

이중 편파 안테나의 편파 정렬에 의한 전송 용량 이득

Capacity Gain of Polarization Aligned Dual-Polarized Antenna Systems

왕 한 호[†] · 노 고 산*
(Hanho Wang · Gosan Noh)

Abstract - Capacity reflecting effects of quantized feedback information is evaluated through computer simulation for practical implementation of polarization angle estimation and compensation. In the dual-polarization antenna case, evaluated capacity values varies more than four times depending on accuracy of the polarization angle estimation and compensation. Using 6-bit the quantized feedback information, we can achieve 96.8 percentage of the capacity of the perfect feedback information case.

Key Words : Dual polarization antenna, Channel capacity

1. 서 론

현재 셀룰러 시스템은 5세대로 진화하는 과정에 있다[1]. 천 배의 무선 전송 용량을 달성하는 것을 화두로 셀의 서비스 커버리지(coverage)가 기존 매크로셀(macro cell)의 수십분의 일에 불과한 스몰셀(small cell) 기술과 기존 채널 대역폭의 수십 배의 주파수 자원을 활용할 수 있는 30~60Ghz 대역의 밀리미터웨이브(mmWave)기술이 심도 있게 연구되고 있다[2, 3]. 스몰셀 환경은 기지국과 단말 사이의 매우 짧은 거리로 인하여 가시선(line-of-sight, LOS) 채널이 형성될 기회를 기존 셀룰러 시스템 보다 많이 제공하게 된다. 밀리미터웨이브 통신 또한 매우 많은 수의 송신 안테나를 이용하여 예리한 빔성형(beamforming)을 구현할 수 있으므로 다중 경로 페이딩의 효과가 제거된 가시선 통신환경을 제공하게 된다.

가시선 통신 환경은 다중 경로 페이딩 환경 대비 통계적으로 높은 수신 신호 강도를 수신기에 제공하는 장점을 가지고 있다. 반면 다중 경로 페이딩 채널에서 복수의 데이터 스트림(stream)을 형성하는 다중안테나 다중화(MIMO multiplexing) 기술은 가시선 통신 환경에서 사용하기 어려우므로 가시선 통신 환경에 적합한 다중안테나 다중화 기술이 필요하며, 이중 편파 안테나(dual-polarized antenna)에 의하여 가시선 통신 환경에서도 다중안테나 다중화가 가능하다[4, 5].

이중 편파 안테나는 수평안테나와 수직안테나로 구성되어 직교하는 두 개의 다중화 채널을 형성한다[4-6]. 이 때 송신 안테나와 수신 안테나는 수평과 수직 정렬이 되어 있어야 하며, 정렬되어 있지 않은 경우 수평 수직 안테나 간 간섭이 발생하여 이중 편파 안테나의 성능이 떨어진다. 편파 안테나

간 간섭 문제는 이중 편파 안테나의 편파안테나 간 간섭 채널 모델로 연구되어 왔으며, 현재 Jones 벡터를 이용한 모델이 널리 사용되고 있다[7]. 이와 관련하여 편파 안테나 간 간섭이 발생하지 않도록 송신단에서 수신단의 편파 회전각을 추정하여 보상하여 전송하는 기술들이 연구되어 왔으나[6, 8, 9], 편파 회전각의 오차가 시스템 전송 용량에 미치는 영향이 정량적으로 평가되지 못하고 있다.

이에 본 논문에서는 다중 셀 환경에서 이중 편파 안테나의 정렬 상태에 따른 성능을 평가하며, 현실적인 조건을 반영한 양자화된 편파 회전각 보상에 따른 성능을 검증한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

이중 편파 안테나를 이용하여 데이터를 전송하는 셀룰러 시스템을 가정한다. 이중 편파 안테나에 의하여 다중화가 가능하기 위하여 가시선 채널 환경을 고려한다. 본 연구는 편파 회전각의 추정과 보상이 이루어지는 것에 의한 전송 용량 이득을 평가해 보는 것을 목적으로 하므로 편파 회전각 추정 및 보상은 완벽하다고 가정한다[8]. 이러한 가정에 대한 성능 비교군은 이중 편파 안테나의 회전각에 대한 추정과 보상이 이루어지지 않는 경우가 될 것이다.

$$H(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \\ -\sqrt{\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{pmatrix} \quad (1)$$

수식 (1)의 대각 성분은 송수신기의 수직과 수평 편파 안테나에 각각 대응되는 채널이다. 비대각 성분은 송수신기의 수직 수평 편파 안테나 간 간섭을 주는 채널이다. 편파 회전각을 보상해주면 θ 의 값이 0이 되고, 따라서 비대각 성분은 0이 된다. θ 값이 $\pi/2$ 일 때 편파 안테나 간 간섭량이 최대가 된다.

