

실내 채널 환경에서 MIMO 시스템의 안테나 이격거리에 따른 채널 용량 분석

Analysis of Channel Capacity with Respect to Antenna Separation of an MIMO System in an Indoor Channel Environment

김 상 근 · 오 이 석

Sang-Keun Kim · Yi-Sok Oh

요 약

본 논문에서는 3차원 광선 추적법을 이용하여 실내 무선 MIMO 채널에서 공간적 특성들을 해석함으로써 채널 용량을 계산하고, 특정 실내 환경에서 최적화된 다중 안테나의 이격거리를 알아내는 방법을 제안한다. 우선, 가시 영역과 비가시 영역을 갖는 복도 환경에서 3차원 광선 추적법을 이용하여 전파 경로, 전송 손실 및 시간 지연 확산 등의 채널 공간적 특성들을 계산하고, 시간 지연 확산 특성을 다이폴 안테나와 네트워크 분석기를 이용하여 측정된 후에 계산 값들과 비교하여 3차원 광선 추적법의 정확성을 검증한다. 그런 다음에 그 실내 환경에 다중 안테나를 갖는 송신기와 수신기를 위치시키고, 수신기 위치별로 송·수신 안테나들의 간격에 따른 전파 경로와 전송 손실을 3차원 광선 추적법을 이용하여 계산하며, 이들 계산 값을 이용하여 채널 용량을 계산한다. 이 계산을 100개의 수신 위치에서 4종류의 안테나 방향 조합을 갖는 조건들에서 안테나 간격에 따른 채널 용량을 계산하고, 이들 값들을 평균하여 이 실내 환경에서의 최적의 안테나 이격 거리를 알아내었다.

Abstract

In this paper, the channel capacity of a specified wireless indoor multiple-input multiple-output(MIMO) channel is estimated by analyzing spatial characteristics of this channel using the three-dimensional ray tracing method, and a technique for deriving an optimized separation of multi-antenna elements is proposed. At first, the ray paths, the path losses, and the time-delay profile are computed using the three-dimensional ray tracing method in an indoor corridor environment, which has the line of sight(LOS) and non-line of sight(NLOS) regions. The ray tracing method is verified by a comparison between the computation results and the measurements which are obtained with dipole antennas, an amplifier and a network analyzer. Then, an MIMO system is positioned in the indoor channel environment and the ray paths and path losses are computed for four antenna-position combinations and various values of the antenna separation to obtain the channel capacity for the MIMO system. An optimum antenna-separation is derived by averaging the channel capacities of 100 receiver positions with four different antenna combinations.

Key words : Channel Capacity, MIMO System, Ray Tracing Method, Time Delay Profile

I. 서 론

최근의 무선 이동 통신 기술은 고품질의 멀티미

디어 서비스를 위해 광대역 무선 채널의 용량을 증대시키기 위한 방향으로 나아가고 있다. 하지만 광대역의 무선 채널의 경우, 전파의 다중 산란에 의한

「본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10101-0) 지원으로 수행되었음.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information & Communication Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20060814-094

· 수정완료일자 : 2006년 10월 12일

페이딩 현상으로 인해 채널 용량이 낮아지므로, 추가적인 주파수를 사용하지 않고 채널 용량을 증가시킬 수 있는 방법인 다중 송수신(Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) 기법이 각광을 받고 있다.

