

비가시선 채널에서 이중 편파 안테나 시스템의 용량 증대

신창용*

¹선문대학교 기계ICT융합공학부

Capacity Improvement of Dual-Polarized Antenna Systems in Non-Line-of-Sight Channels

Changyong Shin*

¹School of Mechanical and ICT Convergence Engineering, Sun Moon University

요약 본 논문은 비가시선 채널 환경에서 이중 편파 안테나를 이용하여 두 명의 사용자에게 데이터를 전송하는 시스템의 전송 용량 향상 방안을 고려했다. 이것을 위해 이 시스템의 멀티캐스트 및 유니캐스트 평균 채널 용량의 상한 분석을 수행하여 평균 채널 용량을 최대화하는 복소 교차 편파 식별도의 조절 조건을 제안한다. 또한 최대 평균 채널 용량에 근접한 성능을 달성하면서 동시에 시스템 복잡도를 줄일 수 있는 복소 교차 편파 식별도 조절 조건 역시 제시한다. 마지막으로 시뮬레이션 기반 성능 검증을 통해 제안한 조절 조건을 이용하는 시스템이 현존하는 복소 교차 편파 식별도 조절 조건을 포함한 다양한 다른 조절 조건을 채용하는 시스템 보다 높은 주파수 이용 효율을 획득할 수 있음을 보인다.

Abstract In this paper, we consider the capacity improvement of systems exploiting dual-polarized antennas for two-user transmission. To this end, we analyze the upper bounds of ergodic capacities for multicast and unicast data services in the systems, and propose the condition for adjusting the complex cross-polarization discriminations (XPDs) to maximize the ergodic capacities. In addition, we present the adjustment condition of the complex XPDs that can achieve spectral efficiencies close to the maximum ergodic capacities with lower system complexity. Lastly simulation results demonstrate that the systems using the proposed conditions can obtain higher spectral efficiencies than the ones employing different adjustment conditions including the exiting adjustment condition.

Keywords : Dual-polarized antenna, Ergodic capacity, Non-line-of-sight, Polarization, Spectral efficiency

1. 서론

스마트폰, 태블릿 등의 보급을 통해 무선 인터넷 사용자가 급증하고 있다. 또한 무선 인터넷의 콘텐츠는 점점 다양화되고 고용량화 되고 있다. 이러한 추세는 더욱 가속화되어 향후 10년 이내에 현재의 무선통신 시스템이 제공할 수 있는 전송 용량 대비 수천 배 이상의 전송 용량이 필요할 것으로 전망된다. 따라서 이러한 미래의 무선 전송 용량에 대한 요구를 충족시키고자 밀리미터파

주파수 대역 이용 기술 [1,2], 펄스셀 등의 소형셀 운용 기술 [3,4], 간섭 제어를 통한 주파수 이용 효율 증진 기술 [5,6] 등이 활발히 연구되어 왔다.

한편 최근에는 신규 무선 자원을 발굴하여 주파수 이용 효율을 향상하는 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 중에서도 편파를 이용하여 동일 주파수상에서 다수 사용자의 무선 접속을 동시에 지원하는 편파다중접속 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [7-9]. [7]에서는 가시선 (line-of-sight) 채널 환경에서 세 명 이상 사용

본 논문은 미래창조과학부의 정부출연금사업 (15Z11110, 트래픽 용량 증대를 위한 액세스 네트워크 원천기술 연구)의 일환으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Changyong Shin(Sun Moon University)

Tel: +82-41-530-2387 email: cyshin@sunmoon.ac.kr

Received June 5, 2015

Revised July 9, 2015

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

자의 동시 무선 접속을 지원하기 위해 전자기파의 편파 상태를 이용하는 변조 기법과 다중 접속 방식을 제안하였다. 또한 [8]에서는 송신기 및 수신기가 두 개의 선형 편파 안테나를 이용하여 데이터를 송수신하는 경우 채널 용량 및 비트 오류율 측면에서 송신기 및 수신기에서의 편파 안테나 간의 최적 각도가 도출되었다. [9]에서는 비가시선 (non-line-of-sight) 채널 환경에서 이중 편파 안테나 (dual-polarized antenna)를 이용하여 두 명의 사용자를 동시에 지원하는 시스템을 고려하였다. 이 시스템은 각 수신기로부터 피드백 되는 복소 교차 편파 식별도 (complex cross-polarization discrimination) [9] 정보를 이용하여 채널 용량을 최대화하도록 송신 편파 안테나를 능동적으로 조절함으로써 전체 MIMO (multiple input multiple output) 채널 특성을 개선하여 전송한다. 이 방식은 기지국이 각 사용자에게 서로 다른 데이터를 동시에 전송하는 유니캐스트 (unicast) 서비스 환경만을 고려하고 제안된 복소 교차 편파 식별도 조절 조건 역시 채널 용량의 향상 보다는 수신 심볼 오류율의 감소에 적합한 것으로 여겨진다.

