

전파예측모델을 이용한 MIMO 채널 분석 방법

MIMO Channel Analysis Method using Ray-Tracing Propagation Model

오 상 훈 · 명 로 훈

Sang-Hoon Oh · Noh-Hoon Myung

요 약

본 논문에서는 3D 광선추적법에 기반한 전파 예측 모델을 이용하여 MIMO 채널 특성을 해석적으로 분석하는 방법을 제시한다. 경로들의 위상차를 고려하여 채널간 discrete spatial correlation을 계산하고 이를 이용하여 Jensen 부등식을 이용해 평균 MIMO 채널 용량의 최대치를 추정한다. 본 해석 모델은 측정을 통한 통계적 접근이나 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통한 확률적 접근을 하지 않는 결정적인 모델이므로 시간과 비용측면에서 큰 효율을 가진다. 또한 전파 이론에 기초한 방법이므로 채널 용량에 영향을 미칠 수 있는 안테나 패턴이나 편파, 상호 간섭, 안테나 구조 등의 파라미터를 정량적으로 분석할 수 있는 장점이 있다. 본 모델은 MIMO 시스템에 적합한 안테나 구조 등의 개발에 이용될 수 있을 것이다.

Abstract

This paper proposes a method that estimates MIMO channel characteristics analytically using a 3D ray tracing propagation model. We calculate the discrete spatial correlation between sub-channels by considering phase differences of paths, and using this, estimate the mean capacity upper bound of MIMO channel by Jensen's inequality. This analysis model is a deterministic model that do not approach stochastically through measurement nor approach statistically through Monte-Carlo simulations, so this model has high efficiency for time and cost. And based on the electromagnetic theory, this model may analyze quantitatively the parameters which can affect the channel capacity - antenna pattern, polarization, mutual coupling, antenna structure and etc. This model may be used for the development of an optimal antenna structure for MIMO systems.

Key words : MIMO, Ray-Tracing, Correlation, Channel

I. 서 론

차세대 무선 통신 환경에서 대역폭의 증가 없이 더 높은 품질과 더 빠른 속도의 데이터 전송을 위해 보다 진보된 형태의 통신 기술을 필요로 한다. 이러한 요구에 부응하기 위해 개발되어진 MIMO(Multi-Input Multiple-Output) 시스템은 송수신단에 공간 다이버시티 개념을 적용하여 주파수 대가없이 채널 용량을 획기적으로 늘리기 위한 기술로 최근 많은

각광을 받고 있다. MIMO 시스템은 송수신단에 다중 안테나(Multi-Element Antenna: MEA)를 사용하고 각 안테나 성분은 서로 다른 정보 데이터를 전송함으로써 각 sub-channel이 이론적으로 독립일 경우, 전체 채널 용량은 안테나 성분 개수-송수신 배열의 최소 수에 따라 선형적으로 증가하게 된다^[1]. 그러나 실제 환경에서 MIMO 채널 용량은 몇 가지 요소들에 의해 제한되게 되는데, 이 중 가장 중요한 것은 sub-channel간의 상관(correlation)이다. 송수신점간의 전

「이 연구는 KAIST의 MICROS 센터를 통하여 한국과학기술재단으로부터 재정 지원을 받아 수행되었음.」

한국과학기술원 전자전산학과(Department of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST)

· 논문 번호 : 20040522-04S

· 수정완료일자 : 2004년 8월 3일

파는 다중경로를 거치게 되며, 이러한 다중 경로 산란이 공간적으로 충분히 넓게 분포될수록 수신 신호 간에 상관은 감소하고, 채널 용량은 증가하게 된다. 현재까지의 MIMO 채널 모델링 방법들을 살펴보면, 특정 환경에서의 전파 측정을 통해 채널의 통계적인 특성을 추출하는 통계적 방법과, 주위의 산란 환경을 적절히 표현할 수 있는 몇 개의 파라미터를 설정하여 해석적으로 접근하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 측정을 통한 통계적 방법은 측정이 이루어진 시나리오 이외의 환경에의 호환성 문제와 측정에 소요되는 비용 등의 단점이 있고, 산란 모델링을 통한 해석적 방법은 실제 환경을 정확히 반영하기 어렵고 안테나의 전기적 특성을 고려하기 어려운 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 보다 엄격한 해석적 방법으로서 3D-광선추적법에 기반한 전파 예측 모델^[2]을 이용하여 MIMO 시스템 성능에 영향을 미치는 다중 경로 산란을 비롯한 공간적 채널 특성을 해석하는 방법을 제안한다. 광선 추적법은 기본적으로 점대점 해석법으로 site-specific하고 결정적인(deterministic) 특성을 가지는데 이를 통해 실제 환경에서 안테나 구조 및 위치 방향 등에 따른 채널 특성을 분석하고 채널 용량을 정량적으로 추정하는 방법을 제시한다.

