

무선 통신을 위한 이중 편파 시스템 구조

김재길*, 광계석*, 안재민^o

Structure of Dual Polarized System for Wireless Communication

Jaekil Kim*, Gye Seok Gwak*, Jae Min Ahn^o

요약

본 논문에서는 고용량 전송을 위한 무선통신시스템의 이중 편파 송수신 안테나 구조를 제안한다. 제안된 이중 편파 시스템은 송수신기 모두 서로 직교하는 하나의 수직 편파 안테나와 두 개의 수평 안테나로 구성된다. 제안된 시스템의 수직 편파 안테나와 수평 편파 안테나는 서로 다른 데이터 신호를 전송하지만, 서로 직교하는 두 수평 편파 안테나는 동일한 데이터 신호를 전송한다. 이에, 제안된 이중 편파 신호는 두 개의 이중 편파 평면을 구성한다. 그리고 수신측에서 수신 신호전력이 큰 이중 편파 평면이 선택된다. 모의실험을 통해 제안된 이중 편파 시스템이 단일 편파를 사용하는 2x2 MIMO 시스템 보다 채널 용량 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Dual Polarization, MIMO, XPD, Channel Capacity, Wireless Communication

ABSTRACT

In this paper, we propose the structure of a dual polarized system for a wireless communication. The proposed dual polarized antenna is formed by one vertical antenna and two horizontal antennas that are orthogonal to each other. Vertical and horizontal polarized antennas transmit different signals, but two orthogonal horizontal polarized antennas transmit the same data signals. So, the signals of the proposed dual polarized system construct two dual-polarization planes. And, only one dual-polarization plane with a large signal power is selected at the side of a receiver. The simulation results show that the proposed dual polarized system could obtain a higher capacity compared to an ordinary 2x2 MIMO (Multi-input Multi-output) system.

I. 서론

최근 무선 통신에서는 4세대 이동통신 서비스의 보급 확산과 고용량 멀티미디어 기술이 발전함에 따라 보다 큰 데이터 전송률이 요구되고 있다. 고속의 데이터를 전송하기 위해서는 넓은 전송 대역폭이 필요하다. 그러나 전송 대역폭은 한정되어 있기 때문에 단순

히 대역폭을 증가시키는 단편적인 방법으로는 한계가 있다. 그러므로 전송 대역폭의 변화 없이 전송 채널의 용량을 증대시킬 수 있는 무선 통신 시스템이 필요하다. 이에 송수신단에서 다수의 안테나를 사용하는 다중 안테나 시스템이 주목을 받고 있다¹⁻³⁾. 이는, 다중 안테나 시스템은 추가적인 주파수 할당이나 전력 증가 없이 복수의 송수신 안테나를 사용하여 복수의 신

* 이 논문은 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한 ICT R&D 사업과 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 한국연구재단에서 부여한 과제번호 : 2013R1A1A2009908)의 연구 결과임

♦ First Author : Chugnam National University Department of Electrical and Computer Engineering, stone0517@cnu.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Chugnam National University Department of Electrical and Computer Engineering, jmahn@cnu.ac.kr, 중신회원

* Chugnam National University Department of Electrical and Computer Engineering, gwakgs@cnu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2014-04-122, Received April 7, 2014; Revised June 5, 2014; Accepted June 5, 2014

호를 서로 독립된 전파 경로를 통해 다중 전송함으로써 이론적으로 안테나 수에 거의 비례하는 통신 용량을 얻을 수 있기 때문이다^{4,6}.

단일 편파 다중 안테나를 이용하는 시스템에서는 전송 채널들의 공간적 독립성을 유지시키기 위하여 송수신단에서 안테나 간 이격 거리가 전송 주파수 파장의 10배 이상을 만족시킬 수 있는 물리적 공간 자원 확보가 필요하다. 이에 이중 편파 안테나를 이용한 다중 안테나 시스템이 제안되었다^{7,8}. 이중 편파 안테나 시스템은 서로 직교하는 두 편파를 이용하여 서로 다른 두 개의 전송 신호를 송수신하는 방법으로 편파 안테나 간 이격 거리를 유지할 필요가 없다. 그러므로 이중 편파 안테나를 이용하는 다중 안테나 시스템은 단일 편파를 사용하는 다중 안테나 시스템 보다 두 배 이상의 공간 효율을 갖는다. 또한, 특정 환경에서 이중 편파 안테나 시스템이 단일 편파를 사용하는 2x2 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 시스템 보다 채널 용량 이득을 얻을 수 있음이 보고되었다^{8,9}. 그러나 이중 편파 신호의 직교성이 붕괴될 경우 채널 용량 이득은 현저히 줄어들게 된다. 이에 참고문헌 [10]에서는 송신기 및 수신기 측에 위치한 각 편파 안테나가 서로 공간적으로 분리되어 있는 이중 편파 시스템에서 편파 안테나의 물리적 결합과 전송 채널 환경을 복합적으로 고려하여 이중 편파 채널을 모델링 하였다. 또한, 편파 채널의 XPD (Cross-polarization discrimination), 편광면 불일치, 그리고 편파 전송 채널의 특성에 따른 이중 편파 채널 용량을 분석하였다¹⁰. 그렇지만 이러한 안테나 배치는 이중 편파 안테나 이용에서의 공간 효율을 저하시키는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 각 편파 안테나가 같은 위치에 서로 교차 배치되어 있는 교차 이중 편파 안테나 시스템 (Cross dual-polarized antenna system)에서 편파 수신신호의 입사각도, 편광면 불일치, 그리고 편파 안테나의 물리적 결합을 고려하여 이중 편파 채널을 모델링하고, 단일 편파를 사용하는 2x2 MIMO 시스템과 채널 용량을 비교 분석한 뒤, 무선 통신 시스템의 전송 커버리지 안에서 단일 편파를 사용하는 2x2 MIMO 시스템 보다 큰 채널 용량 이득을 항상 얻을 수 있는 선택적 이중 편파 안테나 시스템을 제안한다. 서론에 이어 2장에서는 이중 편파 안테나 시스템의 전송채널을 모델링하고 그 채널 용량을 분석한다. 이어서, 이를 기반으로 3장에서는 선택적 이중 편파 안테나 시스템을 제안한 뒤 모의실험을 통해 성능을 확인하고, 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. 이중 편파 안테나 시스템