셀룰러 시스템에서 특정 단말과 통신하는 기지국은 단말의 편파 회전각을 추정하여 보상할 수 있겠으나, 나머지 기지국은 간섭원으로 위의 단말에 대한 편파 회전각을 보상하

[†] Corresponding Author : Dept. of Information & Communication Engineering, Sangmyung University, Korea
E-mail : hhwang@smu.ac.kr

* Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea

접수일자 : 2014년 12월 4일

최종완료 : 2015년 2월 16일

지 않으므로 단말의 이중 편파 안테나 각각에 임의의 간섭을 발생시킨다. 또한 특정 단말과 기지국 사이에도 편파 회전각에 대한 보상이 이루어지지 않는다면, 간섭 신호를 발생시키는 기지국 외에도 수식 (1)의 비대각 성분에 의한 간섭이 추가적으로 발생하게 된다.

2.2 편파 회전각 보상에 의한 전송 용량

이중 편파 안테나를 이용하여 데이터를 전송하는 셀룰러 시스템을 가정한다. 단말은 0번 기지국으로부터 데이터를 수신하고 있으며 주변에 간섭을 발생시키는 I 개의 기지국이 존재한다. 이 때 단말의 수신 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y = H(\theta_0)s_0 + \sum_{i=1}^I H(\theta_i)s_i + z \quad (2)$$

수식 (2)에서 $s_i = [s_{i,v}, s_{i,h}]^T$ 이고 i 는 기지국의 인덱스이며, v 와 h 는 각각 수직과 수평 편파 안테나로 전송된 신호를 의미한다. z 는 백색 가우시안 잡음이다. 0번 기지국의 인덱스를 생략하고, 신호 대 간섭 및 잡음 비(signal-to-interference-and-noise ratio, SINR)를 계산해 보면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$SINR_{v/h} = \frac{(1-\alpha)s_{v/h}^2}{\alpha \cdot s_{h/v}^2 + \sum_{i=1}^I [\alpha_i \cdot s_{i,v/h}^2 + (1-\alpha_i)s_{i,h/v}^2] + N_0} \quad (3)$$

이 때 편파 회전각에 대한 완벽한 추정과 보상이 이루어지면 수식 (3)의 SINR은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$SINR_{v/h}^A = \frac{s_{v/h}^2}{\sum_{i=1}^I [\alpha_i \cdot s_{i,v/h}^2 + (1-\alpha_i)s_{i,h/v}^2] + N_0} \quad (4)$$

이중 편파에 의하여 수직과 수평안테나에 두 개의 데이터 스트림이 전송될 수 있으며, 수식 (3)으로부터 이중 편파 안테나를 사용하는 송수신기 간 단위 주파수 자원에 대한 전송 용량은 각각 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$C = \sum_{j \in \{v,h\}} \log_2(1 + SINR_j) = 2\log_2(1 + SINR_v) \quad (5)$$

수식 (5)에서 덧셈 연산 기호가 수직 편파 전송 용량의 두 배로 바뀐 것은 수식 (1)에서 편파 안테나 간 상호 간섭량이 대칭으로 동일하기 때문이다. 수식 (4)에 대하여 동일한 방법으로 전송 용량을 계산해 보면 다음과 같다.

$$C^A = \sum_{j \in \{v,h\}} \log_2(1 + SINR_j^A) = 2 \cdot \log_2(1 + SINR_v^A) \quad (6)$$

