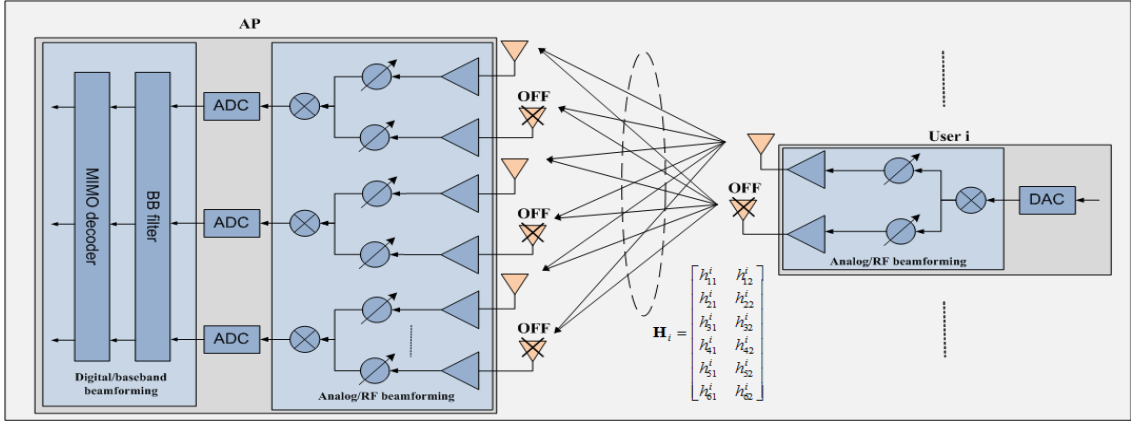


그림 2. 부분 채널 추정의 예  
Fig. 2. Example of partial channel estimation

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{Y}} &= \sum_{i=1}^K \mathbf{B} \mathbf{H}_i \mathbf{t}_i \mathbf{p}_i^T + \bar{\mathbf{N}} \\
 &= \sum_{i=1}^K \begin{bmatrix} \mathbf{b}_i^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{b}_i^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{b}_i^T \end{bmatrix} \mathbf{H}_i \mathbf{t}_i \mathbf{p}_i^T + \bar{\mathbf{N}} \\
 &= \sum_{i=1}^K \begin{bmatrix} b_1^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_1^3 \end{bmatrix} \mathbf{H}_i \begin{bmatrix} t_1^i \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{p}_i^T +
 \end{aligned} \tag{10}$$

다음과 같은 두 가지의 성질을 이용한다.

- 1) 사용자들이 사용하는 파일럿 시퀀스는 AP가 미리 알고 있으며 사용자들 간의 파일럿 시퀀스는 서로 직교한다.
- 2) 사용자들은 채널 추정 구간 동안 미리 정해진 아날로그 빔포밍 벡터를 사용하며 AP는 각 사용자가

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \widehat{h}_{11}^i \\ \widehat{h}_{31}^i \\ \widehat{h}_{51}^i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{b_1^1 t_1^i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b_1^2 t_1^i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{b_1^3 t_1^i} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{Y}} (\mathbf{p}_i^T)^H \\
 &= \begin{bmatrix} h_{11}^i \\ h_{31}^i \\ h_{51}^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{b_1^1 t_1^i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b_1^2 t_1^i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{b_1^3 t_1^i} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{N}} \\
 &= \begin{bmatrix} h_{11}^i \\ h_{31}^i \\ h_{51}^i \end{bmatrix} + \tilde{\mathbf{n}}
 \end{aligned} \tag{11}$$

채널 추정 구간 동안 사용하는 아날로그 빔포밍 벡터에 대한 정보를 가지고 있다.

따라서 다음과 같은 방식으로  $i$ 번째 사용자의 부분 채널을 추정할 수가 있다.