따라서 본 논문에서는 비가시선 채널 환경에서 이중 편파 안테나를 이용하여 두 명의 사용자에게 멀티캐스트 (multicast) 및 유니캐스트 데이터 서비스를 제공하는 시스템을 고려한다. 이 시스템 환경에서 멀티캐스트 및 유니캐스트 평균 채널 용량 (ergodic capacity)의 상한 (upper bound) 분석을 통해 각 서비스별 평균 채널 용량을 최대화하는 복소 교차 편파 식별도 조절 조건을 도출한다. 또한 최대 평균 채널 용량에 근접하면서 동시에 시스템 복잡도를 줄일 수 있는 복소 교차 편파 식별도 조절 조건도 제안한다. 마지막으로 수치 시뮬레이션을 통해 제안한 조절 조건의 타당성을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 본 연구에서 고려하는 시스템 모델을 설명한다. 제 3절에서는 이 시스템 모델을 기반으로 멀티캐스트 및 유니캐스트 평균 채널 용량을 최대화하는 복소 교차 편파 식별도 조절 조건을 도출한다. 제 4절에서는 수치 시뮬레이션을 통해 제안한 조절 조건과 [9]의 조절 조건을 포함한 다양한 다른 조절 조건하에서 멀티캐스트 및 유니캐스트 평균 채널 용량 성능을 비교한다. 마지막으로 제 5절에서 본 논문을 결론 맺는다.

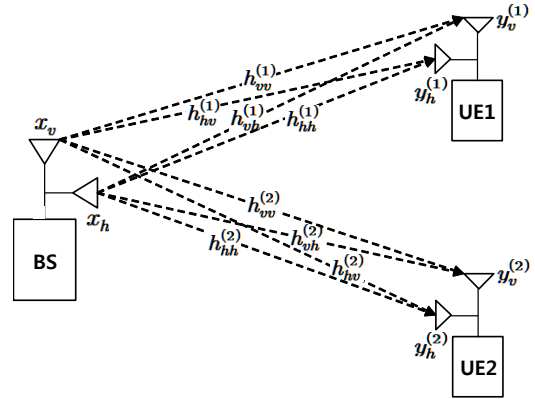


Fig. 1. Dual-polarized antenna system for two-user transmission

2. 이중 편파 안테나 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템 모델은 그림 1에 주어진다. 즉, 기지국 (BS)은 이중 편파 안테나를 이용하여 두 명의 사용자에게 동시에 데이터를 전송한다. 이 때 각 사용자도 이중 편파 안테나를 이용하여 전송된 신호를 수신한다. 그림 1에 주어진 바와 같이 기지국이 데이터 $(x_v \ x_h)^T$ 을 전송할 때, 첫 번째 사용자 (UE1)의 수신 신호 $(y_v^{(1)} \ y_h^{(1)})^T$ 와 두 번째 사용자 (UE2)의 수신 신호 $(y_v^{(2)} \ y_h^{(2)})^T$ 는

$$\begin{pmatrix} y_v^{(1)} \\ y_h^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{vv}^{(1)} & h_{vh}^{(1)} \\ h_{hv}^{(1)} & h_{hh}^{(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_v \\ x_h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_v^{(1)} \\ n_h^{(1)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} h_{vv}^{(1)} & w_v^{(1)} h_{hh}^{(1)} \\ w_h^{(1)} h_{vv}^{(1)} & h_{hh}^{(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_v \\ x_h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_v^{(1)} \\ n_h^{(1)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_v^{(2)} \\ y_h^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{vv}^{(2)} & h_{vh}^{(2)} \\ h_{hv}^{(2)} & h_{hh}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_v \\ x_h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_v^{(2)} \\ n_h^{(2)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{pmatrix} h_{vv}^{(2)} & w_v^{(2)} h_{hh}^{(2)} \\ w_h^{(2)} h_{vv}^{(2)} & h_{hh}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_v \\ x_h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_v^{(2)} \\ n_h^{(2)} \end{pmatrix}$$

