

OFDM 기반 다중 안테나 시스템의 링크레벨 성능검증 - MIMO OFDM vs. Smart Antenna OFDM

준회원 박성호*, 김규현*, 허주*, 종신회원 장경희*

Link-level Performance Verification of the Multiple Antenna Systems - MIMO OFDM vs. Smart Antenna OFDM

SungHo Park*, KyooHyun Kim*, Joo Heo* *Associate Members,*
KyungHi Chang* *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반 다중 안테나 시스템의 링크레벨 성능 분석을 위하여 실제 전파 환경과 유사한 특성을 갖는 Ray-tracing 방식 채널의 하나인 SCM(Spatial Channel Model) 채널을 구현한다. 3GPP & 3GPP2 Spatial Channel AHG(Ad-hoc Group)에서 시스템레벨 성능 비교용으로 제안한 SCM 채널을 링크레벨 성능의 비교·분석을 위하여, 본 논문에서는 시스템레벨 채널에 대한 채널 계수 및 파라미터들을 링크레벨 성능 비교용으로 변환하여 구현한다. 모의실험을 통하여 구현한 SCM 채널의 특성을 검증하고, 이를 이용하여 기존의 OFDM 기반 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 적용 시스템 및 스마트 안테나 적용 시스템에서의 실제적인 링크레벨 성능을 분석하고, 정확한 비교·검증을 위하여 SCM 채널과 동일한 파라미터를 적용한 I-METRA 채널 및 독립 채널 상황에서의 링크레벨 성능을 함께 비교·분석한다. MIMO 및 스마트 안테나 적용 시스템에 대하여 여러 채널 환경에서 채널 상관도에 따른 링크레벨 성능을 분석함으로써, 채널 상관도의 영향에 따라 주어진 환경에 적합한 다중 안테나 시스템을 제안한다.

Key Words : OFDM, MIMO, Smart Antenna, Ray-tracing, SCM, STBC, Beamforming

ABSTRACT

This paper implements SCM(Spatial Channel Model), a kind of ray-tracing method which has characteristics similar to realistic wave propagation environments, for link-level performance analysis of OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) based multiple antenna systems. The SCM is proposed by 3GPP & 3GPP2 Spatial Channel AHG(Ad-hoc Group) for system-level performance validation. In this paper, we modify the system level parameters and channel coefficient of SCM to compare the link-level performances of OFDM based multiple antenna systems. Through computer simulations, we manifest the implemented SCM channel characteristics. We analyze a realistic link-level performance of OFDM based conventional MIMO(Multiple Input Multiple Output) system and smart antenna system in the implemented channel. We also include the link-level performance of OFDM based multiple antenna systems in I-METRA(Intelligent Multi Element Transmit and Receive Antenna) and independent channel environments with the same system parameters. We suggest appropriate multiple antenna systems in the given environment by comparing the link-level performance in the spatial channels that have different channel correlation values.

* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10685-0) 지원으로 수행되었음.

* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신연구실 (khchang@inha.ac.kr)

논문번호: KICS2006-01-027, 접수일자: 2006년 1월 13일, 최종논문접수일자: 2006년 5월 11일

I. 서론

차세대 무선 전송 시스템은 한정된 자원을 최대한 효율적으로 이용하면서, 서로 다른 여러 전파 환경에서 높은 데이터 전송률을 가지고 전송 신호의 왜곡 없이 많은 사용자들을 지원할 수 있어야 하기 때문에, 효율적인 전송 시스템이 계속해서 요구되어왔다.

최근 전송률을 높이기 위해 많이 사용하는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식은 상호 직교성을 갖는 다수의 반송파에 데이터를 실어 전송하는 기법으로, 주파수 효율을 높일 수 있고 보호 구간을 뒀으로써 주파수 선택적 페이딩 채널을 플랫 채널로 간주할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 간단한 단일 탭 등화기를 사용하여 고속 전송 시 급격히 증가하는 심볼간 간섭의 보상이 가능하며, FFT를 사용하여 고속으로 구현할 수 있기 때문에 최근 고속 데이터 무선 통신을 위한 전송방식으로 적합하다^[1].