이러한 유용한 기법을 실제 무선 통신에 보다 효과적으로 적용하기 위해서는 MIMO 채널의 정확한 모델링이 필요하다. 현재까지의 MIMO 채널을 모델링하는 방법은 크게 다음과 같이 네 가지로 구분해 볼 수 있다. 첫째, 실제 산란 환경에서 측정을 통해 통계적으로 모델링하는 방법이다^[1]. 그러나 이 방법은 시간과 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 둘째, 복소 가우시안 IID(Independent Identically Distributed) 행렬에 송수신단의 상관 행렬의 제곱근을 곱한 형태로 여러번 시뮬레이션 후 평균하는 방법^[2]으로서 간단한 모델링이 가능하지만 시뮬레이션 시간이 길고 시공간적인 상관 특성을 정확히 반영하기 힘들다는 단점이 있다. 셋째, 산란체와 평면 입사파의 상호 관계를 통해 해석하는 산란 모델링^[3]이 있으나 실제 환경의 정확한 반영이 어렵고 안테나의 특성을 정확히 반영하기 힘들다는 단점이 있다. 마지막으로, 광선 추적 알고리즘을 이용하여 각 전송 경로를 따라 전파의 반사, 투과, 회절 등을 주어진 전파 산란 환경에 대해 해석함으로써 모델링하는 방법이다. 실내 환경에서 공간적 특성을 비교적 정확히 해석할 수 있고, 안테나 특성을 해석에 적용하기 쉽다는 장점이 있다^[4].

따라서 본 논문에서는 3차원 광선 추적법을 사용하여 가시 영역과 비가시 영역을 동시에 갖는 복도 환경에서의 공간적 채널 특성들을 해석함으로써 MIMO 채널 모델링을 하였다. 또한, 2x2 다중 안테나 시스템을 가정하여 채널 응답 행렬을 구하여 안테나 간격에 따른 채널 용량을 계산하였고, 수신기의 위치에 따른 결과를 비교하였다. 또한, 이를 통해 주어진 산란 공간 안에서 최적화된 다중 안테나의 간격을 도출하였다. 한편, 이러한 모델링에 사용된 3차원 광선 추적 알고리즘은 시간 지연 확산 값을 예측하고, 측정을 통해 비교함으로써 그 정확성을 검증하였다.

II. 3차원 광선 추적 알고리즘

실내 무선 통신 환경의 모델링에서 공간적 특성

을 고려하기 위해서는 전파 경로를 정확하게 계산하여 시간 지연 확산(Power Delay Profile: PDP), 수신 각도(Arrival of Angle: AoA), 송신 각도(Angle of Departure: AoD)등의 개념들이 해석되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 3차원 광선 추적법을 이용하여 결정적인 채널 모델링에 필요한 위와 같은 값들을 계산하였다. 광선 추적 알고리즘은 반사파, 투과파, 회절파 등을 고려하였으며, 모델링한 공간이 산란체가 없고 매끈한 벽면 구조이기 때문에 산란에 의한 영향은 고려하지 않았다. 반사파는 영상법을 사용하여 12번 반사되어 수신기에 도달하는 전계까지 고려되었다. 본 연구에서 고려한 복도 환경에서는 반사파가 13번 이상일 경우에는 경로 손실의 레벨이 -200 dB 이하가 되어 무시해도 될 정도로 미약하였다. 투과파의 경우는 다중 벽면 구조를 거쳐 수신기에 도달하기 때문에 “shooting and bouncing 기법^[5]”을 응용하여 벽면 두께를 고려한 경로를 계산하였다. 회절파는 UTD 모델을 사용하여 계산하였다^[6]. 또한 벽면의 구조에 따른 전기적 매질 특성들을 콘크리트, 유리, 철 등으로 구분하여 복소 유전율을 고려하였고, 안테나의 패턴과 편파, 벽면의 구조에 따른 전기적 매질 특성들을 고려하였으며, 그에 따른 채널 임펄스 응답은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$h(t) = \sum_{k=0}^M A_1^k \cdot e^{j\theta_k} \cdot \delta_k(t - \tau_k) \quad (1a)$$

송신된 임펄스 신호는 Dirac 함수로 표현되었고, 각 경로에 따른 손실(A_1^k)과 시간지연(τ_k) 위상 변화(θ_k) 등을 거친 복소 신호 $h(t)$ 로 시간에 따른 수신 신호의 표현이 가능하다. 이러한 변수들은 모두 광선 추적법을 이용하여, 결정된 송수신기 위치에 따른 값을 계산할 수가 있다. 또한 협대역을 가정하여, 사용하는 반송파에 대한 주파수 응답에 해당하는 복소 채널 응답을 다음과 같이 나타낼 수 있다^[7].