로 각각 표현할 수 있다. 여기서 $()^T$ 는 전치 연산, $h_{vv}^{(m)}$ 는 기지국의 수직 편파 안테나와 m 번째 사용자의 수직 편파 안테나 사이의 채널을, $h_{vh}^{(m)}$ 는 기지국의 수평 편파 안테나와 m 번째 사용자의 수직 편파 안테나 사이의 채널을, $h_{hv}^{(m)}$ 는 기지국의 수직 편파 안테나와 m 번째 사용자의 수평 편파 안테나 사이의 채널을, $h_{hh}^{(m)}$ 는 기지

국의 수평 편파 안테나와 m 번째 사용자의 수평 편파 안테나 사이의 채널을 각각 의미한다. 또한 $n_v^{(m)}$ 와 $n_h^{(m)}$ 는 m 번째 사용자의 수평 편파 안테나와 수직 편파 안테나에서의 백색 가우시안 잡음을 각각 나타내고 복소 교차 편파 식별도 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 는 각각 $w_v^{(m)} = h_{vh}^{(m)}/h_{hh}^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)} = h_{hv}^{(m)}/h_{vv}^{(m)}$ 로 정의된다.

이 시스템은 비가시선 채널환경에서 동작하므로 $h_{vv}^{(m)}$ 와 $h_{hh}^{(m)}$ 는 레일리 (Rayleigh) 페이딩 채널 모델을 따르는 것으로 가정한다. 또한 기지국은 각 사용자로부터 피드백 되는 복소 교차 편파 식별도 정보를 이용하여 송신 편파 안테나를 조절하는 것이 가능하므로 $h_{vv}^{(m)}$ 및 $h_{hh}^{(m)}$ 의 값이 변할지라도 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 는 임의의 상수로 조절하여 일정하게 유지하는 것이 가능한 것으로 고려한다 [9].

3. 채널 용량 분석 및 증대

그림 1에 주어진 시스템으로부터 두 가지 데이터 서비스 시나리오를 고려할 수 있다. 첫 번째 서비스 시나리오 오는 기지국에서 송신되는 데이터 x_v 와 x_h 모두를 두 명의 사용자 모두가 동시에 수신하기를 원하는 멀티캐스트 데이터 서비스이다. 두 번째 서비스 시나리오는 각 사용자가 기지국으로부터 서로 다른 데이터를 동시에 수신하기를 원하는 유니캐스트 데이터 서비스이다. 이 경우 기지국은 첫 번째 사용자에게 데이터 x_v 를, 두 번째 사용자에게는 데이터 x_h 를 각각 동시에 전송하게 된다.

이 두 가지 서비스 시나리오에 대한 평균 채널 용량 분석을 수행하기 전에 관련 시스템 파라미터를 정의하면

$$H_m = \begin{pmatrix} h_{vv}^{(m)} & w_v^{(m)}h_{hh}^{(m)} \\ w_h^{(m)}h_{vv}^{(m)} & h_{hh}^{(m)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$E\{(x_v, x_h)^T(x_v^*, x_h^*)\} = \sigma_x^2 I_2 \quad (4)$$

$$E\{(n_v^{(m)}, n_h^{(m)})^T((n_v^{(m)})^*, (n_h^{(m)})^*)\} = \sigma_n^2 I_2 \quad (5)$$

$$E\{(n_v^{(1)}, n_h^{(1)})^T((n_v^{(2)})^*, (n_h^{(2)})^*)\} = 0_{2 \times 2} \quad (6)$$

$$E\{|h_{vv}^{(i)}|^2\} = \frac{\sigma_h^2}{1 + |w_h^{(i)}|^2} \quad (7)$$

$$E\{|h_{hh}^{(m)}|^2\} = \frac{\sigma_h^2}{1 + |w_v^{(m)}|^2} \quad (8)$$

$$E\{h_{vv}^{(m)}(h_{hh}^{(m)})^*\} = E\{h_{vv}^{(1)}(h_{vv}^{(2)})^*\} = E\{h_{hh}^{(1)}(h_{hh}^{(2)})^*\} = 0 \quad (9)$$