이러한 OFDM 방식을 기반으로 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 또는 스마트 안테나 기술 등을 결합함으로써 채널 용량의 증가와 시스템의 성능 향상을 가져올 수 있는 방법들이 많이 연구되고 있다^[2]. OFDM 기반 MIMO 시스템은 송·수신 측에서 다수의 안테나를 사용함으로써 제한된 주파수 자원 내에서 주파수를 늘리지 않고도 대용량의 데이터를 전송할 수 있으며, 독립적인 다중 경로로 인한 송·수신 다이버시티 이득을 얻을 수 있게 된다. 일반적으로 MIMO 시스템이 고속으로 신호를 전송할 경우 심볼간 간섭이나 주파수 선택적 페이딩에 약하다는 단점을 가지고 있지만, 심볼간 간섭이나 주파수 선택적 페이딩에 강한 OFDM 변조 방식을 사용함으로써 성능을 향상시킬 수 있다^[3].

MIMO 시스템과 더불어 시스템의 성능 향상을 제공하는 스마트 안테나 시스템의 적응 빔 형성 기법은 안테나 어레이에 수신된 신호에 MSE (Mean Square Error)를 최소화 시키는 최적의 가중치를 곱해줌으로써 원하는 유저의 신호에 대해서는 큰 이득을 갖는 빔을 형성해 주는 반면 원치 않는 유저, 즉 간섭 신호에 대해서는 Nulling을 형성함으로써 간섭을 최소화 시키고, 채널 용량을 증가시키게 되어 시스템의 성능 향상을 제공한다. 또한, 수신단의 안테나 수 증가에 따른 어레이 이득을 얻을 수 있는 장점을 가진 시스템이다.

이러한 다중 안테나 시스템에 대하여 현실적인

성능을 분석하기 위해서 이에 적합한 채널 환경을 정확히 묘사할 수 있는 채널 모델이 필수적이다. 다중 안테나 시스템은 그 특성상 공간 정보를 요구하게 된다^[4].

이를 활용 가능한 대표적인 채널 모델로는 Correlation-based 채널 모델인 I-METRA (Intelligent Multi Element Transmit and Receive Antenna) 채널 모델과 Ray-tracing 채널 모델인 SCM (Spatial Channel Model) 채널 모델이 있다^[5].

기존의 다중 안테나 채널 모델로 많이 사용되어 온 I-METRA 채널은 송·수신 안테나에 대한 채널 상관도를 이용한 채널 모델이다. 이에 반해 SCM 채널은 Ray-tracing 기반의 다중 안테나 환경용 채널 모델로써 실제의 전파 환경 특성과 유사하게 신호의 전파 특성을 각각의 경로로써 나타내는 특징이 있다.

본 논문의 2장에서는 다중 안테나 시스템에 적합한 채널 모델에 대하여 설명하고, 3장에서는 SCM 채널 모델링을 위하여 3GPP & 3GPP2 Spatial Channel AHG (Ad-hoc Group)에서 제공한 기본적인 링크레벨 모의실험을 위한 파라미터를 분석하고, 이를 이용하여 채널 모델링을 수행한다. 또한 구현된 SCM 채널에 대하여 링크레벨 성능을 분석·검증한다. 4장에서는 SCM 채널의 채널 환경에서의 MIMO OFDM 시스템에 대한 링크레벨 성능을 검증하고, 5장에서 OFDM 기반 스마트 안테나 시스템에 대한 링크레벨 성능을 검증하도록 한다. 마지막으로 6장에서는 모의실험 결과를 바탕으로 MIMO 와 스마트 안테나와 같은 다중 안테나 시스템에서 적합한 채널 모델인 SCM 채널을 사용함으로써 시스템의 보다 정확한 성능 분석이 가능함을 보이고, 주어진 환경의 채널 상관도에 대한 적절한 다중 안테나 시스템을 결정할 수 있음을 보이는 것으로 본 논문을 마친다.

II. 다중 안테나 채널 모델

기존의 SISO (Single Input Single Output) 채널 모델은 단지 각각의 독립적인 채널 경로로 묘사되며, 수신측에서의 산란파 (scatterer)에 대하여 단지 신호의 강도만을 추정함으로써 전파 특성을 예측한다. 따라서 송·수신단에서의 공간적 특성을 반영하지 못하며, 이로 인하여 다중 안테나 시스템을 정확히 묘사할 수 없다.