$$h = \sum_{k=0}^M A_1^k \cdot e^{j\theta_k} \cdot e^{j\omega_0 \tau_k} \quad (1b)$$

광선 추적법을 사용하여 SISO 경우의 채널 응답을 구한 후, 수신 각도와 송신 각도를 3차원적으로 계산하면 MIMO 시스템에서의 채널 응답 행렬을 예측할 수 있다. 다중 경로로 입사되는 파형을 국소 평

면파로 가정하고, 안테나 간격에 비해 산란체와 안테나 사이의 거리가 충분히 크다고 하면, 각 경로에 따른 다중 안테나간 수신 전계의 차이는 감쇄에 의한 영향은 충분히 작다고 볼 수 있다. 따라서 수신 각도와 송신 각도에 따른 위상 차이를 계산하여 안테나간 수신 전계의 차이를 구할 수 있다. 식 (2)는 다중 안테나의 배열 위치에 따른 위상 차이를 나타내며, 입사 각도 (ϕ , θ)에 대한 함수로 표현되어진다. 따라서 본 논문에서는 광선 추적 시뮬레이션을 통해 각 경로에 따라 3차원적으로 입사 각도를 계산함으로써 결정된 채널에서의 송신 각도와 수신 각도를 구하였다. 한편, 식 (2)의 좌표에서 첨자 *siso*는 광선 추적법을 실시한 지점이고, *vir*은 다중 안테나를 배열시킨 지점을 나타낸다^[8].

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} ((x_{siso} - x_{vir}) \cos\phi \sin\theta + (y_{siso} - y_{vir}) \sin\phi \sin\theta + (z_{siso} - z_{vir}) \cos\theta) \quad (2)$$

$$h_{ij} = \sum_k A_1^k e^{j\psi_1^k} e^{-j\Delta\phi_{Tx}^k(j-1)} e^{-j\Delta\phi_{Rx}^k(i-1)} \quad (3)$$

여기서, A_1^k 는 광선 추적 시뮬레이션에 의한 SISO 채널의 k 번째 경로의 감쇄를 나타내며, ϕ_1^k 는 그 경로의 위상 변화를 나타낸다.

III. 시간 지연 확산

본 절에서는 앞 절의 예측 모델에서 계산된 결과값을 검증하기 위하여 그림 3에 보인 3가지 수신기 위치에 따른 시간 지연 확산을 측정하였다^[9]. 시간 지연 확산 특성을 시간 영역에서 측정하기 위해서 벡터 회로망 분석기를 이용하여 주파수 영역에서 측정 한 후에 푸리에 변환을 통하여 시간 영역의 결과로 바꾸는 방법을 이용하였다. 사용한 측정 장비의 구조는 그림 1과 같다.

측정에는 반파장 다이폴 안테나가 사용되었으며, 안테나 이득은 2 dBi이다. 벡터 회로망 분석기를 이용하여 주파수 영역에서 측정시 2.2~2.7 GHz의 범위에서 데이터를 얻어 0.5 GHz의 주파수 범위를 푸리에 변환함으로써, 시간 영역에서 2 ns의 단위로 시간 지연 확산을 측정하였다. 사용한 케이블은 10 m

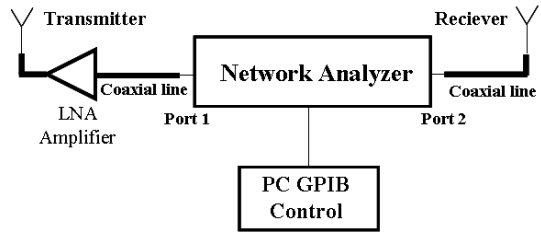


그림 1. 측정 장치 구성
Fig. 1. Measurement equipment.

당 -10 dB의 손실이 있기 때문에 총 30 m 케이블을 사용하여 측정 한 경우 31 dB 이득을 갖는 LNA 증폭기를 사용하였고, 결과값에서 추가로 1 dB를 보정하여 주었다. GPIB 프로그램을 이용하여 데이터를 획득하였고, 10번의 측정 결과를 평균하여 최종 결과값을 구하였다.