제안된 방식을 이용하면 한 번의 파일럿 구간 동안  $N_s$ 개의 채널 계수를 얻을 수 있다. 하지만 한 사용자와 AP 간의 채널 행렬은  $N_{BS} \times N_{user}$ 개의 채널 계수를 가지고 있으므로 전체 채널 정보를 얻기 위해 필요한 파일럿 구간 ( $\rho$ )의 개수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{N_{BS} \times N_{user}}{N_s} \\
 &= \frac{N_s \times N_{BS}^{RF} \times N_{user}}{N_s} \\
 &= N_{BS}^{RF} \times N_{user}
 \end{aligned} \tag{12}$$

따라서  $N_{BS}^{RF} \times N_{user}$ 개의 파일럿 구간이 있어야 전체 채널 정보를 얻을 수 있다. 그러므로 제안된 방식으로 전체 채널 정보를 얻기 위해서 필요한 파일럿 구간들이 가지는 시퀀스의 총 길이는  $N_{BS}^{RF} \times N_{user} \times \tau$ 이 된다.

#### IV. 제안하는 아날로그 빔 선택 알고리즘

본 장에서는 먼저 두 명의 사용자가 존재하는 상향링크 다중 사용자 하이브리드 빔포밍 시스템의 총 전송률을 분석하고 제안하는 아날로그 빔 선택 알고리즘을 위한 메트릭을 소개한다. 그리고 이어서 제안된

저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘에 대하여 설명한 후 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘의 복잡도를 분석한다.

#### 4.1 성능 분석

식 (8)에서 알 수 있듯이 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템의 성능은 유효 채널 이득과 관계가 있다. 본 절에서는 두 명의 사용자가 존재하는 상향링크 다중 사용자 하이브리드 빔포밍 시스템의 총 전송률을 분석하도록 하겠다.

두 명의 사용자와 AP가 사용하는 아날로그 빔이 정해져 있을 때  $\mathbf{H}^{effH} \mathbf{H}^{eff}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{H}^{effH} \mathbf{H}^{eff} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^{effH} \mathbf{h}_1^{eff} & \mathbf{h}_1^{effH} \mathbf{h}_2^{eff} \\ \mathbf{h}_2^{effH} \mathbf{h}_1^{eff} & \mathbf{h}_2^{effH} \mathbf{h}_2^{eff} \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서 식 (13)의 역행렬은 아래의 식 (14)와 같이 표현된다. 식 (14)에서  $\sin\theta_{12}$ 는  $\mathbf{h}_1^{eff}$ 와  $\mathbf{h}_2^{eff}$  사이의 각을 나타낸다. 따라서 각 사용자의 전송률은 사용자와 AP 간의 유효 채널과 사용자들의 유효 채널 들 간의 각도와 관계가 있는 것을 알 수 있다. 따라서 두 명의 사용자가 존재하는 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에서 총 전송률은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있으며 식 (15)에서  $f(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 는 식(16)에 정의되어 있다. 제안하는 아날로그 빔 선택 알고리즘의 목표는 최고의 전송률을 제공하는 아날로그 빔을 선택하는 것이기 때문에 식 (15)를 최대화하는 아날로그 빔을 찾으려 한다. 하지만 로그 함수는 단조 증가 함수이기 때문에 식 (15)를 최대화 시키는 아날로그 빔을 찾는 문제는 식 (16)을 최대화 시키는 아날로그 빔을 선택하는 문제와 같은 것이 된다. 이렇게 하는 것은 로그를 계산하는 절차가 필요 없으므로 복잡도를

감소시켜주는 효과가 있다. 사용자의 수가 3명 이상일 경우는 총 전송률 식이 복잡하게 되므로 계산하는데 많은 복잡도가 필요하다. 그러므로 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘에서는 3명 이상의 사용자가 존재할 경우 한명의 사용자의 해당하는 유효 채널 벡터와 나머지 사용자들의 유효 채널 벡터들을 가중치를 두어서 결합한 하나의 가중치 유효 채널 벡터를 식 (16)을 대입하여 아날로그 빔을 선택하게 된다.

#### 4.2 아날로그 빔 집합

AP는 미리 정해진  $N_{BS}^{BSS}$ 개의 아날로그 빔들 중에서 하나를 아날로그 빔으로 정하게 된다.  $N_{BS}^{BSS}$ 개의 아날로그 빔으로 이루어진 집합을 다음과 같이 표현한다.

$$\mathbf{G}_{BS} = \{\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_{N_{BS}^{BSS}}\} \quad (17)$$

$\mathbf{g}_i$ 는  $N_{BS} \times 1$  벡터이며  $\mathbf{g}_i$ 의  $m$ 번째에 해당하는 값은 AP의  $m$ 번째 안테나의 위상 변이 값이 된다.