II. MIMO 채널 분석 방법

송수신단에 각각 N_T , N_R 개의 안테나 성분들이 존재하고 각 송신 안테나는 같은 세기를 가지는 신호를 송신한다고 가정할 경우, 채널 용량은 다음의 식으로 얻어진다^[1].

$$C = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^* \right] \right) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{H} 는 $N_R \times N_T$ normalized channel matrix이고, \mathbf{I}_{N_r} 은 $N_R \times N_R$ identity matrix를 나타낸다. ρ 은 수신단에서의 평균 SNR(Signal-to-noise ratio)이고, "*"는 Hermitian 연산자이다.

2-1 채널 용량 최대치(Upper Bound) 산출

식 (1)은 확률과정 표현식으로 채널 용량을 계산하기 위해서는 Monte-Carlo 시뮬레이션 등을 통한 통계적 접근이 필요하다. 즉, 평균적인 채널 용량을

계산하기 위해서는 다음의 수식으로 계산되어야 한다^[3].

$$E[C] = E \left[\log_2 \left(\det \left[\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^* \right] \right) \right] \quad (2)$$

$E[\cdot]$ 는 기대값(expectation) 연산자이다. 이러한 통계적인 표현식을 전파 예측 모델을 통한 결정적인(deterministic) 채널 환경에서 이용하기 위해서는 closed-form 표현식이 필요하게 된다. Jensen 부등식(Jensen's inequality)과 'log det'의 concave한 특성을 이용하면, 다음의 수식을 얻을 수 있다^[3].

$$E[C] \leq \bar{C}_R = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_T} E[\mathbf{H}\mathbf{H}^*] \right] \right) \quad (3)$$

$E[\mathbf{H}\mathbf{H}^*] = \mathbf{R}'$ 로 정의하면 행렬 \mathbf{R}' 의 각성분 r'_{ij} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r'_{ij} = \sum_{k=1}^{N_T} E[h_{ik}h_{jk}^*] \quad (4)$$

여기서 h_{ij} 는 j 번째 송신 안테나 성분과 i 번째 수신 안테나 성분사이의 sub-channel 임펄스 응답을 나타낸다. 식 (4)에서도 알 수 있듯이 위 식들은 수신단에서의 상관만을 고려한 식으로, 송신단의 상관만을 고려할 경우 같은 과정으로 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$\bar{C}_T = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_T} E[\mathbf{H}^*\mathbf{H}] \right] \right) \quad (5)$$

$$r''_{ij} = \sum_{k=1}^{N_T} E[h_{ik}^*h_{jk}] \quad (6)$$

결국 \bar{C}_R , \bar{C}_T 의 최소값으로서 평균 채널 용량에 근접한 최대치(upper bound)를 추정할 수 있다^[3]. 이와 같은 과정을 통해 많은 계산량을 요구하는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하지 않고 해석적으로 채널 용량의 경향을 추정할 수 있어 비용과 시간면에서 효율성을 가진다.

2-2 채널 상관(Correlation) 추정

식 (4), (6)의 각 sub-channel 간의 상관을 추정하기 위해서 discrete spatial correlation을 이용한다^[4]. 수신 신호의 페이딩은 주로 수신 안테나의 움직임에 따라

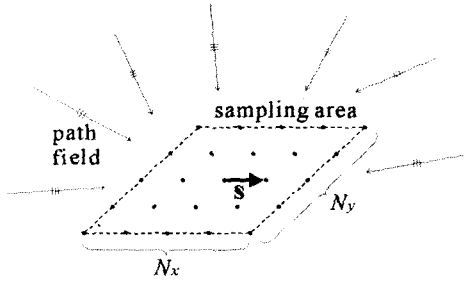


그림 1. 샘플링 영역 및 샘플링 위치 벡터
Fig. 1. Sampling area and positioning vector.