그림 2에서와 같이 3가지 수신기의 위치에 대해서 측정을 실시하여 가시 영역과 비가시 영역에서의 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였고, 그림 3~5에

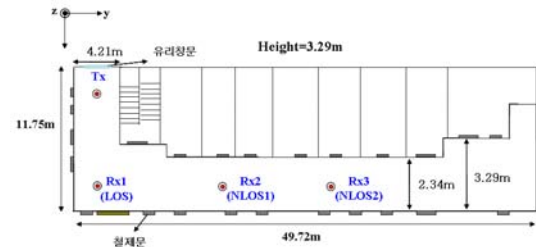


그림 2. 측정 건물 내부 구조에서의 송신기와 수신기 위치
Fig. 2. Positions of the transmitter and receivers in the measurement site.

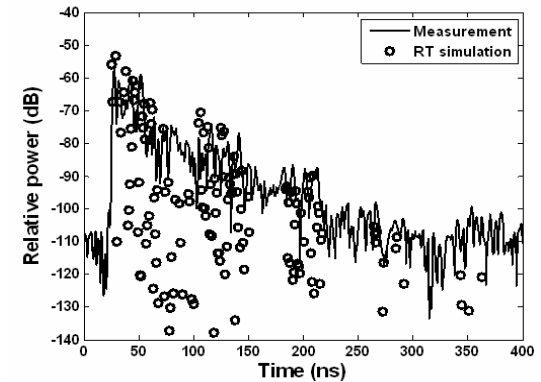


그림 3. Rx1(LOS)에서 시간 지연 확산 비교
Fig. 3. Comparison of power delay profile at Rx1(LOS).

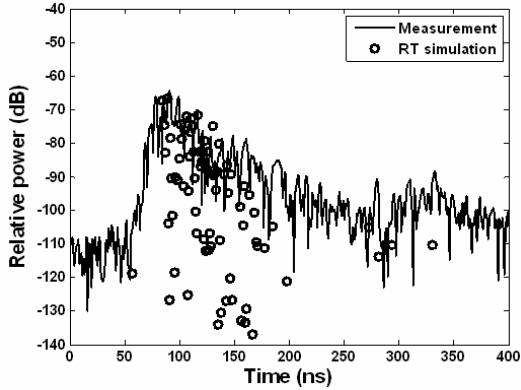


그림 4. Rx2(NLOS1)에서 시간 지연 확산 비교
Fig. 4. Comparison of power delay profile at Rx2(NLOS1).

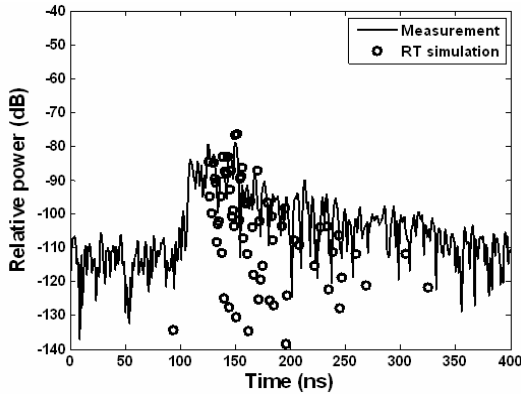


그림 5. Rx3(NLOS2)에서 시간 지연 확산 비교
Fig. 5. Comparison of power delay profile at Rx3(NLOS2).

서 보면 벽면의 구조와 전기적 매질 특성만을 고려한 시뮬레이션으로 도착 시간상의 평균 오차가 약 6 dB 이하로 꽤 잘 맞는 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 수신기 위치에 따른 결과는 그림 3의 직접파가 있는 가시 영역의 경우에는 직접파 주변으로 높은 수신 레벨의 신호들이 시간상에서 밀집하여 분포하는 것을 확인할 수 있고, 그림 4와 5의 수신기가 비가시 영역으로 들어갈수록 신호의 레벨이 비슷해지며, 신호가 시간상에서 퍼지는 현상이 심해지는 것을 확인할 수가 있다.