각 사용자는 미리 정해진  $N_{user}^{BSS}$ 개의 아날로그 빔들 중에서 하나를 아날로그 빔으로 정하게 된다.  $N_{user}^{BSS}$ 개의 아날로그 빔으로 이루어진 집합을 다음과 같이 표현한다.

$$\mathbf{C}_{BS} = \{\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_{N_{user}^{BSS}}\} \quad (18)$$

$\mathbf{c}_i$ 는  $N_{user} \times 1$  벡터이며  $\mathbf{c}_i$ 의  $n$ 번째에 해당하는 값은 사용자의  $n$ 번째 안테나의 위상 변이 값이 된다.

따라서 AP와  $i$ 번째 사용자가 각각  $\mathbf{g}_m$ 과  $\mathbf{c}_n$ 를 아날로그 빔으로 선택하였을 경우에 AP와  $i$ 번째 사용자 간의 유효 채널 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(\mathbf{H}^{effH} \mathbf{H}^{eff})^{-1} = \frac{1}{\|\mathbf{h}_1^{eff}\|^2 \|\mathbf{h}_2^{eff}\|^2 \sin\theta_{12}} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_2^{effH} \mathbf{h}_2^{eff} & -\mathbf{h}_1^{effH} \mathbf{h}_2^{eff} \\ -\mathbf{h}_2^{effH} \mathbf{h}_1^{eff} & \mathbf{h}_1^{effH} \mathbf{h}_1^{eff} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R_{12} = \sum_{i=1}^2 \log_2 \left( 1 + \frac{P \|\mathbf{h}_i^{eff}\|^2 \sin\theta_{12}}{N_{user} \times N_{BS}^{RF} \times \sigma^2} \right) = \log_2(1 + Pf(\mathbf{h}_1^{eff}, \mathbf{h}_2^{eff})) \quad (15)$$

$$f(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{\|\mathbf{a}\|^2 \sin\theta_{ab}}{N_{user} \times N_{BS}^{RF} \times \sigma^2} + \frac{\|\mathbf{b}\|^2 \sin\theta_{ab}}{N_{user} \times N_{BS}^{RF} \times \sigma^2} + \frac{P \|\mathbf{a}\|^2 \|\mathbf{b}\|^2 \sin\theta_{ab}^2}{N_{user}^2 \times N_{BS}^{RF^2} \times \sigma^4} \quad (16)$$

$$\mathbf{h}_i^{eff}(\mathbf{g}_m, \mathbf{c}_n) = \text{mat}[\mathbf{g}_m] \mathbf{H}_i \mathbf{c}_n = \mathbf{G}_m \mathbf{H}_i \mathbf{c}_n \quad (19)$$

### 4.3 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘

최적의 성능을 가져다주는 아날로그 빔을 찾는 방법인 과도한 검색은 모든 가능한 경우에 대하여 고려해야 되기 때문에 복잡도가 너무 높아서 상당한 시간을 소요하게 된다. 따라서 과도한 검색은 아날로그 빔을 결정하는데 소요되는 시간이 오래 걸리므로 전체 프레임의 길이가 정해져 있는 경우 실제 데이터를 전송할 수 있는 시간이 줄어든다. 그러므로 실제 시스템에 적용하는데 있어서 어려움이 있다. 본 절에서는 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘에 대해서 설명한다. 제안하는 아날로그 빔 선택 알고리즘은 AP의 아날로그 빔을 하나씩 바꾸어 가면서 총 전송률을 비교하여 총 전송률이 가장 큰 경우에 해당하는 AP의 아날로그 빔과 각 사용자의 아날로그 빔을 선택하는 방식이다. 그림 3은 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘의 자세한 작동 과정을 도시화 한 것이다.