이중 편파 안테나 시스템은, 그림 1과 같이 하나의 편파를 사용하는 일반적인 다중안테나 시스템과 다르게, 서로 직교하는 두 편파를 이용하여 데이터를 전송하는 시스템이다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 수직 안테나와 수평 안테나가 서로 직교하는 cross-polarization 구조의 이중 편파 안테나 시스템을 고려하였다. Cross-polarization 구조는 하나의 편파를 사용하는 일반적인 다중안테나 시스템에 비해 공간적 이점을 얻을 수 있다.

본 장에서는 이중 편파 안테나 시스템의 전송 채널을 수신신호의 입사각도 (Direction of Arrival), 수신 신호와 수신 안테나 간 편광면 불일치 (Polarization Plane Mismatch), 그리고 각 편파 안테나 간 Cross-Polar Isolation 결함을 고려하여 이중 편파 채널을 모델링 하고, 이에 따른 이중 편파 채널 용량을 분석 한다.



그림 1. 하나의 편파를 사용하는 일반적인 다중안테나 시스템
Fig. 1. General MIMO system using single-polarized antennas



그림 2. 교차 이중 편파 안테나 시스템
Fig. 2. Cross dual-polarized antenna system

2.1 이중 편파 채널 모델링

본 논문에서는 그림 3과 같이 무선통신시스템 환경에서 송신기와 수신기 위치에 따른 이중 편파 신호 전송 시나리오를 고려하였다. 각 편파 신호의 입사각도 퍼짐 특성이 다를 수 있지만, 교차 이중 편파 신호는 서로 교차 결합하여 동일한 위치에서 전송되기 때문에 동일한 산란 환경과 동일한 반사 경로를 통과함으로써 두 편파 신호의 직교성은 유지 된다고 가정할 수 있다. 이에 수신안테나에 입사하기 전 기저대역 교차 이중 편파 수신신호는 동일한 복소 채널을 통과하게 되고, 식 (1)과 같이 정의 할 수 있다.

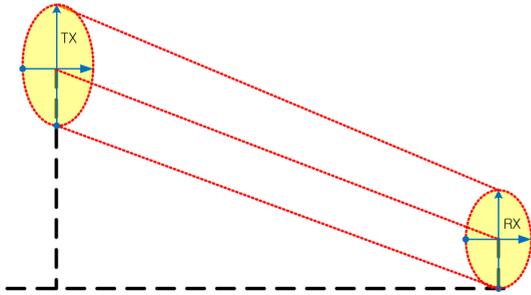


그림 3. 이중 편파 신호 전송 시나리오
Fig. 3. A Scenario of Dual-polarized signal transmission

$$\begin{cases} r_V(t) = h(t) * s_V(t) \\ r_H(t) = h(t) * s_H(t) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, *는 컨볼루션 연산, t 는 시간변수, $h(t)$ 는 정규화 된 복소 채널, $s_V(t)$ 는 수직 편파 기저대역 송신신호, $s_H(t)$ 는 수평 편파 기저대역 송신신호, 그리고 $r_V(t)$ 와 $r_H(t)$ 각각 수신안테나에 입사하기 전 수직, 수평 편파 기저대역 수신신호이다. 복소 채널 통과 후, 그림 4와 같이 이중 편파 수신 안테나의 이중 편광면에 입사한 각 편파 수신신호는 각 입사각도에 따라 각 편파 안테나 수신되는 실효 신호 전력이 변화하게 되며 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} \tilde{r}_V(t) = r_V(t) \cos \theta_V \\ \tilde{r}_H(t) = r_H(t) \cos \theta_H \end{cases} \quad (2)$$

여기서, θ_V 는 수직 편파의 입사각도이고 θ_H 는 수평 편파의 입사각도이다. 이중 편파 신호는 전송 환경에 따라 반사, 회절 등의 영향 및 기타 물리적 영향에 의해 그림 5와 같이 $\angle \alpha$ 만큼 이중 편파 수신 안테나와 이중 편파 수신신호 간 편광면 불일치가 발생할 수 있다. 이에, 식 (2)에서 정의한 이중 편파 수신신호들은 $\angle \alpha$ 에 의해 각 편파 수신안테나에 분산 수신된다. 각 편파 수신 안테나를 통과한 각각의 편파 수신신호들은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

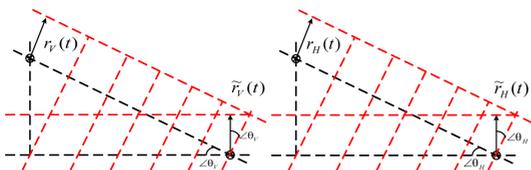


그림 4. 입사각도에 따른 수신신호 크기 변화
Fig. 4. Amplitude variation of received signals according to DOA