과 같다. 여기서 $E\{\}$ 와 $(\)^*$ 는 통계적 평균과 공액복소수를 각각 의미하고 $0_{2 \times 2}$ 와 I_2 는 2×2 영행렬과 단위행렬을 각각 나타내며 m 과 n 은 1과 2의 값을 가질 수 있다. 특히, 에너지 보존 법칙에 따라 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 의 값에 무관하게 개별 편파 송신 안테나로부터 송신된 신호에 대해 각 사용자의 동일 편파 (co-polarization) 수신 안테나와 교차 편파 (cross-polarization) 수신 안테나에서 수신된 신호 전력의 합은 일정하게 유지되어야 한다. 따라서 식 (7)과 (8)는 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 의 값에 상관없이 개별 편파 전송 신호에 대해 수신 신호 전력의 총합이 $\sigma_h^2 \sigma_x^2$ 로 동일하게 유지되도록 정규화 된다 [10,11]. 이것을 이용하여 각 서비스 시나리오에서의 평균 채널 용량을 분석하고 그 결과로부터 시스템 용량을 증대하기 위한 복소 교차 편파 식별도 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 의 조절 조건을 도출하면 다음과 같다.

3.1 멀티캐스트 용량 증대

멀티캐스트 서비스에서의 평균 채널 용량 \bar{C}_M 는

$$\begin{aligned} \bar{C}_M &= \min\{E\{\log_2 \det(I_2 + \rho H_1 H_1^H)\}, \\ &E\{\log_2 \det(I_2 + \rho H_2 H_2^H)\}\} \\ &\leq E\{\log_2 \det(I_2 + \rho H_m H_m^H)\} \end{aligned} \quad (10)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 $\min\{a, b\}$ 는 a 와 b 중 크지 않은 것을 의미하고 $\det(\)$ 와 $(\)^H$ 는 행렬식과 에르미트 (hermitian) 행렬을 각각 나타내며 $\rho = \sigma_x^2 / \sigma_n^2$ 로 정의된다. 또한 m 은 1 또는 2의 값을 가질 수 있다. Jensen의 부등식을 적용하고 $w_v^{(m)} = r_v^{(m)} e^{j\theta_v^{(m)}}$ 와 $w_h^{(m)} = r_h^{(m)} e^{j\theta_h^{(m)}}$ 로 치환하여 식 (10)의 \bar{C}_M 의 상한을 다시 정리하면

$$\begin{aligned} \bar{C}_M &\leq \log_2 E\{\det(I_2 + \rho H_m H_m^H)\} \\ &= \log_2 \{1 + 2\rho\sigma_h^2 + (\rho\sigma_h^2)^2 \alpha\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1 + (r_v^{(m)})^2 (r_h^{(m)})^2 - r_v^{(m)} r_h^{(m)} \cos(\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)})}{(1 + (r_v^{(m)})^2)(1 + (r_h^{(m)})^2)} \quad (12)$$

로 표현할 수 있다. 따라서 $w_v^{(m)} = r_v^{(m)} e^{j\theta_v^{(m)}}$ 와 $w_h^{(m)} = r_h^{(m)} e^{j\theta_h^{(m)}}$ 는 $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = (2k+1)\pi$, (k 은 정수)이고 $r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$ 을 만족하도록 조절될 때, 식 (11)에 주어진 \bar{C}_M 의 상한은 최대가 되고 이 때 \bar{C}_M 의 상한은

$$\bar{C}_M \leq 2\log_2(1 + \rho\sigma_h^2) \quad (13)$$

로 주어진다. 이것은 상호 간섭이 없는 두 개의 점대점 링크 (point-to-point link)의 총합 채널 용량과 같다.

3.2 유니캐스트 용량 증대

유니캐스트 서비스에서의 평균 채널 용량 \bar{C}_U 의 상한은

$$\bar{C}_U \leq E\{\log_2 \det(I_2 + \rho H_1^H H_1 + \rho H_2^H H_2)\} \quad (14)$$

로 표현할 수 있다. 식 (14)에 제논의 부등식을 적용하고 $w_v^{(m)} = r_v^{(m)} e^{j\theta_v^{(m)}}$ 와 $w_h^{(m)} = r_h^{(m)} e^{j\theta_h^{(m)}}$ 로 치환하여 \bar{C}_U 의 상한을 다시 정리하면

$$\begin{aligned} \bar{C}_U &\leq \log_2 E\{\det(I_2 + \rho H_1^H H_1 + \rho H_2^H H_2)\} \\ &= \log_2 \{1 + 4\rho\sigma_h^2 + (\rho\sigma_h^2)^2(4 - \beta^{(1)} - \beta^{(2)})\} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\beta^{(m)} = \frac{|r_v^{(m)} e^{j\theta_v^{(m)}} + r_h^{(m)} e^{-j\theta_h^{(m)}}|^2}{(1 + (r_v^{(m)})^2)(1 + (r_h^{(m)})^2)} \quad (16)$$