이에 반하여 다중 안테나 채널 모델은 특정 환경

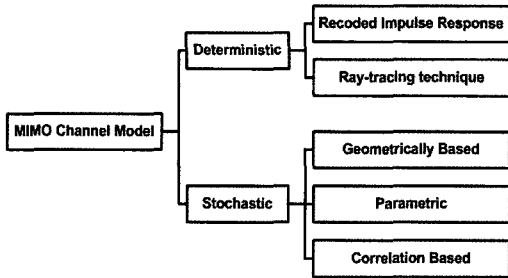


그림 1. 다중 안테나 채널 모델의 범주.
Fig. 1. Category of MIMO channel models.

에서의 산란파에 대한 신호의 강도뿐만 아니라 신호들의 경로에 대해서 DoA (Direction of Arrival) 나 DoD (Direction of Departure), AS (Angle Spread) 와 같은 공간적인 성질까지 추정을 할 수 있으며, 크게 결정적 채널 모델과 확률적 채널 모델로 나뉘어 진다. 그림 1은 다중 안테나 채널 모델에 대한 범주를 나타낸다.

결정적 채널 모델은 특정 환경에 대한 정확한 묘사에 기반한 채널 모델로, 대표적인 채널 모델로는 본 논문에서 논의하고자 하는 SCM 채널 모델과 같은 Raytracing 채널 모델이 있다. 실제 전파 상황을 보게 되면 BS (Base Station)와 MS (Mobile Station)의 사이에는 빌딩이나 숲, 반사체나 산란체가 많이 존재하기 때문에 입사하는 신호가 반사체나 산란체 등에 부딪히게 되어 여러 경로를 통하여 DoA 또는 DoD를 가지고 입사하게 된다. Raytracing 기법은 이와 같이 주어진 환경의 기하학적인 특성과 신호의 전자기적 특성을 동시에 이용함으로써 다중 경로 전파 특성을 예측하는 방법이다. 따라서 SCM 채널을 모델링 하는 경우에 있어서도 BS 와 MS의 경로에 Rich Scattering 환경을 만듦으로써 실제의 전파 특성과 유사한 채널로 묘사할 수 있게 된다^{6, 7}.

하지만 Ray-tracing 채널 모델은 주어진 환경의 순간적인 특성을 이용하므로 여러 채널 모델 중 가장 많은 계산량 (Computational Complexity)을 요구하고, 가장 낮은 유연성 (Flexibility)을 갖는 단점이 있다.

다중 안테나 채널 모델의 또 다른 범주에 속하는 확률적 채널 모델은 다중 안테나 채널 특성에 대하여 통계적 평균을 이용함으로써 채널을 리모델링하는 방법을 사용한다. 이와 같은 채널 모델 중 대표적인 채널 모델에는 I-METRA 채널과 같은 Correlation based 채널 모델이 있다. Correlation-based 채널 모델은 주어진 환경에 대하여 송·수신단 간의 채널

상관도를 통계적으로 평균을 취함으로써 모델링한다. I-METRA 채널은 Matrix로 구성된 Tapped Delay Line 모델로 표현되며, 채널의 전체적인 상관도를 나타내기 위하여 송신단과 수신단 측에서의 상관도를 나타내는 Matrix를 구하고, 이를 크로네커 곱 (Kronecker Product)을 이용하여 결합시킴으로써 전체적인 채널 상관도를 구한다. 따라서 이와 같이 구한 채널 상관도가 곧 환경을 묘사한다. 채널 상관도를 이용하는 I-METRA 채널은 복도, 터널 그리고 MS와 BS간의 거리가 매우 먼 경우의 환경에 대하여는 제대로 채널 환경을 묘사하지 못하는 단점이 있다.

III. SCM 채널 모델 및 링크레벨 성능 검증

3.1 SCM 채널 모델링

3GPP & 3GPP2 Spatial Channel AHG에서는 링크레벨 모의실험을 위하여 ITU-R M.1225에 근거한 4가지 다중 경로 환경(Modified Pedestrian A, Pedestrian B, Vehicular A, Single Path)에 대한 기본적인 채널 모델링 파라미터 집합을 제시하고 있다. 주어진 파라미터 집합을 이용하여 링크레벨 SCM을 모델링 하는데 있어 다중 경로에 대하여 각 경로는 독립적이며, 각 경로는 AS (Angle Spread) 와 AoA (Angle of Arrival), PAS (Power Azimuth Spread) 등과 같은 공간적인 특성을 나타내는 파라미터로 묘사될 수 있고, BS와 MS에서는 어떤 종류의 안테나 구성도 가능하다고 가정한다.