제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘에서 AP의 각 아날로그 빔에 대한 총 전송률을 얻기 위해서 AP의 아날로그 빔이 정해져 있는 경우  $K$ 명 사용자들의 아날로그 빔들을 선택하는 방법에 대해서 설명하겠다. 먼저 AP는  $N_{BS}^{BSS}$  개의 아날로그 빔들 중에서 첫 번째 벡터를 아날로그 빔으로 선택한다. 그러면 각 사용자는  $N_{user}^{BSS}$  개의 아날로그 빔들 중에서 하나를 선택하게 되므로 총  $K \times N_{user}^{BSS}$  개의 가능한 유효 채널이 존재하게 된다. 먼저  $K \times N_{user}^{BSS}$  개의 유효 채널들 중에서 가장 큰 유효 채널 이득 값을 가지는 사용자와 그에 해당하는 아날로그 빔을 그 사용자의 아날로그 빔으로 선택하게 된다. 그 다음으로 아날로그 빔을 선택하지 못한  $K-1$  명의 사용자들에 해당하는  $(K-1) \times N_{user}^{BSS}$  개의 유효 채널들 중에서 첫 번째로 아날로그 빔을 선택한 사용자의 유효 채널과의 매트릭  $f(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 의 값이 가장 큰 값을 가지는 사용자와 그에 대응하는 아날로그 빔을 선택하게 된다. 그리고 같은 방식으로  $K-2$  명의 사용자들에 해당하는  $(K-2) \times N_{user}^{BSS}$  개의 유효 채널들 중에서 앞서 선택된 두 명의 사용자의 유효 채널로 이루어진 가중치 유효 채널  $\bar{\mathbf{h}}$  와의 매트릭  $f(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 의 값을 계산하여 가장 큰 값을 가지는 사용자와 그에 대응하는 아날로그 빔을 선택하게 된다. 이러한 방식으로 모든 사용자

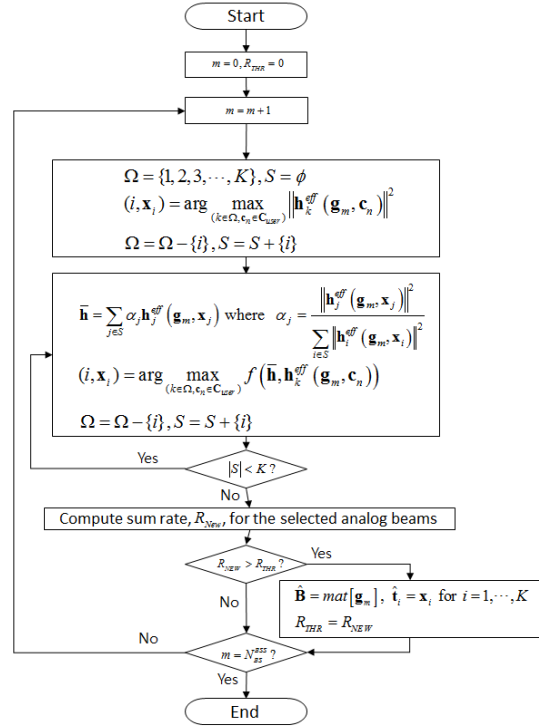


그림 3. 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘  
Fig. 3. Proposed low complexity analog beam selection algorithm

가 아날로그 빔을 선택할 때까지 수행하게 된다. 모든 사용자가 아날로그 빔을 선택하게 되면 총 전송률을 계산한다.

이러한 방식으로 총  $N_{BS}^{BSS}$  개의 총 전송률이 나오게 되는데 그 중에서 가장 큰 값을 가지는 경우에 해당하는 아날로그 빔들을 AP와 사용자들의 아날로그 빔으로 정하게 된다.

### 4.4 복잡도 분석

본 절에서는 최적의 방법인 과도한 검색 방법과 제안하는 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘의 복잡도를 비교한다. 복잡도는 플립플랍의 개수로 측정이 되며 실수 더하기와 실수 곱하기는 하나의 플립플랍으로 셈을 한다. 수학적인 편의를 위해서 AP와 사용자들의 아날로그 빔이 정해져 있을 때 총 전송률을 계산하는 복잡도를  $\alpha$ 로 가중치 유효 채널  $\bar{\mathbf{h}}$  와의 매트릭  $f(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 를 계산하는 복잡도를  $\beta$ 로 설정한다.