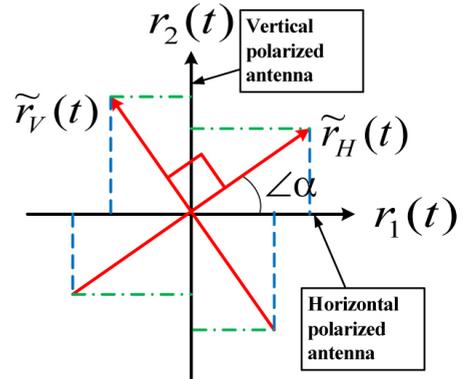


그림 5. 편파 수신 신호들과 편파 수신 안테나들 간 편광면 불일치
Fig. 5. Polarization plane mismatch between polarized signals and polarized antennas

$$\begin{cases} r_1(t) = \tilde{r}_H(t) \cos \alpha - \tilde{r}_V(t) \sin \alpha \\ r_2(t) = \tilde{r}_H(t) \sin \alpha + \tilde{r}_V(t) \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $r_1(t)$ 과 $r_2(t)$ 는 서로 직교하는 각 수신 안테나를 통과한 수신신호들이다. 각 편파 수신 안테나들을 통과한 이중 편파 기저대역 수신신호들은 주파수 영역에서 식 (2)를 식 (3)에 대입하여 식 (4)와 같이 간단한 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_1(f) \\ R_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(f) \cos \theta_H \cos \alpha & -H(f) \cos \theta_V \sin \alpha \\ H(f) \cos \theta_H \sin \alpha & H(f) \cos \theta_V \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_H(f) \\ S_V(f) \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, f 는 주파수 변수, $H(f)$, $S_V(f)$, $S_H(f)$, $R_1(f)$, 그리고 $R_2(f)$ 는 각각 $h(t)$, $s_V(t)$, $s_H(t)$, $r_1(t)$ 그리고 $r_2(t)$ 의 푸리에 쌍이다. 이중 편파 기저대역 송신신호들은 식 (4)에서 보인 바와 같이 복소 채널 이외에 수신신호의 입사각도와 편광면 불일치의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이에, 식 (4)를 통하여 주파수 영역에서 이중 편파 채널 행렬을 식 (5)와 같이 정의 할 수 있다.

$$H_{Dual} = \begin{bmatrix} H(f) \cos \theta_H \cos \alpha & -H(f) \cos \theta_V \sin \alpha \\ H(f) \cos \theta_H \sin \alpha & H(f) \cos \theta_V \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\det |H_{Dual}| = H^2(f) \cos \theta_V \cos \theta_H \quad (6)$$

이중 편파 채널 행렬의 determinant 값은 식 (6)과

같으며, 각 편파 신호의 입사각도에 의해 결정된다. 이에, 각 편파 신호의 입사각도가 90 도가 되지 않는 이상 이중 편파 채널 행렬은 항상 full rank를 갖게 됨을 알 수 있으며 2x2 MIMO 채널 행렬과 같은 형태를 갖는다. 그러나 각 편파 신호의 입사각도 중 하나 만이라도 90 도가 되면 $\angle\alpha$ 에 따라 SIMO 채널 행렬과 같은 형태가 된다.

지금까지 각 편파 안테나 간 Cross-polar Isolation이 완벽하다는 가정 하에 이중 편파 채널을 모델링 하였다. 그러나 이중 편파 안테나의 물리적 특성인 Cross-polar Isolation 결함에 의해 각 편파 신호 간 직교성이 붕괴된다. 이중 편파 신호 간 분리도는 XPD (Cross Polarization Discrimination)로 정의되며, 실제 안테나의 수신신호 측정값에 의존하고, 식 (7)과 같이 계산된다^[10].

$$H = \begin{bmatrix} \Delta_{VV} & \Delta_{VH} \\ \Delta_{HV} & \Delta_{HH} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} XPD_{VH} = |\Delta_{VV}|^2 / |\Delta_{VH}|^2 \\ XPD_{HV} = |\Delta_{HH}|^2 / |\Delta_{HV}|^2 \\ XPD \cong XPD_{VH} \cong XPD_{HV} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, Δ_{VV} 와 Δ_{HH} 는 각각 편파 안테나 신호들의 자기상관 값, Δ_{VH} 는 수평 편파 신호가 수직 편파 안테나에 흡수되는 신호의 양, 그리고 Δ_{HV} 는 수직 편파 신호가 수평 편파 안테나에 흡수되는 신호의 양을 나타낸다. 이중 편파 신호 간 간섭은 전송 채널, 이중 편파 수신신호와 이중 편파 안테나 간 편광면 불일치, 그리고 이중 편파 안테나의 물리적 결함에 의해 발생한다. 그러나 교차 이중 편파 시스템의 경우 식(5)에서 보인 바와 같이 전송 환경과 편광면 불일치에 의한 편파 간 간섭은 각 편파 신호 간 직교성에 영향을 주지 않는다. 이에 본 논문에서는 Cross-polar Isolation에 의해 XPD 만을 고려하였으며 각 송수신 편파 안테나의 XPD를 고려한 간섭 행렬은 식 (8)과 같이 정의할 수 있다^[11].

$$\begin{cases} \widetilde{H}_{Dual} = M_{RX} H_{Dual} M_{TX} \\ M_i = \frac{1}{\sqrt{1+XPD_i}} \begin{bmatrix} \sqrt{XPD_i} & 1 \\ 1 & \sqrt{XPD_i} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, i 는 송수신안테나 인덱스이다. XPD 값이 1인 경우 Cross-polar Isolation 이 전혀 되지 않은 경우이며, XPD 값이 무한대인 경우는 Cross-polar

Isolation이 완벽한 경우이다.