IV. MIMO 채널 용량 분석

4.1 MIMO 채널 용량의 최대치

본 절에서는 송수신기의 위치가 정해진 결정된 (deterministic) 채널의 채널 용량을 해석하기 위해 MIMO 채널 용량의 최대치를 계산한다. 각각 N_T , N_R 개의 송·수신 안테나를 사용하고, 각 송신 안테나에서는 독립적이며 같은 세기를 갖는 신호 벡터들을 전송한다고 가정하면 채널 용량 C 는 다음과 같이 표현된다^[10].

$$C = \log_2 \det \left[\delta_{ij} + \frac{\rho}{n} \cdot r_{ij} \right] \text{bits/s/Hz} \quad (4)$$

여기서, n 은 송수신 안테나의 개수이고, ρ 는 신호대 잡음비(SNR), δ_{ij} 는 $n \times n$ 단위행렬, r_{ij} 는 순간적 채널 상관 행렬을 나타내며, 식 (3)의 채널 응답을 이용하여 계산할 수 있다. 이 때, 채널의 상태가 확률적이라고 가정했을 때의 평균 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle C \rangle = \left\langle \log_2 \det \left[\delta_{ij} + \frac{\rho}{n} \cdot r_{ij} \right] \right\rangle \text{bit/s/Hz} \quad (5)$$

이러한 통계적인 표현식을 결정적인 채널 모델에 적용하기 위해 쥘센 부등식과 $\log \det$ 함수의 concavity를 이용하여 식 (6)과 같이 채널 용량의 최대치를 추정할 수 있는 식으로 유도가 되어지고^[7], 이 때의 채널 상관 행렬은 식 (7)과 같이 송수신단의 평균 상관도로 나타낼 수 있다. 이때, 채널 행렬의 성분들은 Frobenius' normalization을 한다.

$$\langle C \rangle \leq \bar{C} = \left\langle \log_2 \det \left[\delta_{ij} + \frac{\rho}{n} \cdot \bar{r}_{ij} \right] \right\rangle \text{bit/s/Hz} \quad (6)$$

$$\bar{r}_{ij}^R = \sum_k \langle h_{ik} h_{jk}^* \rangle, \quad \bar{r}_{ij}^T = \sum_k \langle h_{kj} h_{ki}^* \rangle \quad (7)$$

여기서, h_{ij} 는 식 (3)으로부터 구한 정규화된 부채널 간의 채널 응답을 나타내고, *는 쥘레복소수를 의미한다. 이렇게 구해진 \bar{C}^T , \bar{C}^R 의 최소값을 이용하여 채널 용량과 가까운 최대치를 계산할 수가 있다.

4.2 결정적 MIMO 채널에서 채널 용량 분석

본 절에서는 그림 2에서 보인 가시 영역과 비가시 영역을 갖는 실내 복도 환경에서의 정해진 송수신기 위치와 안테나 방향성에 따른 채널 용량을 비교 분석한다. 우선, 2절에서 설명한 광선 추적법을 사용하

여 SISO 채널의 채널 응답을 계산하였다. 이때 SISO의 경우 송수신 안테나의 패턴 및 편파 특성이 고려되었다. 이렇게 얻어진 SISO 채널 응답을 토대로 가상의 다중 안테나를 가정하여, 각 경로에 따른 위상 변화를 곱해 주게 되면, MIMO 채널의 각 부 채널 응답 행렬을 식 (3)을 이용하여 구성할 수가 있다. 그리고 이로부터 식 (7)을 이용해 상관 행렬을 구하고, 식 (6)을 이용하여 결정적 MIMO 채널에 대한 채널 용량의 최대치를 구할 수가 있다.