나타나므로, 수신 안테나 신호의 ergodicity가 성립한다고 가정하면, time averaging 대신 공간적인 샘플링을 통해 각 sub-channel간 envelope correlation을 추정할 수 있다^[4]. 참고 문헌 [4]의 공간적인 샘플링을 그림 1과 같이 안테나의 각 성분을 중심으로 한 2차원 평면(sampling area)으로 확장하여 수신 필드를 discrete sampling할 경우 두 수신 신호간(v_1, v_2)의 상관은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{R}(v_1, v_2) = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \{v_1(i, j) - \bar{v}_1\} \cdot \{v_2(i, j) - \bar{v}_2\}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \{v_1(i, j) - \bar{v}_1\}^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \{v_2(i, j) - \bar{v}_2\}^2 \right)}} \quad (7)$$

$$v_m(i, j) = \sum_{l=1}^L p_l \cdot \exp\{-2\pi j \cdot (\mathbf{u}'_l \cdot \mathbf{s}_{ij})\} \quad (8)$$

$$\bar{v}_m = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} v_m(i, j) \quad (9)$$

$v_m(i, j)$ 은 m 번째 안테나 성분의 (i, j) 번째 샘플링 위치에서의 수신 필드를 나타내고 \bar{v}_m 는 샘플링 필드들의 평균값을 나타낸다. 수신 필드 $v_m(i, j)$ 은 m 번째 안테나 성분에 입사되는 각 경로 필드에 샘플

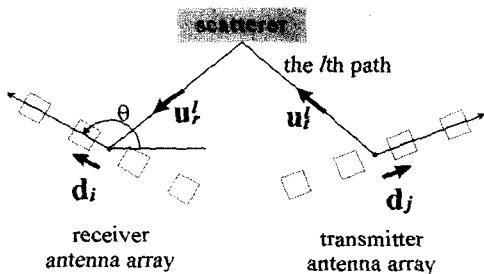


그림 2. l 번째 경로의 벡터 파라미터 정의
Fig. 2. Definition of vector parameters on the l th path.

링 위치에 따른 위상 변화 텀을 곱한 후, 모든 경로 필드를 중첩하여 얻어진다. 여기서는 안테나 배열 스케일에 비해 산란체와 안테나와의 거리가 상당히 멀다고 가정하여, 각 경로의 입사 파형은 국소 평면파로 근사한다. 즉, 인근 안테나 성분이나 샘플링 위치에 따른 각 경로 필드의 크기 변화는 거의 없고 위상만 달라진다고 가정한다. 이 경우 광선 추적은 송수신 안테나 배열의 중심점간에만 이루어지게 되어 계산 시간의 절약을 가져올 수 있다. 식 (8)에서 p_l 은 l 번째 경로의 임펄스 응답으로 2-3장에서 설명한다. \mathbf{u}'_l 은 수신점에 도달하는 l 번째 경로의 방향 단위 벡터, \mathbf{s}_{ij} 는 샘플링 위치 벡터(sampling positioning vector)이다(그림 1). 샘플링 위치 벡터의 시작점은 해당 안테나 성분 위치이고, 샘플링 횟수 N_x, N_y 는 20회, $\lambda/4$ 간격으로 샘플링하여 전체 $5\lambda \times 5\lambda$ 의 sampling area를 갖도록 설정하였다.

2-3 각 경로의 임펄스 응답

광선 추적은 송수신 안테나 배열의 중심점간에 이루어지므로 각 안테나 성분에 도달하는 경로 필드들은 그 크기는 같지만 위상은 다른 특성을 가진다. 그림 2로부터 각 sub-channel h_{ij} 의 l 번째 경로의 임펄스 응답을 구해보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p'_{ij} = A'_{ij} \exp\{-2\pi j \cdot (\mathbf{u}'_l \cdot \mathbf{d}_i)\} \exp\{2\pi j \cdot (\mathbf{u}_l \cdot \mathbf{d}_j)\} \quad (10)$$