2.2 이중 편파 채널 용량 분석

본 절에서는 2.1절에서 정의한 이중 편파 채널을 2x2 MIMO 채널과 비교 분석하였다. 이중 편파 채널을 2x2 MIMO 채널과 동일 한 조건에서 성능을 분석하기 위해서는 채널 행렬의 신호 전력 크기를 정규화해야 한다. 다중 채널 행렬은 식 (9) 와 같이 계산되며, 다중 채널 행렬의 정규화 상수는 참고문헌 [7]에서 보인 바와 같이 식(10)으로 정의 된다.

$$H = H_{N_R \times N_T} / \Gamma \quad (9)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{1}{N_R \times N_T} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} |h_{ij}|^2} \quad (10)$$

여기서, N_R 은 수신안테나 수, N_T 는 송신안테나 수, h_{ij} 는 다중 채널 행렬 $H_{N_R \times N_T}$ 내 (i, j) 번째 정규화 된 복소 채널이다. 식 (10) 으로부터 하나의 편파를 사용하는 2x2 MIMO 채널의 정규화 상수는 1, 그리고 이중 편파 채널 행렬의 정규화 상수는 $1/\sqrt{2}$ 가 된다. 이를 기반으로 이중 편파 채널 용량과 2x2 MIMO 채널 용량을 식(11)을 이용하여 계산하였다^[2].

$$C = \frac{1}{BW} \int_{BW} \left\{ \sum_{i=1}^R \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_T} \lambda_i(f) \right) \right\} df \quad (11)$$

여기서, R 은 정규화 된 다중 채널 행렬 H 의 랭크, λ_i 는 $H \cdot H^H$ 의 고유 값, H^H 는 H 의 Hermitian 행렬, ρ 는 신호 대 잡음 비 (SNR)이다. 모의실험에 사용된 정규화 된 다중 채널 행렬의 복소 채널들은 Rayleigh 특성을 적용하였으며, 2x2 MIMO 채널 행렬의 복소 채널들은 서로 독립적인 특성을 갖는다고 가정하였다.

그림 6 과 7은 Rayleigh flat fading 채널 환경에서 이중 편파 수신신호와 이중 편파 수신 안테나 간 편광면 불일치가 랜덤으로 발생하고 XPD가 무한대일 때 SNR 따른 Channel Capacity 의 변화를 보여주고 있다. 그림 6에 보인 바와 같이 이중 편파 수신신호의 입사각도가 이상적일 경우 하나의 편파를 사용하는 동일 조건의 2x2 MIMO 시스템 보다 동일 SNR에서 10 % 의 채널 용량 이득을 얻을 수 있으나 그렇지 않을 경우 약 25% 낮은 채널 용량 성능을 보인다. 그러나 SISO 시스템 보다는 채널 용량 성능이 높게 나타

나고 있으며, 그림 7에 보인 바와 같이 채널 용량 상승률 측면에서 보면 2x2 MIMO 시스템에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 XPD 변화에 따른 채널 용량 변화를 보여

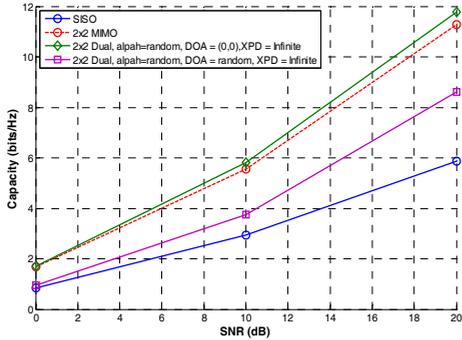


그림 6. low SNR 에서의 편파 수신신호 입사각도에 따른 채널 용량
Fig. 6. Channel capacity of dual-polarized system for DOA of dual-polarized signal vs. low SNR

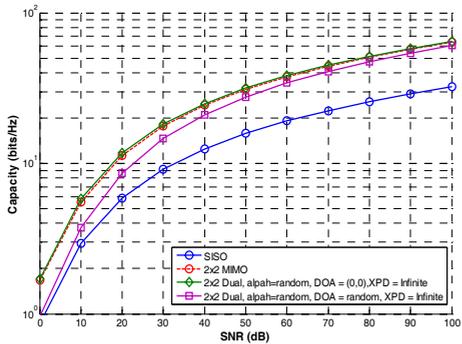


그림 7. High SNR 에서의 편파 수신신호 입사각도에 따른 채널 용량
Fig. 7. Channel capacity of dual-polarized system for DOA of dual-polarized signal vs. high SNR

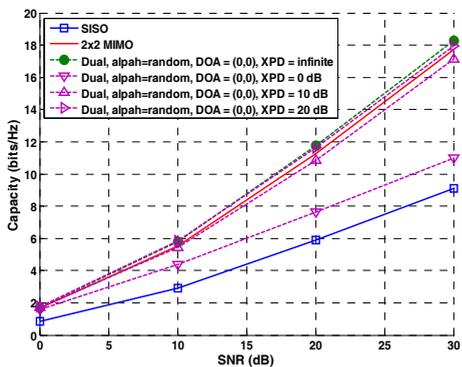


그림 8. XPD 변화에 따른 이중 편파 채널 용량
Fig. 8. Channel capacity of dual-polarized system for XPD vs. SNR

주고 있다. XPD 가 증가할수록 이중 편파 채널 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있으나, XPD 가 20 dB 이상일 경우를 제외하고는 2x2 MIMO 시스템의 채널 용량 성능에 미치지 못한다.

III. 선택적 이중 편파 안테나 시스템

2장의 모의실험 결과 이중 편파 안테나 시스템 성능에 가장 큰 영향을 주는 것은 수신신호의 입사각도임을 알 수 있다. 이에, 본 장에서는 무선 통신 시스템 전송 커버리지 내 수신기 위치에 따른 이중 편파 채널 용량의 변화를 분석하고, 수신신호 위치에 무관하게 항상 최대의 채널 용량 이득을 얻기 위한 선택적 이중 편파 안테나 시스템 구조를 제안한다.

