

이중 편파 다중 안테나를 이용한 다중 사용자 전송

신창용*, 박윤옥*

Multi-User Transmission Exploiting Multiple Dual-Polarized Antennas

Changyong Shin*, Youn Ok Park*

요약

본 논문은 가시선 (line-of-sight) 성분이 지배적인 채널 환경에서 다중 사용자로의 정보 전송을 위해 이중 편파를 이용하는 다중 안테나 시스템을 제안한다. 이 시스템은 공간 및 편파 자원을 효율적으로 활용하여 기존의 단일 편파 안테나를 이용하는 MU-MIMO (multi-user multiple input multiple output) 시스템 보다 향상된 총 전송률을 제공할 수 있음을 보인다.

Key Words : dual-polarized antenna, sum rate, multi-user transmission, degree-of-freedom, MIMO

ABSTRACT

In this paper, we propose a multiple dual-polarized antenna system for multi-user transmission in line-of-sight (LoS) dominant channel environments. By exploiting space and polarization resources efficiently, the proposed system achieves a higher sum rate than the existing multi-user multiple input multiple output (MU-MIMO) system with uni-polarized antennas.

I. 서론

편파는 정보 전송을 위해 추가적으로 이용 가능한 무선 자원을 제공한다. 따라서 가시선 (line-of-sight) 채널 환경에서 전송 용량 증대를 위해, 동일한 주파수

의 편파 자원을 분할하여 다수의 사용자 정보를 전송하는 방식에 대한 관심이 증가하고 있다^[1].

그러나 가시선 채널 환경에서 동시에 3명 이상의 사용자에게 정보를 전송할 때, 편파를 이용하는 다중 안테나 시스템을 채용하더라도 큰 성능 열화가 발생한다^[2]. 한편 실제의 가시선 채널 환경은 일반적으로 가시선 채널 성분이 월등히 크나 미약한 비가시선 (non-line-of-sight) 채널 성분 또한 포함하고 있다.

본 논문에서는 가시선 성분이 지배적인 채널 환경에서 이중 편파를 이용하는 다중 안테나를 채용하여 3명 이상의 사용자에게 성능 열화 없이 정보를 전송하는 방식을 제시한다. 또한 모의실험을 통해 이 기법이 공간 및 편파 자원을 효율적으로 활용하여 시스템 전송률을 크게 향상할 수 있음을 보인다.

II. 이중 편파 다중 안테나 시스템

본 논문에서는 그림 1에 주어진 이중 편파 다중 안테나 시스템을 고려한다. 송신기는 N개의 이중 편파 안테나를 갖고 있으며 각 송신 안테나는 직교하는 편파를 이용하여 정보를 전송한다. 각 수신기는 하나의 이중 편파 안테나를 이용하여 직교하는 편파 신호를 수신한다. n번째 송신 안테나의 전송 신호를 $\mathbf{x}_n = (x_n^{(v)} \ x_n^{(h)})^T$, n번째 송신 안테나로부터 m번째 수신기 안테나로의 채널 행렬을 \mathbf{H}_{mn} 로 표시하면 m번째 수신기의 수신 신호 $\mathbf{y}_m = (y_m^{(v)} \ y_m^{(h)})^T$ 는

$$\mathbf{y}_m = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_{mn} \mathbf{x}_n + \mathbf{z}_m \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다. \mathbf{z}_m 는 m번째 수신기에서의 백색 가우시안 잡음 벡터이다. 이 시스템의 n번째 송신 안테나는 수직 및 수평 편파를 이용하여 (2n-1)번째 및 2n번째 수신기로 각각 하나의 데이터 스트림을 전송하는 것으로 간주한다. 또한 가시선 성분이 지배적인 채널 환경을 모델링하기 위해, \mathbf{H}_{mn} 는 큰 값의 K 인자를 갖는 라이시안 채널 모델을 따르는 것으로 가정한다. 이 채널 모델에서 그림 1에 주어진 송신 및

* 본 연구는 미래창조과학부의 정부출연연구사업 (14Z11100, 트래픽 용량 증대를 위한 액세스 네트워크 원천기술 연구)의 일환으로 수행되었습니다.