로 주어진다. 따라서 이것 역시 $w_v^{(m)} = r_v^{(m)} e^{j\theta_v^{(m)}}$ 와 $w_h^{(m)} = r_h^{(m)} e^{j\theta_h^{(m)}}$ 가 $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = (2k+1)\pi$ (k 은 정수)이고 $r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$ 을 만족하도록 조절될 때, 식 (15)에 주어진 \bar{C}_U 의 상한은 최대가 되고 이 때 \bar{C}_U 의 상한은

$$\bar{C}_U \leq 2\log_2(1 + 2\rho\sigma_h^2) \quad (17)$$

로 주어진다. 이것은 전송되는 두 개의 데이터 스트림 간에 상호 간섭이 없고 개별 데이터 스트림을 수신하는 링크는 두 개의 안테나를 이용하여 수신다이버시티 이득을 획득하는 두 개의 점대점 링크의 총합 채널 용량과 같다.

위의 결과로부터 유니캐스트 평균 채널 용량의 상한을 최대화하는 조건은 앞서 도출한 멀티캐스트 평균 채널 용량의 상한 최대화 조건과 동일함을 알 수 있다. 또한 다음절에서 보여지는 바와 같이 이러한 상한들은 해

당 평균 채널 용량과 동일한 성능 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 각 데이터 서비스의 상한을 최대화하는 조건에서 해당 서비스의 평균 채널 용량이 최대가 되리라 예상할 수 있다.

4. 성능 검증

이 절에서는 도출한 멀티캐스트 및 유니캐스트 평균 채널 용량 최대화 조건의 타당성을 검증하기 위해 다섯 가지의 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 조절 조건을 비교 평가한다. 이 다섯 가지 조건은 (i) $r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$ 과 $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$ 조건을 만족하도록 복소 교차 편파 식별도의 크기와 위상 모두를 조절하는 경우 ($r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$, $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$), (ii) $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$ 인 조건만 만족하도록 복소 교차 편파 식별도의 위상만 조절하는 경우 (Random $r_v^{(m)}$ & $r_h^{(m)}$, $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$), (iii) $r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$ 인 조건만 만족하도록 복소 교차 편파 식별도의 크기만 조절하는 경우 ($r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$, Random $\theta_v^{(m)}$ & $\theta_h^{(m)}$), (iv) 복소 교차 편파 식별도의 크기와 위상 모두를 조절하지 않는 경우 (Random $r_v^{(m)}$ & $r_h^{(m)}$, Random $\theta_v^{(m)}$ & $\theta_h^{(m)}$), (v) [9]에서 제안한 $r_v^{(m)} = r_h^{(m)} = 1$ 인 조건을 만족하도록 복소 교차 편파 식별도의 크기만 조절하는 경우 ($r_v^{(m)} = r_h^{(m)} = 1$, Random $\theta_v^{(m)}$ & $\theta_h^{(m)}$) 등이다.

이 실험에서 $h_{vv}^{(m)}$, $h_{hh}^{(m)}$, $w_v^{(m)}$, $w_h^{(m)}$ 모두는 서로 독립이며 평균이 0이고 분산이 1인 등방성 복소 가우시안 분포 (circularly symmetric complex Gaussian distribution)로부터 생성된다. 이와 같이 생성한 2000개의 채널 및 복소 교차 편파 식별도 샘플 값에 대해 각 조절 조건을 적용하여 채널 용량 구하고 이것의 평균치로부터 평균 채널 용량을 획득한다. 이 실험에서 이용된 SNR (signal-to-noise ratio)은 $\text{SNR} = \sigma_x^2 / \sigma_n^2$ 로 정의된다.