편파 안테나 회전각 보상에 따른 전송 용량 이득을 정량화 하기 위하여 다음과 같은 성능 평가 지표(performance

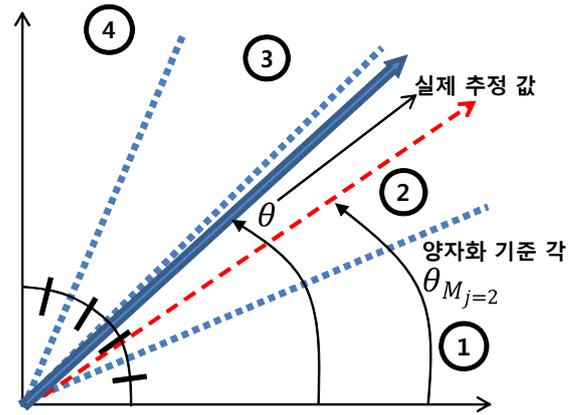


그림 1 양자화된 이중 편파 안테나 회전각 피드백

Fig. 1 Quantized feedback of dual-polarization antenna rotation angle

metric)를 정의한다. $E(\cdot)$ 은 모든 α 값에 대한 평균값 연산이다.

$$G^A = E\left(\frac{C^A}{C}\right) \quad (7)$$

2.3 양자화된 편파 회전각 피드백

수식 (1)에서 편파 안테나의 회전각 θ 0부터 $\pi/2$ 사이에서 균등 분포(uniform distribution)를 가진다고 알려져 있다. 편파 안테나의 회전각은 단말이 추정하여 기지국으로 추정값을 피드백(feedback) 할 수 있다. 편파 안테나의 회전각은 일정 범위 내에서 연속한 값을 가지지만, 일반적인 통신 시스템에서 피드백은 제한된 수의 비트(bit)로 표현되어야 하므로 양자화 과정을 거쳐야 하며, 양자화(quantization) 과정에서 실제 추정값과의 사이에서 오차(quantization error)가 발생하게 되므로 양자화 오차에 따른 성능을 검증하여야 한다.

그림 1에 네 개의 추정 구간으로 양자화되는 예가 도시되어 있다. 4개의 구간으로 양자화 되므로 피드백을 위한 정보량은 두 비트가 된다. 편파 안테나의 회전각 θ 가 균등 분포하므로 추정 구간의 간격은 $\pi/(2 \cdot 2^b)$ 가 될 것이다. b 는 피드백을 위한 비트의 수이다. 수식 (3)의 SINR은 θ 에 반비례하며, 피드백 시 발생하는 양자화 오류의 평균값은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_j = \int_{\frac{(j-1)\pi}{2 \cdot 2^b}}^{\frac{j\pi}{2 \cdot 2^b}} (\theta_{M_j} - \theta_j)^2 \cdot \frac{2 \cdot 2^b}{\pi} d\theta_j \quad (8)$$

수식 (8)에 대하여 θ_{M_j} 에 대한 일차 미분 함수로부터 E_j 를 최소화하는 값을 구해보면, 양자화 오류를 최소화할 수 있는 $\theta_{M_j} = (2j-1)\pi/(4 \cdot 2^b)$ 을 구할 수 있다.

2.4 실험 결과

이중 편파 안테나 시스템에서 간섭은 두 가지로, 하나는

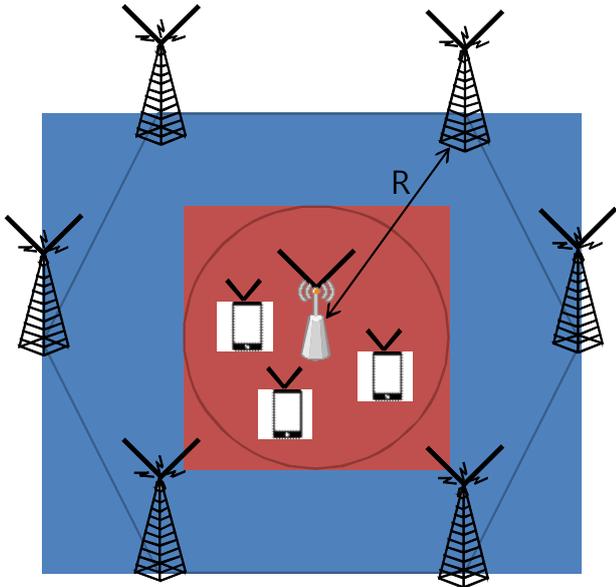


그림 2 실험을 위한 셀룰러 시스템 모델
Fig. 2 System model for computer simulation

편파 회전각에 의한 수직 및 수평 편파 안테나 간 간섭이 나타나며 하나는 일반적인 셀룰러 시스템에서 발생하는 동일한 주파수를 사용하는 다른 셀의 기지국으로부터 수신되는 간섭이다.