여기서 A'_{ij} 은 i 번째 수신 안테나와 j 번째 송신 안테나의 패턴 및 편파 등을 고려한 l 번째 경로의 임펄스 응답이다. 여기에 각 안테나 성분의 위치에 따른 위상 변화 텀이 곱해져 식 (10)이 얻어진다. $\mathbf{u}'_l, \mathbf{u}_l$ 은 각각 송수신점에서의 l 번째 경로의 방향 벡터이고 $\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_j$ 는 각각 i 번째 수신 안테나 성분과 j 번째 송신 안테나 성분의 중심점으로부터의 위치 벡터이다(그림 2). 즉, 각 sub-channel h_{ij} 는 공통적으로 L 개의 경로를 가지게 되나 각 경로의 위상은 채널에 따라 다르게 되고, 이로 인해 각 채널은 서로 다른 페이딩을 겪게 된다.

2-4 채널 분석 과정

MIMO 채널 분석 과정은 앞서 기술한 방법들을 역순으로 처리하여 이루어진다. 먼저 입력된 건물

정보를 이용해 송수신 안테나 배열 중심점간의 광선 추적을 수행한다. 해석에 사용한 전파 예측 모델은 참고문헌 [2]에 기술된 알고리즘을 이용하여 구성되었다. 각 sub-channel들은 해당 송수신 안테나 성분의 특성(패턴, 편파)을 고려하여 계산된 필드값을 가지는 경로 리스트를 가지는데, 각 경로 리스트에는 식 (10)에 의해 안테나 성분 위치에 따른 위상 변화 텀이 곱해진다. 이렇게 얻어진 채널 행렬(의 각 성분은 경로 리스트를 가진다)는 Frobenius' norm을 통해 normalized되고, 이 과정에서 평균 수신 SNR을 얻는다.^[5] 이 과정은 일반적이므로 구체적 설명은 생략한다. 다음으로 안테나 배열에서 발생하는 상호 결합(mutual coupling) 문제를 고려할 수 있는데, 이는 결합 행렬을 이용하여 간단히 포함될 수 있다^[6].

$$\mathbf{H}' = \mathbf{C}_R \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{C}_T \quad (11)$$

여기서 \mathbf{C}_R 은 수신 안테나에서의 $N_R \times N_R$ 결합 행렬이고, \mathbf{C}_T 는 송신 안테나에서의 $N_T \times N_T$ 결합 행렬이다. 위 식을 통해 채널 행렬의 각 성분의 경로 리스트의 필드값이 수정된다. 다음 식 (7)~(9) 과정을 통해 각 sub-channel간의 discrete spatial correlation 값을 계산하게 되고, 이를 통해 \mathbf{R}'_R , \mathbf{R}'_T 행렬을 얻는다. 이를 이용하여 식 (3), (5)를 통해 $\overline{\mathbf{C}}_R$, $\overline{\mathbf{C}}_T$ 를 계산하고, 이들의 최소값으로서 전체 MIMO 채널의 평균 용량 최대치를 추정하게 된다.

III. 해석 결과

이상의 내용을 프로그램화하여 몇 가지 경우에 대한 해석 결과를 보이도록 한다. 그림 3은 해석에 이용된 건물 정보 및 송수신점 위치를 나타낸다. 그림 4의 결과는 Tx1, Rx1 안테나 성분들(2-element)을

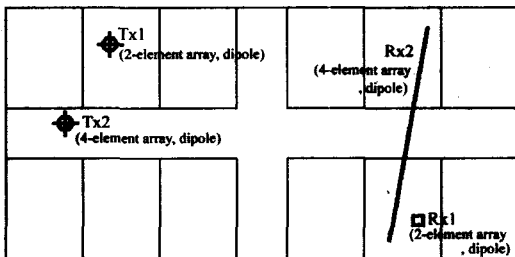


그림 3. 해석 환경
Fig. 3. Simulation environment.

일반적인 다이폴 패턴과 수직 편파를 가지도록 설정하고, 수신 안테나의 배열 간격과 방향을 달리하면서 h_{11} , h_{21} 사이의 상관관을 계산한 결과이다. 상관관은 안테나 간격에 따라 주기적으로 변화하며 감소하게 되고, 안테나의 방향에 따라 변화가 많이 달라지는 것을 볼 수 있다.