그림 2에서 $\theta_{n,m,AoD}$ 는 BS 안테나의 Broadside에 대하여 각 경로의 파워에 대한 평균 송·수신 각으로 정의되는 양이고, 평균 AoD (혹은 AoA)에 대한 각 경로에 대한 오프셋으로 $\Delta_{n,m,AoD}$ 으로 주어진다. BS에서 경로 별 AS는 BS 안테나의 어레이에 수신되는 각각의 파워를 갖는 경로에 대한 수신 각의 RMS Root Mean Square) 로 정의되며, AoD의 값에 따라 달라진다.

BS에서 RMS AS가 2°인 경우, AoD의 값은 50°가 되며, RMS AS가 5°인 경우 20°의 AoD를 갖게 된다⁹. 이와 같이 AS와 AoA/AoD는 상호의존적인 값을 갖게 되는데, 이때 중요하게 작용하는 것이 클러스터 (Cluster) 안에 산란체가 어떠한 분포를 가지며, 얼마나 많은 양의 산란체가 존재하는가이다. 클러스터 안에 산란체는 균일 분포 또는 가우시안 분포를 갖고 존재하게 되는데, 본 논문에서는 가우

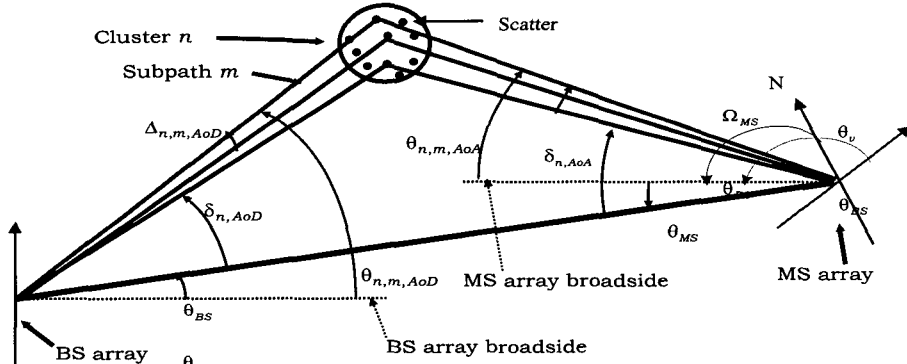


그림 2. Ray-tracing 기반 Spatial Channel Model의 개념도
 Fig. 2. Description of spatial channel model based on ray-tracing method.

시간 분포를 갖는 산란체 모델로 모의실험을 진행하였다. 채널을 모델링 하는데 있어서 산란체는 AoA를 평균으로 하고, AS/2, AS/4의 표준 편차를 갖는 가우시안 분포를 가지고 생성이 된다. AS/2와 AS/4의 표준 편차를 가지고 생성된 경우에 있어서 임의로 발생된 산란체들의 일부는 AS의 범위 밖에 존재 하게 되는데, 이때 AS/2또는 AS/4의 표준편차를 갖고 생성된 산란체들이 AS 범위 내에서만 존재하도록 산란체를 임의 발생 시킬 때 가장 큰 값으로 나눈 제한적인 AS가 있다. AS의 각이 작으면 작을수록 클러스터 안에서 가우시안 분포를 갖고 생성된 산란체들이 밀집된 형태를 이루므로 상관도가 높아지고, AS의 값이 커질수록 상관도가 낮아짐을 알 수 있다.

MS에서의 경우, 각 다중 경로 채널 환경에 따라 각각 AoA와 AS를 정의하고 있다. 예를 들어, Pedestrian A 채널 환경의 LoS 환경일 경우, 균일 분포를 갖는 AS와 22.5°의 AoA를 갖고, NLoS 환경일 경우, 35°의 RMS AS와 67.5°의 AoA를 갖게 된다.