그림 2에는 이중 편파 안테나 시스템의 성능을 평가하기 위한 시나리오가 도시되어 있다. 중심에 하나의 스몰 셀이 존재한다. 이중 편파 안테나를 사용하며 30 dbm의 송신 전력을 사용하여 데이터를 전송한다. 이중 편파 안테나가 활용되는 상황은 통상 가시선 채널이 형성된 경우이므로 송수신기 사이의 거리에 의한 거리감쇄 지수(path loss exponent) 값은 3으로 가정하였다. 스몰 셀 기지국으로부터 반경 30미터 이내의 단말은 스몰 셀에 접속하게 된다. 간섭을 주는 기지국은 스몰 셀 기지국으로부터 R 미터에 여섯 개가 위치하고 있으며, 46 dbm 송신 전력을 사용하여 거리 감쇄 지수 값은 가시선 채널이 아님을 고려하여 4로 가정하였다.

R 값이 증가하는 것은 수식 (5)와 (6)에서 다른 셀로부터 수신되는 간섭의 비중이 감소하는 것을 의미한다. R 값이 작은 상황에는 주변의 간섭이 이중 편파 안테나 시스템의 성능을 결정하게 되며, R 값이 증가하게 되면 다른 기지국의 간섭 대비 편파 안테나 회전각이 보정되지 못한 것에 의한 간섭이 주효하다.

편파 안테나 회전각이 보상된 경우 매우 높은 전송 용량에 도달하며 외부 간섭량이 감소함에 따라 전송 용량이 지속적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 편파 안테나 회전각이 보상되지 않은 경우, 외부 간섭의 양과 상관없이 편파 안테나 간 간섭이 발생하게 되므로 외부 간섭량이 감소하여도 증가하지 못하고 전송 용량이 정체된다. 수식 (7)에 의한 전송용량 이득일 계산해 본 결과 2.76에서 최대 4.75 값을 갖는다.

그림 3에서 점선으로 표시된 것은 3GPP LTE에서 사용하고 있는 MCS(modulation and coding scheme) 테이블[10]에 실험으로 얻어진 SINR을 대응시킨 결과이다. 64QAM과

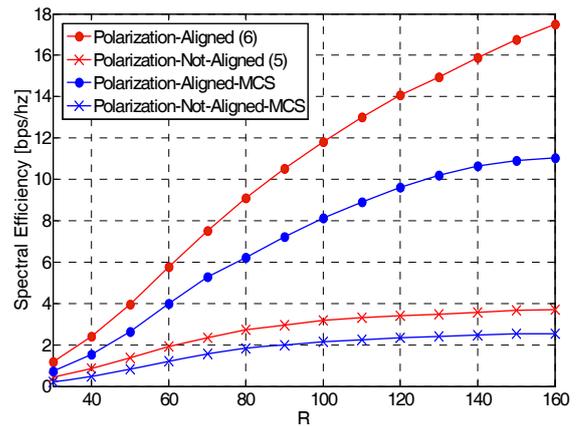


그림 3 편파 안테나 회전각 추정과 보상에 따른 전송 용량
Fig. 3 Capacity depending on polarization angle compensation

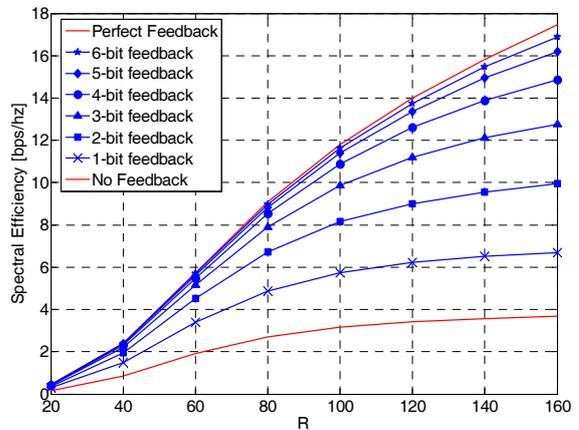


그림 4 양자화된 피드백에 따른 전송 용량
Fig. 4 Capacity improvement by more feedback information

5/6 코드가 사용되므로 수식 (5)와 (6) 대비 낮은 성능을 보인다. MCS 테이블로 주파수 효율성이 제한된 경우에서도 역시 수식(7)로 계산한 이득 값은 3.24에서 4.34를 갖는다. 따라서 현실적인 변조 기법과 채널 코딩 기법을 고려하더라도, 편파 안테나의 회전각의 정확한 추정과 보상이 이중 편파 안테나 시스템에 반드시 필요함을 알 수 있다.