안테나 다이버시티 효과를 높이기 위해 이용되던 듀얼 편파 안테나의 성능 평가를 위해 Tx1, Rx1 안테나의 각 성분의 편파를 수직과 수평으로 엇갈리게 변경하여 같은 환경에서 해석한 결과를 그림 5에 보이고 있다. 그림 4의 수직 편파만으로 설정했을 경우에 비해 안테나간 상관관이 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 이것으로 보아 듀얼 편파는 MIMO 채널 용량 향상에 도움이 됨을 예상할 수 있다.

다음으로 그림 6~8은 같은 건물에서 수신점을 Rx2 라인을 따라 이동시키면서 해석한 결과를 보여 준다. Tx2, Rx2 송수신 안테나는 4개의 성분을 가지는 선형 배열 안테나이고 0.5λ 의 간격을 가진다. 해석 주파수는 5.25 GHz이고, 해석 경로는 NLOS와 LOS를 교대로 가지게 된다. 그림 6은 모든 안테나 성분을 수직 편파로 설정하고 상호 결합을 고려하지

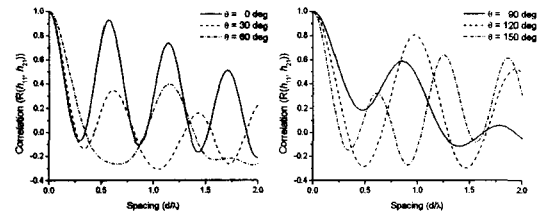


그림 4. 안테나 간격과 방향에 따른 상관의 변화
Fig. 4. The correlation changes vs. antenna spacing and orientation.

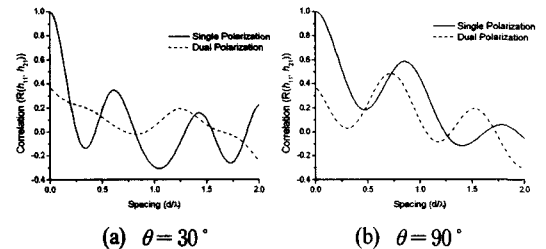


그림 5. 듀얼 편파를 적용했을 경우의 상관 변화
Fig. 5. The correlation changes in case of applying dual polarization.

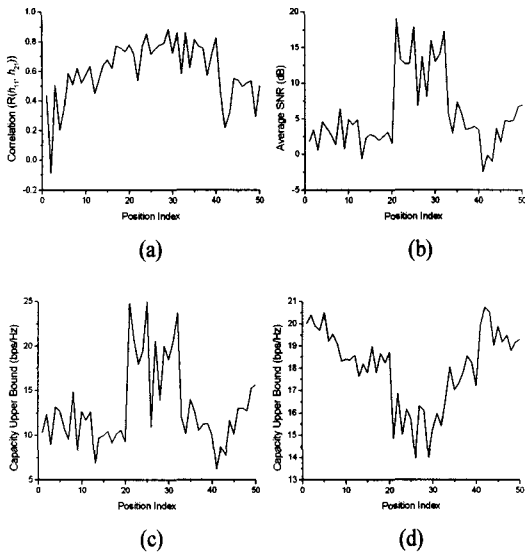


그림 6. 위치에 따른 (a) 상관도, (b) SNR, (c) 채널 용량, (d) SNR=10 dB일 때의 채널 용량
 Fig. 6. The changes of the (a) correlation, (b) SNR, (c) capacity, (d) capacity in case of fixing SNR =10 dB, vs. the receiver position.

않았을 경우의 해석 결과를 보여준다. LOS 영역 (position index 20~32 사이)에서 상관은 증가하는 경향을 보이지만, 평균 SNR이 크게 높아지므로 전체 채널 용량은 높아지게 되는 것을 볼 수 있다. SNR의 차이가 매우 커서 다이버시티에 의한 영향을 확인할 수 없으므로, 전체 구간에서의 SNR을 일정하고 고정시키고(SNR=10 dB) 용량의 변화를 살펴본 결과는 그림 6(d)와 같다. LOS의 경우 상관의 증가로 채널 용량이 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 앞에서와 같은 듀얼 편파를 사용했을 때의 상관과 용량의 변화를 보여준다. 앞에서 예상한 대로 상관은 크게 떨어지며 용량은 증가하는 것을

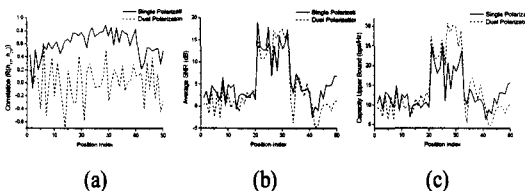


그림 7. 듀얼 편파를 적용했을 경우의 (a) 상관도, (b) SNR, (c) 채널 용량의 변화
 Fig. 7. The changes of the (a) correlation, (b) SNR, (c) capacity, in case of applying dual polarization.