•* First and Corresponding Author : Sun Moon University Department of Information and Communications Engineering, cyshin@sunmoon.ac.kr, 정희원

* Electronics and Telecommunications Research Institute, parkyo@etri.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2014-11-458, Received November 12, 2014; Revised November 27, 2014; Accepted November 27, 2014

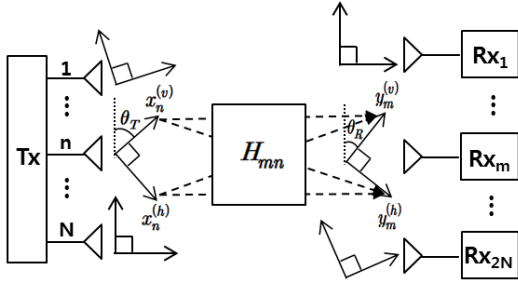


그림 1. 다중 사용자 전송을 위한 이중 편파 다중 안테나 시스템

Fig. 1. Multiple dual-polarized antenna system for multi-user transmission

수신 안테나 간 편파 각도를 고려하면 H_{mn} 의 가시선 성분인 \tilde{H}_{mn} 는 다음과 같이 주어진다³⁾. 식 (2)에서 d_{mn} 은 n 번째 송신 안테나와 m 번째 수신기 안테나 사이의 거리이고 λ 는 반송파의 파장을 나타낸다.

$$\tilde{H}_{mn} = e^{-j2\pi d_{mn}/\lambda} \begin{pmatrix} \cos(\theta_T - \theta_R) & -\sin(\theta_T - \theta_R) \\ \sin(\theta_T - \theta_R) & \cos(\theta_T - \theta_R) \end{pmatrix} \quad (2)$$

한편 H_{mn} 의 비가시선 성분인 \tilde{H}_{mn} 인 경우, 편파의 각도, 반사 및 산란 특성⁴⁾ 등을 반영하여 채널 간 상관관계 $E\{\text{vec}(\tilde{H}_{mn}) \text{vec}(\tilde{H}_{mn})^H\} = \mathbf{R}$ 을 다음과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_0 & -\rho \mathbf{I}_{\pi/2} \\ \rho \mathbf{I}_{\pi/2} & \mathbf{I}_0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{I}_\phi = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (3)$$

ρ 는 $0 \leq \rho \leq 1$ 을 만족하는 상수이다.

III. 이중 편파 안테나 기반 다중 사용자 전송 방식

단일 편파를 이용하는 기존 MU-MIMO (multi-user multiple input multiple output) 시스템과 달리, 그림 1의 이중 편파 다중 안테나 시스템은 공간 자원과 편파 자원을 동시에 활용함으로써 N 개의 송신 안테나를 사용하여 $2N$ 명의 사용자에게 동시에 정보를 전송할 수 있다. 이 방식에서 송신기는 $2N$ 개의 수신기로부터 피드백 된 편파 채널 정보를 기반으로 프리코더를 설계하여 이것을 통해 정보를 전송함으로써 각 수신기가 간섭 없이 자신의 정보를 수신할 수 있게 된다. 또한 각 수신기는 수신 안테나의 각 편파를 통해 수신된 신호에 최대비 결합 방식을 적용하여 수신

신호 전력을 최대화 한다. 따라서 송신기와 m 번째 수신기가 결정해야하는 것은 각각 $2N \times 2N$ 프리코더 행렬 \mathbf{V} 와 2×1 수신 신호 콤바이너 열벡터 \mathbf{w}_m 이다. 임의의 N 개의 송신 안테나를 이용할 때 송신기 프리코더와 수신기 신호 콤바이너가 다음의 반복 수행 알고리즘을 통해 구해질 수 있다.