3.1 수신기 위치에 따른 이중 편파 채널 용량 분석

본 절에서는 무선 통신 시스템 전송 커버리지 내 수신기 위치에 따른 가지경로 신호의 입사각도 변화를 고려하여 이중 편파 채널 용량 변화를 분석하였다. 먼저 무선 통신 시스템 전송 커버리지 내 수신 SNR 분포를 계산하기 위해 표 1에서 정의한 링크 버짓을 기반으로 Log-distance 경로 손실 모델을 적용하였다. 수신신호의 입사각도 변화에 의한 각 송수신 안테나 손실을 고려하지 않는 이상적인 경우 수직 편파만을 사용하는 SISO 시스템의 수신 SNR 분포는 그림 9와 같다.

그림 10과 같이 수직 편파 송수신 안테나가 배치되어 있다고 가정하고 수신기 위치에 따른 가지경로 신호의 입사각도 변화를 적용하면 수신신호 SNR 분포가 이상적인 경우와 비슷한 분포를 보이지만, 수신기의 위치가 송수신기에 근접할 경우 그림 11과 같이 가지경로 신호의 입사각도가 90 도에 가까워짐에 따라 수신 SNR이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, 수평 편파 송수신 안테나가 그림 12와 같이 배치되어 있다고 가정하고 수신기 위치에 따른 가지경로 신호의 입사각도 변화를 적용하면 그림 13과 같이 가지경로

표 1. 이중 편파 안테나를 사용하는 무선 통신 시스템 링크 버짓
Table 1. Link budge of a wireless communication system using dual-polarized antenna

Parameter	value
Transmit power	55 dBm
Noise power	-94 dBm
Path loss exponent	2
Difference of height between Tx and Rx	10 m

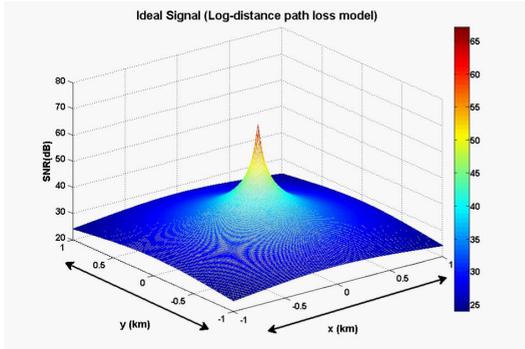


그림 9. 표 1 에 따른 Log-distance path loss model을 고려한 수신 SNR 분포
Fig. 9. Distribution of Received SNR for Log-distance path loss model of table 1

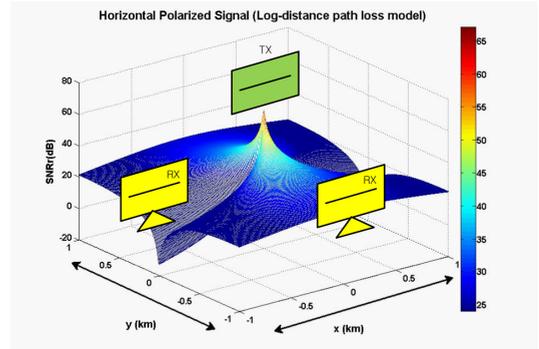


그림 12. 수신신호 입사각도에 따른 수평 편파 신호 수신 SNR 분포
Fig. 12. Distribution of Received SNR of horizontal polarized signal for DOA

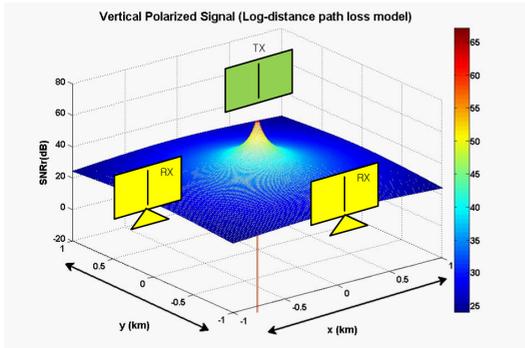


그림 10. 수신신호 입사각도에 따른 수직 편파 신호 수신 SNR 분포
Fig. 10. Distribution of Received SNR of vertical polarized signal for DOA

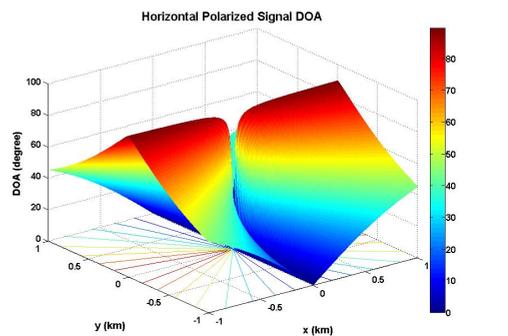


그림 13. 수신기 위치에 따른 수평 편파 신호 입사각도 변화
Fig. 13. Variation of DOA of vertical polarized signal

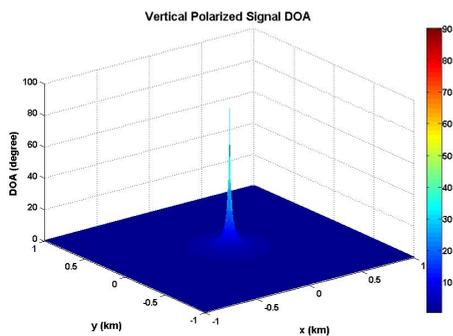


그림 11. 수신기 위치에 따른 수직 편파 신호 입사각도 변화
Fig. 11. Variation of DOA of vertical polarized signal

신호의 입사각도가 90도에 가까워지는 위치에 수신기가 위치할 경우 수신 SNR 이 감소하는 것을 알 수 있다. 각 편파 안테나 가지경로 신호의 입사각도가 커질 수록 식 (2)에서 보인 바와 같이 수신신호 크기는 감