먼저 AP의 아날로그 빔이 정해졌을 때 모든 사용자들의 아날로그 빔을 선택하고 총 전송률을 계산하는 복잡도를 계산해보도록 하겠다. 유효 채널의 벡터

움을 계산하는데  $4 \times N_s$  개의 플립플랍이 필요하다. 따라서  $K \times N_{user}^{BSS}$  개의 유효 채널들 중에서 가장 큰 유효 채널 이득 값을 가지는 사용자와 그에 해당하는 아날로그 빔을 그 사용자의 아날로그 빔으로 선택하는데  $4 \times N_s \times K \times N_{user}^{BSS}$  의 복잡도가 필요하다. 나머지  $K - 1$  명의 사용자들에 해당하는 아날로그 빔은 가중치 유효 채널  $\bar{\mathbf{h}}$  와의 매트릭  $f(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  를 이용해서 구하므로 복잡도는 식 (20)와 같다. 모든 사용자들의 아날로그 빔이 정해지면 시스템의 총 전송률을 계산하게 된다. 따라서 AP의 아날로그 빔이 정해 있는 경우의 모든 사용자들의 아날로그 빔을 정하고 총 전송률을 계산하는데 필요한 복잡도는 식 (21)과 같이 표현할 수 있다.

AP는 미리 정해진  $N_{BS}^{BSS}$  개의 아날로그 빔 중에서 하나를 선택하게 되므로  $N_{BS}^{BSS}$  개의 총 전송률이 나오게 되는데 그 중에서 가장 큰 값을 가지는 경우에 해당하는 아날로그 빔들을 AP와 사용자들의 아날로그 빔으로 선택하게 된다. 따라서 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘의 총 복잡도는 식 (22)과 같다.

최적의 방법인 과도한 검색 방법은 총  $N_{BS}^{BSS} \times N_{user}^{BSS^K}$  개의 가능한 경우에 대하여 총 전송률을 모두 계산해야 되기 때문에 복잡도는 다음과 같다.

$$N_{BS}^{BSS} \times N_{user}^{BSS^K} \times \alpha \quad (23)$$

$\alpha$  의 값이  $\beta$  의 값 보다 큰 것은 자명한 사실이므로 식 (22)과 식 (23)를 통해서 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘이 최적의 방법인 과도한 검색 방법에 비해서 훨씬 복잡도가 적은 것을 확인할 수 있다.

### V. 모의 실험 결과

본 장에서는 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택

알고리즘의 우수성을 입증하기 위해 최적의 방법인 과도한 검색 방법과 랜덤 아날로그 선택 방법과의 성능 차이를 모의 실험 결과를 통하여 확인한다. 획득한 채널 정보를 통해서 아날로그 빔을 정한 뒤 데이터를 보낼 때의 총 전송률으로 성능으로 비교하였다. AP는 4명의 사용자를 지원하기 위해서 4개의 RF 체인을 가지고 있고 각 RF 체인이 6개의 안테나를 가지고 있어서 총 24개의 안테나가 있으며 각 사용자는 2개의 안테나를 가지고 있는 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템을 고려한다. 사용자와 AP 사이의 채널 행렬의 각 원소는 평균이 0이고 단위 분산을 가지는 독립적이고 동일한 분포의 복소 가우시안 랜덤 변수이다. 또한 채널 상태가 채널 정보를 얻고 데이터를 전송하는 기간 동안 거의 변하지 않는 블록 페이딩 채널을 가정한다.

그림 4는 각 사용자가 6개의 미리 정해진 아날로그 빔을 가지고 있을 때 AP에서의 미리 정해진 아날로그 빔의 수에 따른 복잡도를 Matlab에서 알고리즘이 동