MS의 이동성과 관계되는 DoT (Degree of Travel)의 경우도 각 다중 경로 채널 환경 별로 각각 정의하고 있다. 예를 들어, Pedestrian A 채널 환경에서는 0°의 DoT를 갖고, 그 밖의 경우에는 ±22.5°의 DoT를 갖는다.

BS에서 도착 경로에 대한 PAS는 라플라시안 분포 (Laplacian Distribution)를 가정하며, 안테나의 Broadside에 대한 AoD $\bar{\theta}$ 와 RMS AS σ 에 대하여 PAS는 다음과 같은 수식으로 정의 된다.

$$P(\theta, \sigma, \bar{\theta}) = N_o \exp\left[\frac{-\sqrt{2}|\theta - \bar{\theta}|}{\sigma}\right] G(\theta) \quad (1)$$

식 (1)에서 P는 평균 수신전력, N_o 는 정규화 상수, G는 안테나 이득의 절대값으로 $G(\theta) = 10^{0.1A(\theta)}$ 와 같으며, 여기서 $A(\theta)$ 는 안테나 패턴을 나타내면 다음과 같이 정의된다.

$$A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2, A_m\right], \text{ where } -180 \leq \theta \leq 180 \quad (2)$$

식 (2)에서 θ 는 최대 이득을 갖게 되는 안테나 방향과 원하는 방향과의 차이 각을 나타내며, θ_{3dB} 는 3dB 빔폭을 갖는 안테나의 방향, A_m 은 최대 감쇠치이다^[8].

MS에서의 경로 별 PAS는 라플라시안 분포 또는 $[-\pi, \pi]$ 의 균일 분포로써 모델링 된다. MS는 Omni 안테나를 사용하므로 경로 별 수신 PAS 역시 라플라시안 또는 균일 분포가 된다. 입사 AoA $\bar{\theta}$ 와 RMS AS σ 에 대하여 각 θ 에서의 경로 별 MS PAS는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$P(\theta, \sigma, \bar{\theta}) = N_o \exp\left[\frac{-\sqrt{2}|\theta - \bar{\theta}|}{\sigma}\right] \quad (3)$$

안테나 간격은 BS 경우, $0.5\lambda, 4\lambda, 10\lambda$ 등으로 가변적인 값을 가질 수 있고, MS의 경우 0.5λ 로 고정된 값을 갖는다. 이렇게 정의된 공간 파라미터들을 이용하여 각 부 경로에 대한 채널 계수를 생성할 수 있다. 식 (4)는 SCM 채널을 모델링 하는데 있어서 필요한 채널 계수 생성식이다.

S개의 BS 어레이와 U개의 MS 어레이로 구성된 시스템에 있어서, N개의 다중 경로 중 한 경로에 대

한 채널 매트릭스는 $U \times S$ 의 복소 진폭 (Complex Amplitude)을 갖는 매트릭스로 주어진다. n 번째 다중 경로 요소에 대하여 채널 매트릭스를 $\mathbf{H}_n(t)$ 라 하면, $\mathbf{H}_n(t)$ 의 (u, s) 번째 요소는, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{u,s,n}(t) = \sqrt{\frac{P_n}{M}} \sum_{m=1}^M \left(\exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m}]) \times \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})) \times \exp(jk\|\mathbf{v}\|t) \right) \quad (4)$$

식 (4)에서, P_n 은 n 번째 경로에 대한 수신 전력이며, M 은 전체 부 경로의 수, $\theta_{n,m,AoD}$ 와 $\theta_{n,m,AoA}$ 는 각각 BS와 MS의 AoA, AoD를 나타내며, k 는 $2\pi/\lambda$, $\Phi_{n,m}$ 은 n 번째 경로에 대해서 m 번째 부 경로의 위상을 나타낸다.

본 논문에 적용된 Link-level 모의실험에서는 속도를 고정하고, DoT (Degree of Travel)을 0° 로 하였다. 또한 정규화된 수신 전력을 가정하여 모의실험을 수행하였다.

표 1. SCM 채널 링크레벨 검증을 위한 모의실험 환경.
Table 1. Simulation environments for link-level verification of SCM channel.