소하게 된다. 이에, 이중 편파 송수신 안테나를 사용할 경우 수신기 위치에 따른 각 편파 신호의 입사각도 변화는 복잡적으로 발생하게 되며, 그에 따라 이중 편파 시스템의 수신 성능이 크게 변화하게 된다. 이를 확인하기 위해 표 2와 같은 조건에서 이중 편파 시스템과 하나의 편파를 사용하는 2x2 MIMO 시스템의 채널 용량을 비교 분석하였다. 식 (11)에 그림 9의 수신 SNR 분포를 적용하여 채널 용량을 계산하였고, 수신신호 입사각도 영향은 이중 편파 채널에만 적용하였다. 수신신호 입사각도 변화에 따른 채널 용량 변화를 확인하기 위해 편파 안테나 결합에 의한 영향을 제

표 2. 이중 편파 수신기 위치 조건
Table 2. Condition of dual polarized receiver locations

Conditions	Fixed coordinate (km) / Distribution of receiver location	
#. 1	X = 0 / Y-axis	Y = 0 / X-axis
#. 2	X = 0.5 / Y-axis	Y = 0.5 / X-axis

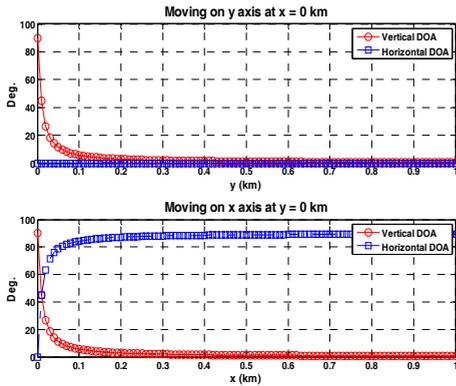


그림 14. 첫 번째 조건을 고려한 수신기 위치에 따른 각 편파 수신신호의 입사각도 변화
 Fig. 14. Variation of DOA of dual polarized signal on the 1st condition

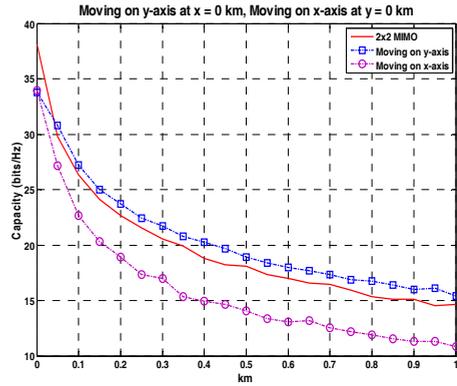


그림 15. 첫 번째 조건을 고려한 수신기 위치에 따른 이중 편파 채널 용량
 Fig. 15. Capacity of dual polarization channel for the 1st condition

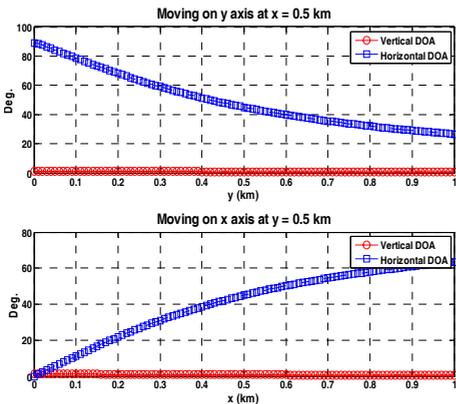


그림 16. 두 번째 조건을 고려한 수신기 위치에 따른 각 편파 수신신호의 입사각도 변화
 Fig. 16. Variation of DOA of dual polarized signal on the 2nd condition

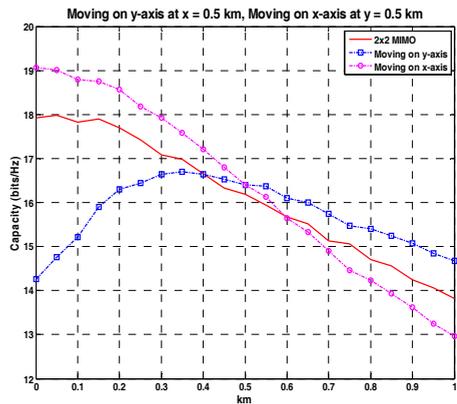


그림 17. 두 번째 조건을 고려한 수신기 위치에 따른 이중 편파 채널 용량
 Fig. 17. Capacity of dual polarization channel for the 2nd condition

외하고, K-factor가 10 dB 인 Ricean flat fading 채널 환경에서 이중 편파 수신 신호와 이중 편파 수신안테나 간 편광면 불일치만 랜덤으로 적용하였다.

그림 14와 16은 각 수신기 위치 조건에 따른 이중 편파 수신 신호의 입사각도 변화를 보여주고 있으며, 그림 15와 17은 각 수신기 위치 조건에 따른 이중 편파 시스템과 하나의 편파를 사용하는 2x2 MIMO 시스템의 채널 용량의 변화를 보이고 있다. 그림 15와 17에서 보인 바와 같이 이중 편파 수신기의 위치가 송신기 바로 근처에 위치하여 수직 편파 신호의 입사각도가 증가하는 경우를 제외하고, 수직편파 신호의 입사각도는 크게 변화하지 않아 이중 편파 채널 용량 변화에 큰 영향을 주지 않는다. 반면, 수평 편파 신호의 입사각도 변화는 수신기 위치에 따라 크게 변화하고

있으며, 이로 인해 이중 편파 채널 용량이 크게 변화한다. 이는 그림 17에서 보인 바와 같이 수평 편파 신호의 입사각도가 작은 곳에서는 이중 편파 시스템이 일반적인 2x2 MIMO 시스템 보다 큰 채널 용량을 얻을 수 있지만, 수평 편파 신호의 입사각도가 큰 곳에서는 일반적인 2x2 MIMO 시스템 보다 적은 채널 용량을 얻는 것을 확인할 수 있다.