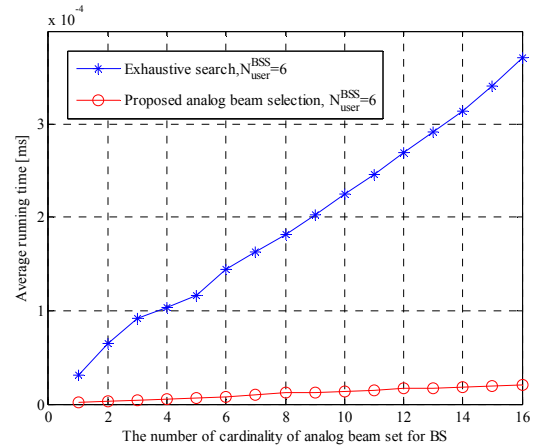


그림 4.  $N_{user}^{BSS} = 6$ 인 경우 AP에서 미리 정해진 아날로그 빔의 수에 따른 복잡도  
Fig. 4. Complexity according to the number of cardinality of analog beam set for AP when  $N_{user}^{BSS} = 6$

$$(K - 1) \times N_{user}^{BSS} \times \beta + (K - 2) \times N_{user}^{BSS} \times \beta + \dots + N_{user}^{BSS} \times \beta = \frac{(K - 1)K}{2} \times N_{user}^{BSS} \times \beta \quad (20)$$

$$4 \times N_s \times K \times N_{user}^{BSS} + \frac{(K - 1)K}{2} \times N_{user}^{BSS} \times \beta + \alpha \quad (21)$$

$$N_{BS}^{BSS} \times \left( 4 \times N_s \times K \times N_{user}^{BSS} + \frac{(K - 1)K}{2} \times N_{user}^{BSS} \times \beta + \alpha \right) \quad (22)$$



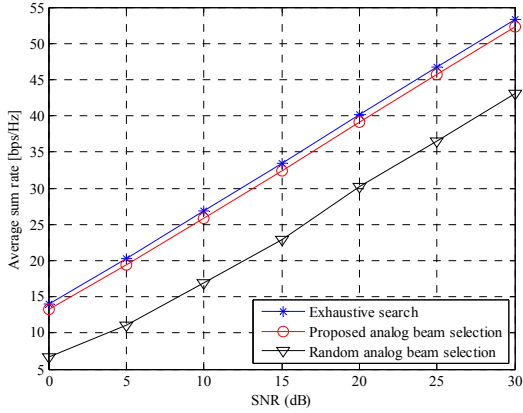


그림 5. 신호 대 간섭 잡음비에 따른 총 전송률  
Fig. 5. Sum rate performance according to signal to noise ratio

작하는 시간을 측정해 보여준다. 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘에 과도한 검색에 비해서 복잡도 훨씬 작은 것은 물론이고 AP에서의 미리 정해진 아날로그 빔의 수에 따른 복잡도가 천천히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 각 사용자는 6개의 미리 정해진 아날로그 빔을 AP는 16개의 미리 정해진 아날로그 빔을 가지고 있는 경우에 신호 대 간섭 잡음비 ( $P/\sigma^2$ )에 따른 평균 총 전송률을 도시화하였다. 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘이 랜덤 아날로그 선택 방법에 비해서 총 전송률이 많이 향상된다. 따라서 그림 4와 5를 통해서 최적의 방법인 과도한 검색 방법에 비해서 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘은 적은 복잡도라도 총 전송률 성능의 열차가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

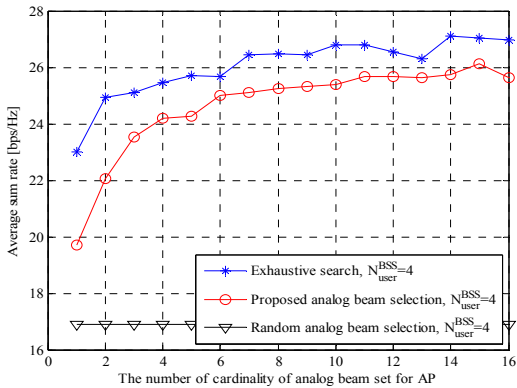


그림 6.  $N_{user}^{BSS} = 4$ 인 경우 AP에서의 미리 정해진 아날로그 빔의 수에 따른 총 전송률  
Fig. 6. Sum rate performance according to the number of cardinality of analog beam set for AP when  $N_{user}^{BSS} = 4$