시스템 파라미터		
Center Frequency	2 GHz	
Sampling Frequency	3.84 MHz	
No. of Subcarriers	1024	
Size of Cyclic Prefix	128 Samples	
Modulation	QPSK	
채널 파라미터		
다중 경로 채널 (ITU-R M.1225)	Ped A (4-path)	3 km/h
	Veh A (6-path)	120 km/h
AoA/AoD	30°	
Angle Spread	5° / 30°	
DoT	0°	
안테나 파라미터		
No. of MS Antenna	2	
MS Antenna Distance	0.5 λ	
Scatterer Distribution	AS / 2	
No. of BS Antenna	2	
BS Antenna Distance	10λ	

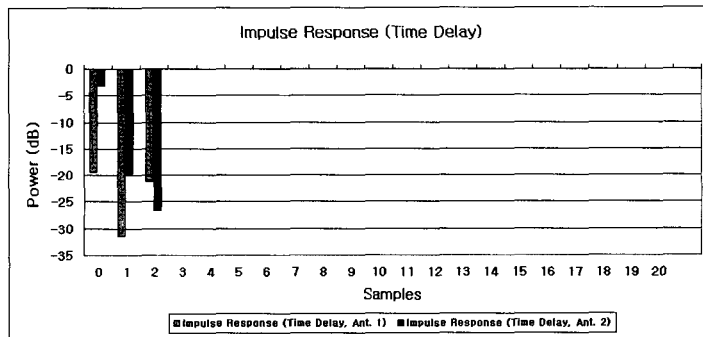


그림 3. 2×2 MIMO System의 다중 경로 채널 환경 (Ped A)에 대한 지연 시간 및 전력 감쇠 특성.

Fig. 3. Delay time & relative power characteristics of 2×2 MIMO System in the multi-path channel environments (Ped A).

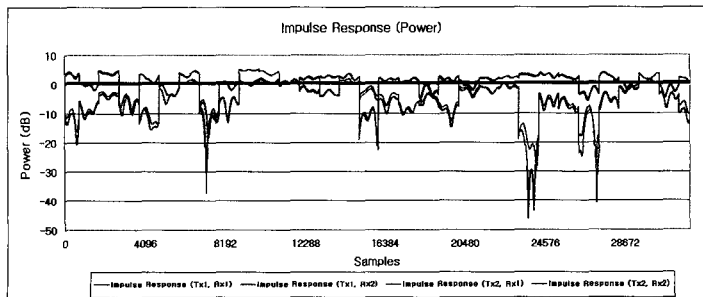


그림 4. 2×2 MIMO System의 다중 경로 채널 환경 (Ped A)에 대한 주파수 영역에서의 채널 임펄스 응답.

Fig. 4. Frequency domain channel impulse response of 2×2 MIMO System in the multi-path channel environments (Ped A).

본 논문의 4 장과 5장에서 식 (4)에 의하여 생성한 SCM 채널을 이용하여 MIMO 시스템과 스마트 안테나 시스템에 대한 링크레벨 성능분석을 수행하였으며, 안테나 간격 λ 와 AS에 따른 상관도를 모의 실험을 통해 나타내었다

3.2 SCM 채널의 링크레벨 성능 검증 환경 및 결과

OFDM 기반 SCM 채널의 링크레벨 검증을 하기 위하여 시간 및 주파수 영역에서의 채널 임펄스 응답 특성을 나타내고, 안테나 간격 및 AS의 값에 대한 채널 상관도의 변화를 보임으로써 채널 특성을 검증한다. 검증을 위한 모의실험 환경은 표 1과 같다.

그림 3은 다중 경로 채널 환경 중 Pedestrian A (3 km/h)에 대한 AS = 5°인 경우에 대한 시간 영역에서의 채널 임펄스 응답을 나타내고, 그림 4는 동일 환경에서의 각 안테나 경로 별 주파수 영역에서의 채널 임펄스 응답을 나타낸다.

그림 3을 통하여 다중 채널 환경에 대한 시간 지연과 각 경로에 대한 전력 감쇠를 파악할 수 있으며, 그림 4를 통하여 SCM에 의한 채널 이득을 확인하고, 높은 상관도를 갖는 상황에서 각 안테나 간의 채널 경로 별로 서로 유사한 페이딩 채널이 적용됨을 확인할 수 있다.

다음으로 DoA, AS 등의 공간 채널 정보를 반영하였을 때, SCM에서의 채널 상관도의 변화를 살펴 보도록 한다.