3.2 선택적 이중 편파 안테나 시스템 구조

3.1절에서 보인 바와 같이 이중 편파 안테나 시스템의 수신 성능은 수평 편파 신호의 입사각도의 변화에 의해 결정된다. 이에 본 절에서는 그림 18 과 같이 각 송수신기가 서로 직교하는 두 개의 수평 편파 안테나와 하나의 수직 편파 안테나를 사용하는 선택적 이



그림 18. 선택적 이중 편파 안테나 시스템
Fig. 18. Selective dual-polarized antenna 시스템

중 편파 안테나 시스템을 제안한다.

선택적 이중 편파 안테나 시스템은 서로 직교하는 두 개의 수평 편파 안테나를 사용함으로써 수평 편파 신호의 입사각도 변화에 따른 신호 감쇄 영향을 최소화 할 수 있다. 선택적 이중 편파 안테나 시스템은 기존 이중 편파 안테나 시스템과 동일하게 두 개의 편파를 사용하여 두 개의 서로 다른 데이터를 전송하지만, 서로 직교하는 두 개의 수평 편파 안테나는 동일 한 데이터를 전송한다. 두 수평 편파 신호는 서로 직교하기 때문에 그림 19와 같이 하나의 입사 각도를 이용하여 식 (12) 와 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{cases} \tilde{r}_{H1}(t) = r_{H1}(t)\cos\theta_H = h(t)\cos\theta_H * s_H(t) \\ \tilde{r}_{H2}(t) = r_{H2}(t)\sin\theta_H = h(t)\sin\theta_H * s_H(t) \end{cases} \quad (12)$$

식 (12) 에서 보인 바와 같이 두 수평 편파 수신신호의 크기는 하나의 입사각도에 의해 결정된다. 이에 두 개의 이중 편파 채널 행렬을 식 (5)와 식 (12)를 이용하여 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{Dual_1} &= \begin{bmatrix} H(f)\cos\theta_H\cos\alpha & -H(f)\cos\theta_V\sin\alpha \\ H(f)\cos\theta_H\sin\alpha & H(f)\cos\theta_V\cos\alpha \end{bmatrix} \\ H_{Dual_2} &= \begin{bmatrix} H(f)\sin\theta_H\cos\alpha & -H(f)\cos\theta_V\sin\alpha \\ H(f)\sin\theta_H\sin\alpha & H(f)\cos\theta_V\cos\alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{H1} &= \begin{bmatrix} H(f)\cos\theta_H\cos\alpha \\ H(f)\cos\theta_H\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(f)\cos\theta_H\cos\alpha \\ H(f)\cos\theta_H\sin\alpha \end{bmatrix}^H \\ \Delta_{H2} &= \begin{bmatrix} H(f)\sin\theta_H\cos\alpha \\ H(f)\sin\theta_H\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H(f)\sin\theta_H\cos\alpha \\ H(f)\sin\theta_H\sin\alpha \end{bmatrix}^H \end{aligned} \quad (14)$$

식 (13)에서 정의한 두 이중 편파 채널 행렬식의 첫 번째 열의 채널 크기는 각각 식 (14) 와 같이 계산할 수 있다. 여기서, 신호 크기가 큰 수평 편파 수신신호를 포함하는 하나의 이중 편파 채널을 선택하여 이중 편파 시스템을 구성함으로써 최적의 수신 성능을 보장할 수 있다.

3.3 선택적 이중 편파 안테나 시스템 성능 분석

선택적 이중 편파 안테나 시스템 성능을 확인하기 위해서 3.1절의 모의실험과 동일한 환경에서 하나의

편파를 사용하는 일반적인 2x2 MIMO 시스템과 채널 용량을 비교 분석하였다. 모의실험 결과, 그림 20과 21에 보인 바와 같이 기존 이중 편파 안테나 시스템이

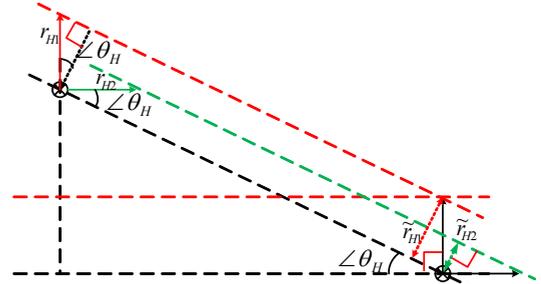


그림 19. 두 수평 편파 수신신호의 입사각도
Fig. 19. DOA of two horizontal polarized received signals

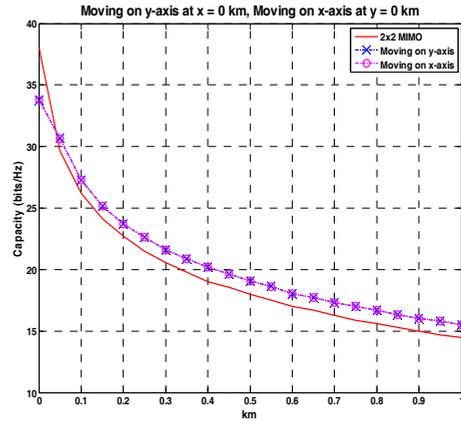


그림 20. 첫 번째 조건을 고려한 수신기 위치에 따른 선택적 이중 편파 채널 용량
Fig. 20. Capacity of selective dual polarization channel for the 1st condition

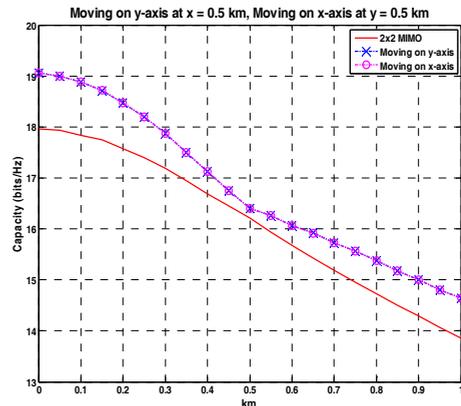


그림 21. 두 번째 조건을 고려한 수신기 위치에 따른 선택적 이중 편파 채널 용량
Fig. 21. Capacity of selective dual polarization channel for the 2nd condition