이와 같은 방법을 이용하여 앞서 측정이 이루어진 세 개 지점에서의 MIMO 채널 용량을 추정한다. 그림 6에서는 3개 수신기 위치에서의 다중 안테나의 이격거리에 따른 상관계수를 비교하였다. 비가시 영역으로 들어감에 따라서 채널간의 상관도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 가시영역의 경우, 주변의 철문에 의한 반사파 영향으로 비가시 영역에 비해 송수신 각도의 퍼짐 현상이 커짐에 따라 공간적 채널 상관도가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 공간적 상관의 영향에 의한 안테나 간격에 대한 채널 용량 값은 그림 7에 나타내었다. 이때, 채널 용량 공식에서 SNR 값은 광선 추적 알고리즘으로부터 계산될 수 있고, 비가시 영역으로 수신기가 이동할수록 SNR 레벨이 낮아짐으로 인해 채널 용량이 줄어드는 현상이 나타난다. 하지만 가시 영역의 경우, 안테나 간격이 0.5 λ 인 경우에는 공간적

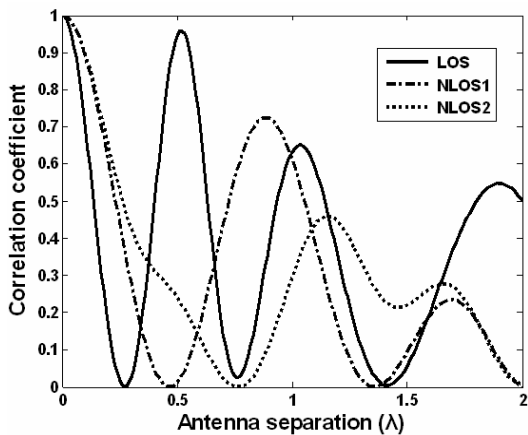


그림 6. 세 개의 수신기 위치에서 안테나 이격거리에 따른 상관 계수

Fig. 6. Correlation coefficient with respect to antenna separation at three different receiver positions.

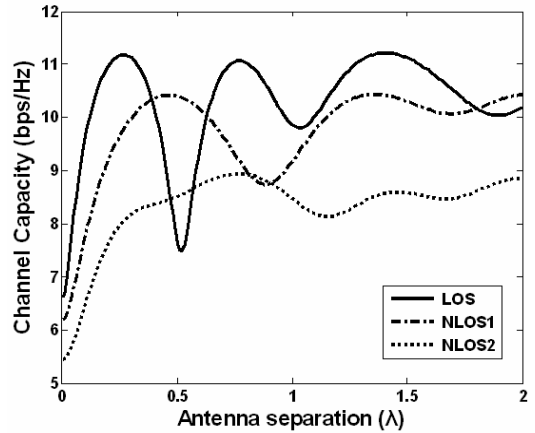


그림 7. 세 개의 수신기 위치에서 안테나 이격 거리에 따른 채널 용량

Fig. 7. Channel capacity with respect to antenna separation at three different receiver positions.

상관의 영향으로 인해 채널 용량이 매우 낮은 특성이 나타난다.

그림 8과 그림 9에서는 두 지점에서 다중화시킨 안테나들의 방향성에 따른 채널 용량의 변화를 4가지 송수신기의 조합을 가정하여 비교하였다. 안테나의 방향성에 따라 공간적 상관도가 달라짐으로써 채널 용량에도 많은 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다. 이때, 안테나 방향의 좌표계는 그림 2를 참조한다.

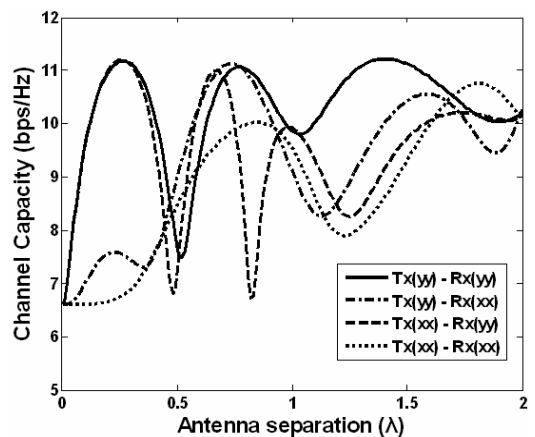


그림 8. LOS 위치에서 송수신기 방향 조합에 따른 채널 용량 비교

Fig. 8. Comparison of channel capacities for four different direction combinations at LOS.