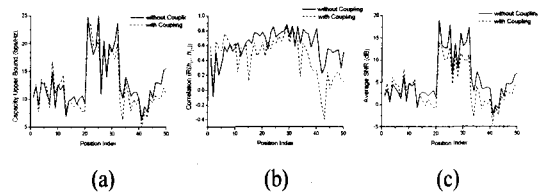


그림 8. 상호 결합을 고려했을 경우의 (a) 상관도, (b) SNR, (c) 채널 용량의 변화
 Fig. 8. The changes of the (a) correlation, (b) SNR, (c) capacity, in case of considering mutual coupling.

확인할 수 있다.

다음으로 안테나 배열의 상호 결합을 고려했을 경우를 비교해 본다. 그림 8은 그림 6의 설정에 외부에서 계산된 결합 행렬을 채널에 반영시켜 계산한 결과이다. 상관은 다소 줄어들지만^[6] SNR의 감소로 전체 채널 용량은 큰 변화가 없었다. 상호 결합과 채널 용량의 관계는 좀더 연구가 필요할 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광선 추적법에 기반한 전파 예측 모델을 이용하여 MIMO 채널 특성을 해석적인 방법으로 추정하는 과정을 정립하여 제시하였다. 본 모델은 추정을 거치지 않으므로 채널 분석에 필요한 비용과 시간을 절약할 수 있으며, 채널 특성이 ergodicity를 만족한다면 Monte-Carlo 시뮬레이션을 거치지 않고 비교적 간단한 계산으로 안테나 구조 및 환경에 따른 채널 간 상관 및 채널 용량의 상대적인 경향을 추정할 수 있다는 장점이 있다. Ergodicity는 대부분의 실제 환경에서 성립한다고 알려져 있다. 채널 특성은 송수신 안테나의 위치와 방향에 따라 달라질 것으로 예상되는데, 이와 같은 모델을 사용하여 site-specific하고 orientation-specific한 채널 특성 분석이 가능하다. 또한 본 모델은 전파 이론에 기초하므로 시스템 성능에 영향을 미칠 수 있는 여러 전파 환경 파라미터-복사 패턴, 편파, 상호 결합, angular spread, 안테나 구조 등-에 대한 정량적인 분석이 가능한 장점이 있다. 이를 통해 MIMO 시스템에 적합한 안테나 구조를 개발하는데 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] G. J. Foschini, M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Personal Communications*, vol. 6, pp. 311-335, 1998.

[2] H. W. Son, N. H. Myung, "A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction model", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 8, Aug. 1999.

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

[4] G. E. Corazza, V. Degli-Esposti, M. Frullone and G. Riva, "A characterization of indoor space and frequency diversity by ray-tracing modeling", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 3, Apr. 1996.

[5] G. D. Durgin, *Space-Time Wireless Channels*, Chapter 9, Prentice Hall, pp. 244-246, 2003.

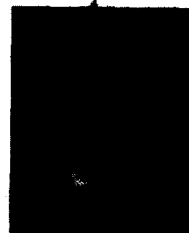
[6] T. Svantesson, A. Ranheim, "Mutual coupling effects on the capacity of multielement antenna systems", *Acoustics, Speech, and Signal Processing 2001 Proceedings (ICASSP '01) IEEE International Conference on*, vol. 4, pp. 2485-2488, May 2001.

오 상 훈



1998년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학사)
 2000년 8월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학석사)
 2000년 9월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정
 [주 관심분야] 전파 예측 모델, 채널 모델링, 디지털 방송 및 통신, MIMO 시스템 등

명 로 훈



1976년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 12월: 미국 Ohio State University 전자공학과 (공학석사)
 1986년 8월: 미국 Ohio State University 전자공학과 (공학박사)
 1986년 9월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 교수
 [주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나, 이동 및 위성 통신, EMI/EMC/EMS 등