1 단계: 반복 회수 i 을 0으로 설정하고 초기 프리코더 $\mathbf{V}^{(0)}$ 에 임의의 행렬 \mathbf{V}_0 을 할당하여 초기 수신 신호 콤바이너 $\mathbf{w}_m^{(0)}$ 을 다음과 같이 구한다.

$$\mathbf{w}_m^{(0)} = \frac{(\mathbb{H}_m \mathbf{v}_m^{(0)})^*}{\|\mathbb{H}_m \mathbf{v}_m^{(0)}\|_2}, \quad \mathbb{H}_m = (\mathbf{H}_{m1} \mathbf{H}_{m2} \cdots \mathbf{H}_{mN}) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{v}_m^{(i)}$ 는 i 번째 프리코더 행렬 $\mathbf{V}^{(i)}$ 의 m 번째 열을, $(\)^*$ 는 공액 복소수를 각각 의미한다.

2 단계: 다음과 같이 합성 채널을 구한다.

$$\tilde{\mathbb{H}}^{(i)} = (\mathbb{H}_1^T (\mathbf{w}_1^{(i)})^* \mathbb{H}_2^T (\mathbf{w}_2^{(i)})^* \cdots \mathbb{H}_{2N}^T (\mathbf{w}_{2N}^{(i)})^*)^T \quad (5)$$

3 단계: 제로포싱 (zero-forcing) 빔형성 혹은 최소 자승평균오차 빔형성 기법 등을 이용하여 $(i+1)$ 번째 프리코더를 구한다. 예를 들면, 제로포싱 빔형성 기법을 적용하는 경우 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{V}^{(i+1)} = (\tilde{\mathbb{H}}^{(i)})^{-1} \quad (6)$$

4 단계: 최대비 결합 방식에 따라 다음과 같이 $(i+1)$ 번째 수신 신호 콤바이너를 구한다.

$$\mathbf{w}_m^{(i+1)} = \frac{(\mathbb{H}_m \mathbf{v}_m^{(i+1)})^*}{\|\mathbb{H}_m \mathbf{v}_m^{(i+1)}\|_2} \quad (7)$$

5 단계: 반복 회수 i 가 사전에 설정한 회수를 초과하거나 $\|\mathbf{w}_m^{(i+1)} - \mathbf{w}_m^{(i)}\|_2 < \epsilon$ 이면 알고리즘을 종료하고 그렇지 않으면 반복 회수 i 을 1만큼 증가시켜 상기의 2 단계로 되돌아가서 실행을 반복한다.

이 알고리즘은 송신기에서 수행되어 송신기의 프리코더를 결정한다. 반면에 수신기에서는 이 알고리즘을 수행할 필요 없이, 송신기에서 결정된 프리코더를 통

해 전송된 파일럿 신호를 기반으로 채널 정보를 획득하여 신호 컴바이너를 바로 구할 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과

그림 2에서는 가시선 성분이 지배적인 환경을 반영하기 위해 라이시안 채널모델의 K 인자 값으로 10을 사용하여, N=2일 때 기존 단일 편파를 이용하는 MU-MIMO 시스템 (Uni-Pol. (N=2))과 제안 시스템 (Dual-Pol. (N=2)), 그리고 N=4일 때의 기존 단일 편파를 이용하는 MU-MIMO 시스템 (Uni-Pol. (N=4)) 간의 총 전송률 성능이 비교된다. 모든 비교 시스템에서 각 수신기는 완벽하게 채널을 획득하여 송신기로 피드백한다고 가정하고 초기 프리코더 값으로 단위행렬을 할당하여 제로포싱 빔형성 방식으로 프로코더를 생성한다. 이 때 제안 알고리즘의 반복회수는 20회를 적용한다. Dual-Pol. 시스템의 송신 안테나 각도 θ_T 와 수신 안테나 각도 θ_R 은 랜덤하게 생성한 값을 이용하고, 채널 상관관계 식 (3)에서 ρ 값으로 0, 0.5, 1을 적용하며 기지국의 송신 안테나 간 간격 및 수신기 간 간격이 충분히 확보되어 있어 $k \neq m$ 혹은 $l \neq n$ 일 때 $E\{\text{vec}(\tilde{\mathbf{H}}_{kl})\text{vec}(\tilde{\mathbf{H}}_{mm})^H\} = \mathbf{0}$ 인 것으로 가정한다. 반면에 고려된 모든 Uni-Pol. 시스템인 경우, 비가시선 채널 성분 간 상관관계는 없다고 가정한다. 또한 Uni-Pol. (N=4) 시스템에서 각 수신기는 두 개의 단일 편파 안테나를 채용하여 최대비 결합 방식을 통해 수신 신호 전력을 최대화한다.