그림 2는 다섯 가지의 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 조절 조건에 따른 식 (11)의 멀티캐스트 평균 채널 용량 상한 성능을 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 3.1절에서 도출한 상한의 최대화 조건에 따라 복소 교차 편파 식별도의 크기와 위상 모두를 조절하는 경우 ($r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$,

$\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$)에 가장 우수한 평균 채널 용량 상한 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 또한 복소 교차 편파 식별도의 크기와 위상을 동시에 조절하기 어렵거나 이들 모두를 조절할 때 시스템 복잡도가 증가하는 경우, 복소 교차 편파 식별도의 위상만 상한 최대화 조건에 부합하도록 조절 (Random $r_v^{(m)}$ & $r_h^{(m)}$, $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$)함으로써 크기와 위상 모두를 최대화 조건에 맞게 조절한 경우에 근접한 성능을 달성할 수 있음을 알 수 있다. 반면에 [9]에서 제안한 방식에 따라 복소 교차 편파 식별도를 조절하는 경우 가장 열화된 상한 성능이 획득되었다.

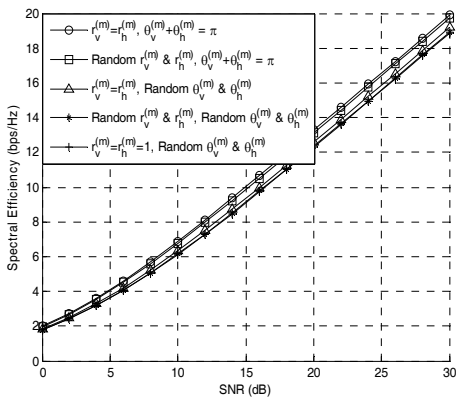


Fig. 2. Comparison of upper bounds in (11) for multicast ergodic capacities according to SNR

그림 3은 다섯 가지의 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 조절 조건에 따른 멀티캐스트 평균 채널 용량 성능을 나타낸다. 또한 멀티캐스트 상한 성능이 평균 채널 용량과 동일한 성능 경향을 나타냄을 보이고자 상한 최대화 조건을 만족할 때의 멀티캐스트 평균 채널 용량 상한 성능도 이 그림에 함께 주어진다. 예상한 바와 같이 이 그림은 그림 2와 동일한 성능 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 멀티캐스트 평균 채널 용량의 상한이 멀티캐스트 평균 채널 용량과 유사한 형태를 가지므로 상한에서 관측된 모든 현상이 평균 채널 용량에도 그대로 투영되어 나타남을 확인할 수 있다. 그러므로 상한의 최대화 조건에 따라 복소 교차 편파 식별도를 조절하는 경우에 가장 높은 평균 채널 용량을 달성할 수 있고 성능과 시스템 복잡도 모두를 고려할 때에는 복소 교차 편파 식별도의 위상만을 최대화 조건에 맞도록 조절함으로써 평균 채널 용량 측면에서 최적에 근접한 멀티캐스트 서비스를 제공하는 것이 가능함을 알 수 있다.

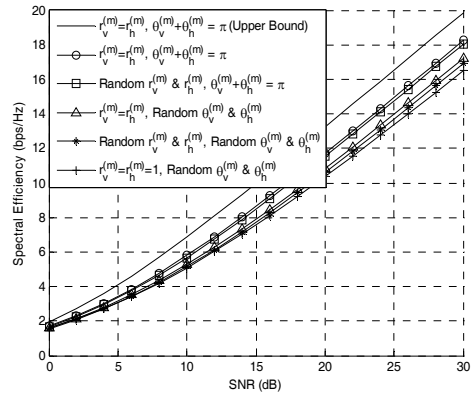


Fig. 3. Comparison of multicast ergodic capacities according to SNR

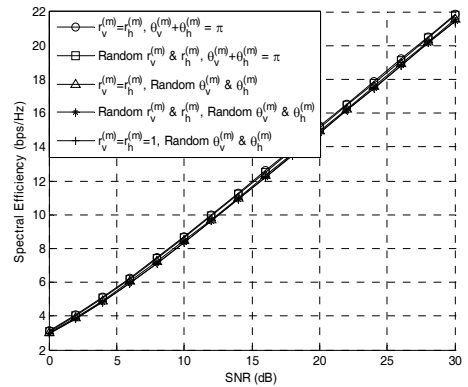


Fig. 4. Comparison of upper bounds in (15) for unicast ergodic capacities according to SNR