최대 편파 회전각 오차에 성능 열화와 관련하여 수식 (8)에 의한 양자화 편파 회전각에 따른 이중 편파 안테나 시스템의 성능 변화가 그림 4에 도시되어 있다. 피드백이 없는 경우 최대 편파 회전각이 $\pi/2$ 가 되며 1 내지 6 비트의 피드백에 의하여 최대 편파 회전각은 $\pi/4$ 로부터 $\pi/128$ 까지 감소한다. 완벽한 피드백 정보와 전송 용량 이득을 살펴보면 피드백 정보가 1 내지 6 비트인 경우에 대하여 각각 0.385, 0.568, 0.731, 0.851, 0.928, 0.968이 된다. 이로부터 편파 회전각의 필요 추정 성능을 유추 가능하다.

3. 결 론

본 논문에서는 이중 편파 안테나 시스템에서 회전각 정렬과 양자화된 피드백에 대한 전송 용량에 대하여 분석하였다. 이중

편파 안테나의 경우 가시광 채널에서 두 개의 독립된 다중화 채널을 형성할 수 있는 장점이 있으나 편파 회전각이 정렬된 경우 그렇지 않은 경우 대비 네 배 이상의 전송 용량을 보였다. 또한 현실에서 완벽한 편파 회전각 추정과 보상이 어려운 경우라도 6 비트 양자화된 피드백을 사용하면 완벽한 편파 회전각 보상된 경우 대비 96.8 퍼센트의 전송 용량을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 정부출연금사업의 일환으로 수행하였음. [15Z11110, 트래픽 용량 증대를 위한 액세스 네트워크 원천기술 연구]

References

[1] W. Roh, J. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun and F. Aryanfar, "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113, Feb. 2014.

[2] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sternad, R. Apelfrojd, R. T. Svensson, "The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 44-51, May 2014.

[3] A. Ghosh, T. A. Thomas, M. C. Cudak, R. Ratasuk, P. Moorut, F. W. Vook, T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, S. Sun, S. Nie, "Millimeter-wave enhanced local area systems: a high-data-rate approach for future wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1152-1163, Jun. 2014.

[4] V. Erceg, H. Sampath, S. Catreux-Erceg, "Dual-polarization versus single-polarization MIMO channel measurement results and modeling," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, no. 1, pp. 28-33, Jan. 2006.

[5] C. Oestges, B. Clerckx, M. Guillaud, M. Debbah, "Dual-polarized wireless communications: from propagation models to system performance evaluation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 10, pp. 4019-4031, Oct. 2008.

[6] S. Kwon, G. L. Stuber, "Geometrical theory of channel depolarization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 8, pp. 3542-3556, Dec. 2012.

[7] S. Jaekel, K. Borner, L. Thiele, V. Jungnickel, "A geometric polarization rotation model for the 3-D spatial channel model," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 12, pp. 5966-5977, Dec. 2012.

[8] K. T. Wong, M. D. Zoltowski, "Uni-vector-sensor ESPRIT for multisource azimuth, elevation, and polarization estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, no.10, pp. 1467-1474, Oct. 1997.

[9] H. Joung, H. Jo, C. Mun, and J. G. Wook, "Capacity Loss Due to Polarization-Mismatch and Space-Correlation on MISO Channel," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 4, pp. 2124-2136, Apr. 2014.

[10] R1-141565, Broadcom Corporation, "CQI table and feedback design for 256 QAM", 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #76bis, Shenzhen, China, April 2014.

저 자 소 개



왕 한 호 (王 瀚 鎬)

연세대학교 전기전자공학과에서 2004년과 2010년에 각각 학사, 박사 졸업. 현재 상명대학교 정보통신공학과 조교수로 근무. 관심 분야는 이중 편파 안테나 시스템 성능 분석.



노 고 산 (盧 高 山)

연세대학교 전기전자공학과에서 2007년과 2012년에 각각 학사, 박사 졸업. 현재 한국전자통신연구원 선임연구원으로 근무. 관심 분야는 이중 편파 안테나 시스템의 자원 관리 및 시스템 구현.