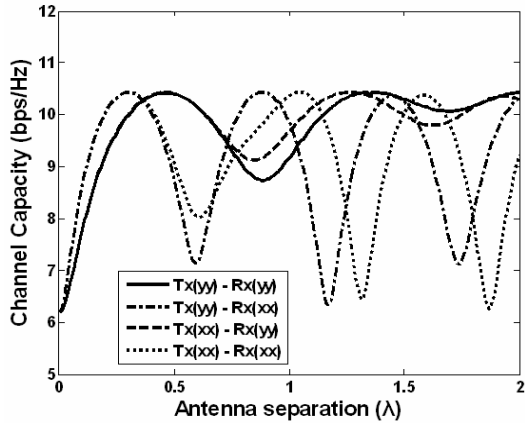


그림 9. NLOS1 위치에서 송수신기 방향 조합에 따른 채널 용량 비교
 Fig. 9. Comparison of channel capacities for four different direction combinations at NLOS1.

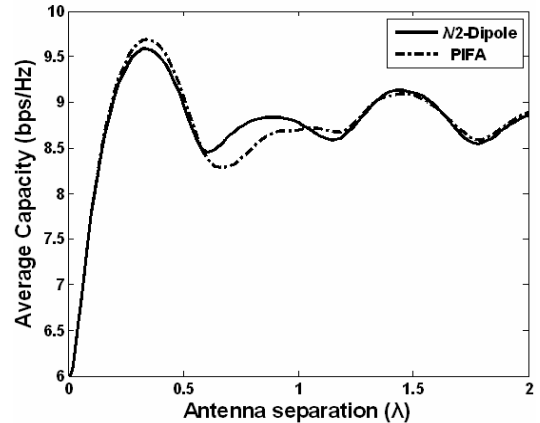


그림 10. MIMO 시스템의 안테나 이격 거리에 대한 평균 채널 용량
 Fig. 10. Averaged channel capacity with respect to antenna separation.

4.3 결정적 채널 환경에서 안테나 이격거리의 최적화

지금까지와 같이 검증된 광선 추적 알고리즘을 이용하여 송수신기의 위치가 정해진 결정적인 채널에 대한 채널 용량의 추정이 가능하다는 것을 보였다. 이러한 방법은 측정에 의한 방법이나 확률적으로 Monte-Carlo simulation을 통해 평균 채널 용량을 구하는 방식에 비하여 빠르고, 비교적 정확한 특성을 가진다.

이 방법을 이용하여, 그림 2와 같이 송신기가 정해져 있고 수신기가 움직이는 상황을 가정하여 수신기 위치에 따른 채널 용량의 통계를 통해 그림 2와 같은 복도 환경에서 송수신 안테나의 최적화된 안테나 간격을 추정할 수 있다. 이 때, 수신기의 위치는 그림 2의 좌표계에서 A(9.75, y, 1), B(10.75, y, 1), C(9.75, y, 1.7), D(9.75, y, 1)와 같은 네 가지 경로에서 25개씩 100개의 지점을 SNR 비가 낮은 비가시 영역을 위주로 정하였고, 그림 9 및 10과 같이 송수신 안테나의 4가지 방향성을 고려하여 총 400개의 샘플을 취하여 복도 환경에서의 평균 채널 용량을 도출하였다. 이때 x좌표는 복도 보행자가 이동할 확률이 높은 경로를 선택하였고, z좌표는 수신자가 서 있는 경우와 앉아 있을 경우를 가정하여 1.7 m와 1 m를 고려하였다. 또한 SNR 값에 따른 채널 용량의 영향을 배제하고, 공간적 상관성에 따른 채널 용량의 변화를

보기 위해 채널 용량을 평균하는 과정에서 각 샘플들의 SNR 값을 30 dB로 고정하였다.