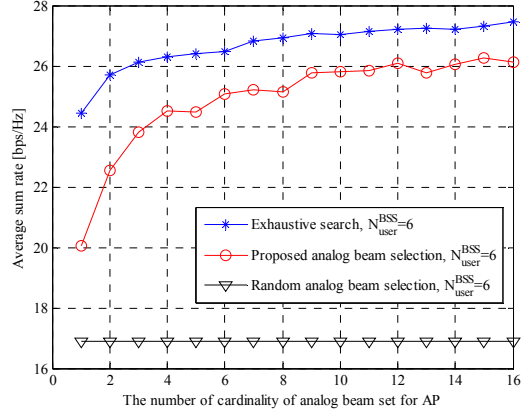


그림 7.  $N_{user}^{BSS} = 6$ 인 경우 AP에서의 미리 정해진 아날로그 빔의 수에 따른 총 전송률  
Fig. 7. Sum rate performance according to the number of cardinality of analog beam set for AP when  $N_{user}^{BSS} = 6$

그림 6과 7은 신호 대 간섭 잡음비가 10dB일 때 AP에서의 미리 정해진 아날로그 빔의 수에 따른 평균 총 전송률을 도시화하였다. 그림 6과 7을 보면 AP의 아날로그 빔 집합의 개수가 같을 때 사용자의 아날로그 빔이 증가해도 총 전송률이 거의 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 아날로그 빔 집합의 개수가 증가할수록 총 전송률이 증가하는 것을 알 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 상향링크 다중사용자 하이브리드 빔포밍 시스템에 적합한 채널 추정 방법과 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘을 제안하였다. 두 명의 사용자가 존재하는 상향링크 다중 사용자 하이브리드 빔포밍 시스템의 총 전송률을 분석한 결과를 이용하여 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘을 설계하였다. 그리고 최적의 아날로그 빔 선택 방법과 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘의 복잡도를 분석하였다. 모의 실험 결과를 통하여 동일한 조건 하에서 제안된 저복잡도 아날로그 빔 선택 알고리즘이 최적의 아날로그 빔 선택에 비해서 성능 차이가 거의 없는 것을 확인한다.

## References

[1] E. Perahia and R. Stacey, *Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac*. 2<sup>nd</sup> Ed., Cambridge: Cambridge University Press,

2013.

[2] CISCO, 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi, *CISCO Technical White Paper*, Aug. 2012.

[3] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 4: *Enhancement for Very High Throughput for Operations in Bands below 6 GHz*, IEEE P802.11ac/D3.0, Jun. 2012.

[4] IEEE 802.11-14/0649r0: *P802.11ax task group press release*, 2014.

[5] D.-J. Deng, K.-C. Chen, and R.-S. Cheng, "IEEE 802.11ax: Next generation wireless local area networks," *10th Int. Conf. Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QShine)*, pp. 77-82, Aug. 2014.

[6] IEEE 802.11-13/1046r1, *Discussion on massive MIMO for HEW*

[7] IEEE 802.11-10/1440r0, *Practical massive-MIMO*

[8] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.

[9] F. Gholam, J. Via, and I. Santamara, "Beamforming design for simplified analog antenna combining architectures," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 5, Jun. 2011.

[10] S. Hur, T. Kim, D. J. Love, J. V. Krogmeier, T. A. Thomas, and A. Ghosh, "Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 10, Oct. 2013.

[11] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.

[12] X. Huang, Y. J. Guo, and J. Bunton, "A hybrid adaptive antenna array," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 5, pp. 1770-1779, May 2010.

[13] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, "Spatially sparse

precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, Jan. 2014.

[14] T. Kim, J. Park, J.-Y. Seol, S. Jeong, J. Cho, and W. Roh, "Tens of Gbps support with mmWave beamforming systems for next generation communications," *IEEE GLOBECOM*, pp. 3685-3690, Atlanta, GA, Dec. 2013

김 명 진 (Myeong-Jin Kim)



2010년 2월 : 고려대학교 전기  
전자전파공학부 학사  
2010년 2월~현재 : 고려대학교  
전자전파공학과 석박사 통학  
과정  
<관심분야> 전자공학, 통신공학

고 영 채 (Young-Chai Ko)



1999년 5월 : University of  
Minnesota, 전기공학 석사  
2001년 10월 : University of  
Minnesota, 전기공학 박사  
2001년 3월~2004년 2월 :  
Texas Instruments Inc.,  
San Diego, CA USA  
2004년 2월~현재 : 고려대학교  
전기전자공학부 정교수

<관심분야> 무선통신