그림 4는 다섯 가지의 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 조절 조건에 따른 식 (15)의 유니캐스트 평균 채널 용량 상한 성능을 나타내고 그림 5는 그림 4의 19dB에서 20dB까지의 SNR에 대한 평균 채널 용량 상한 성능을 확대하여 나타낸다. 이 그림들에서 보는 바와 같이 멀티캐스트의 경우에 비해 조절 조건 간의 성능 차이는 작지만 3.2절에서 도출한 유니캐스트 평균 채널 용량의 상한 최대화 조건에 맞도록 복소 교차 편파 식별도를 조절하는 경우 ($r_v^{(m)} = r_h^{(m)}$, $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$) 가장 높은 평균 채널 용량 상한 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 복소 교차 편파 식별도의 크기는 조절하지 않고 위상만 상한 최대화 조건에 부합하도록 조절 (Random $r_v^{(m)}$ & $r_h^{(m)}$, $\theta_v^{(m)} + \theta_h^{(m)} = \pi$)함으로써 해당 식별도의 크기와 위상 모두를 최대화 조건에 맞게 조절한 경우에 근접한

성능을 달성할 수 있음을 알 수 있다. 여전히 [9]에서 제안한 방식에 따라 복소 교차 편파 식별도를 조절하는 경우 가장 열화된 성능이 획득된다.

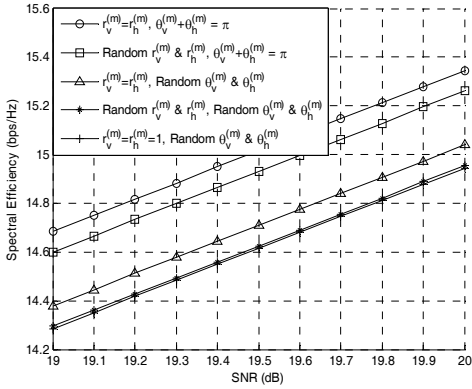


Fig. 5. Comparison of upper bounds in (15) for unicast ergodic capacities at the SNR range of 19dB to 20dB

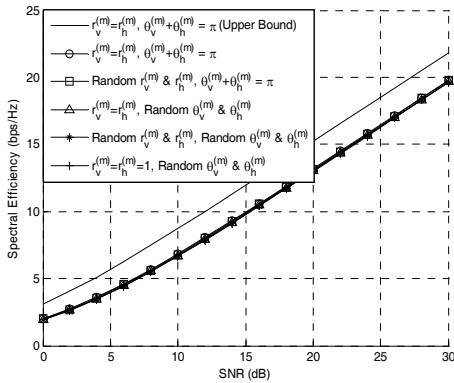


Fig. 6. Comparison of sum rates according to SNR when the MU-MIMO technique in [12] is used.

그림 6은 다섯 가지의 $w_v^{(m)}$ 와 $w_h^{(m)}$ 조절 조건에 따른 [12]의 MU-MIMO (multi-user multiple input multiple output) 기법에 의해 달성 가능한 평균 총합 전송률을 나타내고 그림 7은 그림 6의 19dB에서 20dB까지의 SNR에 대한 평균 총합 전송률을 확대하여 나타낸다. 또한 유니캐스트 상한 성능 역시 평균 총합 전송률과 동일한 성능 경향을 나타냄을 보이고자 상한 최대화 조건을 만족할 때의 상한 성능도 그림 6에 함께 주어진다.

그림 7의 확대된 성능 비교를 통해 그림 5와 동일한 성능 경향을 보임을 알 수 있으나 그림 6에서 보는 바와

같이 복소 교차 편파 식별도 조절 조건 간의 전체적 성능 차이는 미미함을 확인할 수 있다. [12]의 기법은 각 사용자로부터 피드백 된 채널 정보를 이용하여 두 명 사용자 간의 간섭을 완전히 제거할 수 있는 모든 가능한 송신 프리코더와 수신 컴바이너 후보들을 선정하고 이 후보들 중에서 두 명 사용자로의 총합 전송률을 최대화하는 송신 프리코더와 수신 컴바이너를 최종 결정하여 송수신 한다. 따라서 이러한 송신 프리코더 및 수신 컴바이너 결정 과정은 평균 채널 용량을 최대화하는 복소 교차 편파 식별도의 크기 및 위상 조절 메커니즘을 내재하고 있으므로 고려한 조절 조건 간의 성능 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다.