이렇게 수신기의 위치에 따라 평균된 채널 용량은 그림 10에 나타내었다. 안테나에 따른 패턴 영향을 비교하기 위하여 반파장 다이폴 안테나와 QMSA-PIFA 형태 안테나의 패턴을 고려하여 시뮬레이션 하였고, 안테나 이득차이에 따른 수신 SNR 차이는 고려하지 않았다. 그 결과 두 안테나간의 약간의 차이는 있었지만 공통적으로 0.34 λ의 안테나 간격에서 채널 용량의 평균값이 최대값을 갖는 것으로 확인되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 3차원 광선 추적법을 이용하여 정해진 실내 복도 환경에서의 시간 지연 확산, 수신각과 송신각 등의 공간적 특성을 나타내는 개념들을 분석함으로써 MIMO 채널을 모델링하였으며, 실험적 측정을 통해 얻은 시간 지연 확산값을 계산 값과 비교함으로써 광선 추적법의 정확성을 검증하였다. 또한 몇 가지 수신기 위치에 따른 공간적 상관 계수를 구하고 이로부터 채널 용량의 최대치를 계산하여 수신기의 위치적 특성에 따른 결과를 비교하였다. 그 결과 송수신 각도의 퍼진 정도의 차이에 따른 공간적 상관 계수의 변화와 평균 수신 SNR에 따라서 채널 용량이 큰 차이를 보이는 것을 확인하였고, 다

중화시킨 안테나의 방향성에 따라서도 채널 용량은 많은 차이를 보였다. 그리고 시간과 비용이 적게 드는 광선 추적법의 장점을 살려 400개의 수신기 위치에 따른 결과 샘플을 계산한 후에 평균 채널 용량을 얻어, 본 논문에서 해석한 실내 복도 채널 모델에서 최적화된 다중 안테나 이격거리를 얻었다. 이 과정에서 반파장 다이폴 안테나와 QMSA-PIFA 안테나의 편파 및 패턴을 고려하였다. 이와 같은 방법은 안테나 특성을 고려하여 다양한 실내 구조에서 최적화된 다중 송수신 안테나의 이격거리를 추정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] R. Stridh, K. Yu, and P. Karlsson, "MIMO channel capacity and modeling issues on a measured indoor radio channel at 5.8 GHz", *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 4, no. 3, May 2005.

[2] D. Chizhik, F. Rashid-Farrokhi, J. Ling, and A. Lozano, "Effects of antenna separation on the capacity of BLAST in correlated channels", *Commun. Lett.*, vol. 4, pp. 337-339, Nov. 2000.

[3] D. Shiu, G. J. Foschini, M. J. Gans, and J. M. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems", *IEEE Trans. Communications*, vol. 48, no. 3, Mar. 2000.

[4] C. N. Chuah, D. N. C. Tse, J. M. Kahn, and R.

Valenzuela, "Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, pp. 637-650, Mar. 2002.

[5] R. A. Kipp, M. C. Miller, "Shooting-and-bouncing ray method for 3D indoor wireless propagation in WLAN applications", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 2, pp. 1639-1642, Jun. 2004.

[6] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, 1989.

[7] C.-N. Chuah, D. N. C. Tse, "Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading", *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 48, no. 3, Mar. 2002.

[8] C. Waldschmidt, T. Fugen, and W. Wiesbeck, "Spiral and dipole antennas for indoor MIMO-systems", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 1, 2002.

[9] L. H. Christopher, G. C. Michael, "A model for predicting the power delay profile characteristics inside a room", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 48, no. 4, Jul. 1999.

[10] S. Loyka, A. Kouki, "On the use of JENSEN's inequality for MIMO channel capacity estimation", *2001 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, pp. 13-16, May 2001.

김 상 근



2005년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2005년 2월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나, 전파산란, 이동통신

오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 컴퓨터과학과 (공학박사)

1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] 전파산란, 마이크로파 원격탐사, 안테나