특정 구간에서만 일반적인 2x2 MIMO 시스템 보다 큰 채널 용량 이득을 얻는 반면에, 선택적 이중 편파 안테나 시스템은 그림 20 과 같이 수신기가 송신기 바로 근처에 근접함으로써 수직 편파 수신신호의 입사 각도가 증가하는 구간을 제외한 모든 구간에서 하나의 편파를 사용하는 동일 조건의 일반적인 2x2 MIMO 시스템 보다 항상 큰 채널 용량 이득을 얻는 것을 확인 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이중 편파 안테나의 전송 채널을 수신신호의 입사각도, 편파 수신신호와 편파 수신안테나 간 편광면 불일치, 그리고 이중 편파 안테나 간 물리적 결합에 의한 XPD 를 고려하여 모델링 하였고, 모의실험을 통해 이중 편파 채널 용량을 분석하였다. 그 결과, 특정 조건에서만 이중 편파 시스템이 단일 편파를 사용하는 동일 조건의 2x2 MIMO 시스템 보다 채널 용량 이득을 얻을 수 있음을 확인하였고, 이중 편파 안테나 시스템에 가장 큰 영향을 주는 것은 수신신호의 입사각도 임을 알 수 있었다. 이에 무선 통신 전송 시나리오를 고려하여 전송 커버리지 내 이중 편파 수신기 위치에 따른 이중 편파 수신신호의 입사각도 변화를 분석하였다. 그 결과 수직 편파 수신신호의 입사각도의 영향을 수신기가 송신기 바로 근처에 위치해 있을 경우를 제외하고는 이중 편파 안테나 시스템 성능에 큰 영향을 주지 않지만, 수평 편파 수신신호의 입사각도는 커버리지 내 수신기 위치에 따라 크게 변화하고, 이로 인해 이중 편파 안테나 시스템 성능에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이에 수평 편파 수신신호의 입사각도에 의한 이중 편파 안테나 수신 성능 열화를 극복하기 위해 선택적 이중 편파 안테나 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 각 송수신기가 서로 직교하는 두 개의 수평 편파 안테나와 수직 편파 안테나를 사용함으로써 두 개의 이중 편파 채널 행렬을 얻을 수 있으며, 두 이중 편파 채널 행렬의 수평 편파 채널의 전력 크기 비교를 통해 신뢰도가 높은 이중 편파 채널 행렬을 선택하여 최적의 이중 편파 채널 용량 이득을 확보하고, 동일 조건의 단일 편파를 사용하는 2x2 MIMO 시스템 보다 채널 용량 이득을 항상 얻을 수 있음을 모의실험을 통해 확인할 수 있었다.

References

[1] Q. Li, G. Li, W. Lee, M. Lee, D. Mazzaresse,

B. Clerckx, and Z. Li, "MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 5, pp. 86-92, 2010.

[2] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge Univ. Press, 2003.

[3] B. H. Shim and B. G. Lee, "Evolution of MIMO technology," *J. KICS*, vol. 38A, no. 8, pp. 712-723, Aug. 2013

[4] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Nov. 1999.

[5] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 6, pp. 311-355, Mar. 1998.

[6] J. U. Jang, J. H. Kim, and C. Mun, "Analysis of massive MIMO wireless channel characteristics," *J. KICS*, vol. 38B, no. 3B, pp. 216-221, Mar. 2013

[7] P. Kyritsi, D. C. Cox, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Effect of antenna polarization on the capacity of a multiple element system in an indoor environment," *IEEE J. Selected areas in Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 1227-1239, Aug. 2002.

[8] V. R. Anreddy and M. A. Ingram, "Capacity of measured Ricean and Rayleigh indoor MIMO channels at 2.4 GHz with polarization and spatial diversity," in *Proc. IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, vol. 2, pp. 946-951, Las Vegas, NV, Apr. 2006.

[9] J. K. Kim, G. S. Gwak, and J. M. Ahn, "Analysis on channel capacity of dual-polarized system for wireless communication," in *Proc. KICS Conf.*, pp. 939-940, Gangwon-do, Korea, Jan. 2014

[10] M. Coldrey, "Modeling and capacity of polarized MIMO channels," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 440-444, Singapore, May 2008.

[11] P. D. Arapoglou, M. Zamkotsian, and P. Cottis, "Dual polarization MIMO in LMS broadcasting systems: Possible benefits and

challenges,” *Int. J. Satellite Commun. Netw.*,
vol 29, no. 4, pp. 349-366, 2011.

김 재 길 (Jaekil Kim)



2009년 2월 : 충남대학교 전자
전파정보통신공학부 졸업
2011년 2월 : 충남대학교 전자
전파정보통신공학과 석사
2011년 3월~현재 : 충남대학교
전자전파정보통신공학과 박
사과정

<관심분야> 차세대 이동통신, 지상파 DTV, 위성항
법시스템

안 재 민 (Jae Min Ahn)



1987년 2월 : 서울대학교 전자
공학과(학사)
1989년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사
1994년 8월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 박사
1994년~1999년 : 삼성전자 선임
연구원

2007~2008년 : 정보통신연구진흥원 차세대이동통신사
업단장, 정보통신부 차세대 이동통신 PM
1999년~현재 : 충남대학교 전기정보통신공학부 교수
<관심분야> 차세대 이동통신 물리계층 및 Radio
Resource management

곽 계 석 (Gye Seok Gwak)



2013년 2월 : 충남대학교 정보
통신공학과 졸업
2013년 3월~현재 : 충남대학교
전자전파정보통신공학과 석
사과정
<관심분야> 차세대 이동통신,
지상파 DTV