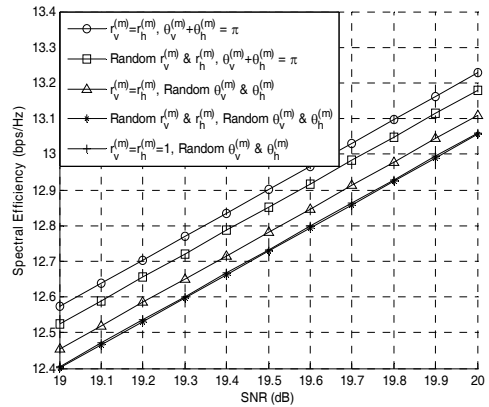


Fig. 7. Comparison of sum rates at the SNR range of 19dB to 20dB when the MU-MIMO technique in [12] is used.

5. 결론

본 논문에서는 비가시선 채널 환경에서 이중 편파 안테나를 이용하여 두 명의 사용자를 동시에 지원하는 시스템의 전송 용량 향상 방안을 제시하였다. 이것을 위해 이 시스템의 멀티캐스트 및 유니캐스트 평균 채널 용량의 상한 분석을 수행하여 평균 채널 용량이 최대가 되기 위한 복소 교차 편파 식별도의 조절 조건을 도출하였다. 이 최대화 조건은 멀티캐스트와 유니캐스트 데이터 서비스 모두에서 동일하였고, 복소 교차 편파 식별도 간 크기는 같게 유지하고 위상의 합은 π 의 홀수배가 되도록 지국의 이중 편파 안테나를 조절할 때, 멀티캐스트 및 유니캐스트 평균 채널 용량이 최대가 됨을 보였다. 또한 전송률과 시스템 복잡도 모두를 고려할 때, 복소 교차 편파

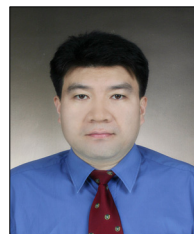
식별도 간의 위상 합만을 π 의 홀수배가 되도록 조절함으로써 전송률 측면에서 최적에 근접한 멀티캐스트 및 유니캐스트 서비스를 제공할 수 있음을 알 수 있었다. 마지막으로 향후 연구에서는 제안한 전송 용량 향상 방안을 가시선과 비가시선 채널 성분이 공존하는 환경에서 세 명 이상의 사용자를 동시에 지원하는 전송 시스템으로 확장할 것이다.

References

- [1] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, Jun. 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783993>
- [2] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>
- [3] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. T. Sukhavasi, C. Patel, and S. Geirhofer, "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 82-89, Feb. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736747>
- [4] A. J. Fehske, I. Viering, J. Voigt, C. Sartori, S. Redana, and G. P. Fettweis, "Small-cell self-organizing wireless networks," *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 334-350, Mar. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2014.2301595>
- [5] V. Cadambe and S. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K -user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2008.926344>
- [6] T. Gou, S. A. Jafar, C. Wang, S.-W. Jeon, and S.-Y. Chung, "Aligned interference neutralization and the degrees of freedom of the $2 \times 2 \times 2$ interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 7, pp. 4381-4395, Jul. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2012.2191388>
- [7] B. Cao, Q.-Y. Zhang, and L. Jin, "Polarization division multiple access with polarization modulation for LOS wireless communications," *EURASIP J. Wirel. Comm.*, vol. 2011, no. 1, Article:77, Dec. 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-1499-2011-77>
- [8] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7840/kics.2013.38a.11.976>
- [9] S.-C. Kwon and G. L. Stuber, "Polarization division multiple access on NLoS wide-band wireless fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 7, pp. 3726-3737, Jul. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2014.2314118>
- [10] M. Coldrey, "Modeling and capacity of polarized MIMO channels," *Proc. IEEE 67th Vehicular Technology Conf.-Spring*, pp. 440-444, May 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/vetecs.2008.103>
- [11] C. Oestges, B. Clerckx, M. Guillaud, and M. Debbah, "Dual-polarized wireless communications: from propagation models to system performance evaluation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 4019-4031, Oct. 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-WC.2008.070540>
- [12] C.-B. Chae and R. W. Heath, Jr., "On the optimality of linear multiuser MIMO beamforming for a two-user two-input multiple-output broadcast system," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 117-120, Feb. 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LSP.2008.2008937>

신 창 용(Changyong Shin)

[정회원]



- 2006년 12월 : Univ. of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2007년 4월 ~ 2013년 10월 : 삼성종합기술원 Future IT 연구소 전문연구원
- 2013년 11월 ~ 2014년 2월 : 삼성전자 Digital Media & Communications (DMC) 연구소 수석연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계ICT융합공학부 교수

<관심분야>

무선통신, 통신신호처리, 정보통신