제안 시스템과 Uni-Pol. (N=2) 시스템을 비교하면, 제안 시스템의 채널 추정 및 피드백량은 증가하나 높

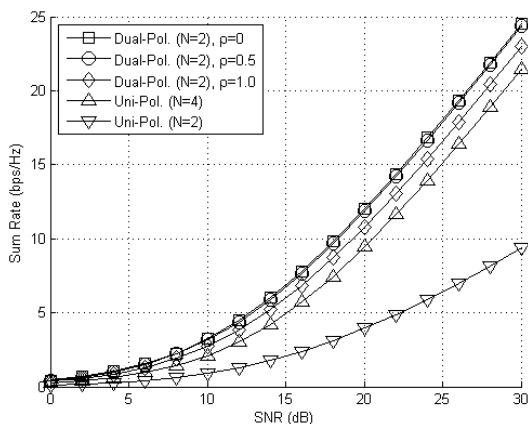


그림 2. SNR에 따른 총 전송률 성능 비교
Fig. 2. Comparison of sum rates according to SNR

은 SNR (signal-to-noise ratio) 영역에서 4의 DoF (degree-of-freedom)을 획득하여 Uni-Pol. (N=2) 시스템 대비 2배 향상된 DoF 성능을 달성함을 그림 2로부터 알 수 있다. 이것은 제안 시스템이 성능 열화 없이 4명의 사용자를 동시에 지원할 수 있음을 의미한다. 뿐만 아니라 Uni-Pol. (N=4) 시스템 대비 제안 시스템은 절반 개수의 송신 안테나를 이용하여 높은 SNR 영역에서 동일한 DoF 성능을 달성함과 동시에 SNR 이득을 획득한다. 즉, $\rho=0.5$ 인 제안 시스템인 경우, Uni-Pol. (N=4) 시스템과 동일한 4의 DoF 성능을 유지하면서 이 시스템 대비 약 2.3 dB의 SNR 이득을 확보한다. 또한 제안 시스템은 채널 상관관계의 증가로 인한 성능 열화 또한 크지 않음을 관찰할 수 있다.

V. 결론

가시선 채널 성분이 지배적인 환경에서 제안한 이중 편파를 이용하는 다중 안테나 시스템이 기존 단일 편파를 이용하는 MU-MIMO 시스템 보다 높은 DoF 혹은 SNR 이득을 획득하여 총 전송률을 향상할 수 있음을 보였다. 또한 제안한 시스템은 동일한 DoF 성능을 달성하기 위해 기존 시스템보다 적은 수의 송신 안테나를 필요로 하므로 시스템 비용을 줄일 수 있다. 이것은 제안 시스템이 공간 및 편파 자원을 효율적으로 활용한다는 사실에서 기인한다.

References

- [1] B. Cao, Q.-Y. Zhang, and L. Jin, "Polarization division multiple access with polarization modulation for LOS wireless communications," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2011, no. 1, Article 77, Dec. 2011.
- [2] Y. Yang, D. H. Jeong, H.-S. Lim, Y. O. Park, and J. Kim, "Optimal antenna angles for data transmission systems using multiple linear polarized antennas," *J. KICS*, vol. 38A, no. 11, pp. 976-978, Nov. 2013.
- [3] S. Jaeckel, K. Borner, L. Thiele, and V. Jungnickel, "A geometric polarization rotation model for the 3-D spatial channel model," *IEEE Trans. Ant. Propaga.*, vol. 60, no. 12, pp. 5966-5977, Dec. 2012.
- [4] E. Hecht, *Optics*, 4th Ed., Pearson Education, 2014.