각 안테나에 대한 채널 경로에 대한 상관도를 구하기 위하여 기본적인 모의실험 환경을 2×8 MIMO 시스템으로 변경한 후, 양 끝의 2개 수신 안테나와 송신 안테나 2×2 환경에서의 채널 상관도를 산출하였다. 이는 공간적 상관도의 변화에 따른 채널 상관도 값 변화 추이를 보다 확실하게 나타내기 위한 것이다.

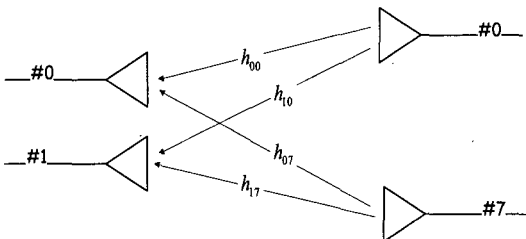


그림 5. 2×8 MIMO 시스템에서의 안테나 별 채널 경로
Fig. 5. Channel link for each antenna in the 2×8 MIMO system.

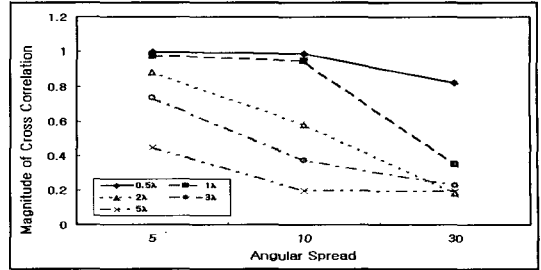


그림 6. 산란체 분포에 대한 $\sigma = AS/2$ 일 때, Angle Spread 변화에 따른 채널 경로 h_{01} & h_{00} 에 대한 상관도 (MS 안테나 간격= $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 5\lambda$).
Fig. 6. Channel correlation between h_{01} & h_{00} according to varying angle spread, when the scatterer distribution has $\sigma = AS/2$ (MS antenna distance = $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 5\lambda$).

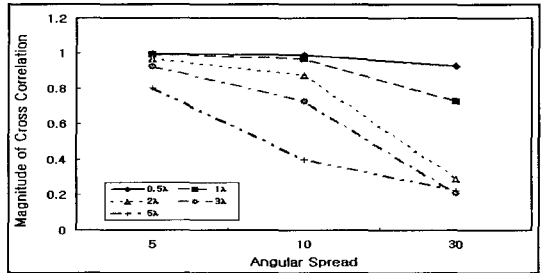


그림 7. 산란체 분포에 대한 $\sigma = AS/4$ 일 때, Angle Spread 변화에 따른 채널 경로 h_{01} & h_{00} 에 대한 상관도 (MS 안테나 간격= $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 5\lambda$).
Fig. 7. Channel correlation between h_{01} & h_{00} according to varying angle spread, when the scatterer distribution has $\sigma = AS/4$ (MS antenna distance = $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 5\lambda$).

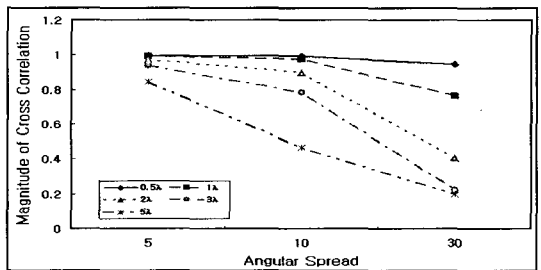


그림 8. 산란체 분포에 대한 σ = 제한된 $AS/2$ 일 때, Angle Spread 변화에 따른 채널 경로 h_{01} & h_{00} 에 대한 상관도 (MS 안테나 간격= $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 5\lambda$).
Fig. 8. Channel correlation between h_{01} & h_{00} according to varying angle spread, when the scatterer distribution has σ = limited $AS/2$ (MS antenna distance = $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, 5\lambda$).

그림 6~8은 서로 다른 산란체 분포에 대하여 AS를 변화 시켰을 때의 각 안테나 간격 별로 채널 경로 h_{01} 과 h_{00} 의 상호 상관도를 나타낸 그림이다.

채널의 상관도를 측정하는데 중요한 요소로서 수신 신호에 대한 AS, 수신 안테나에 입사되는 신호에 대한 산란체의 분포, 그리고 안테나 간 간격이

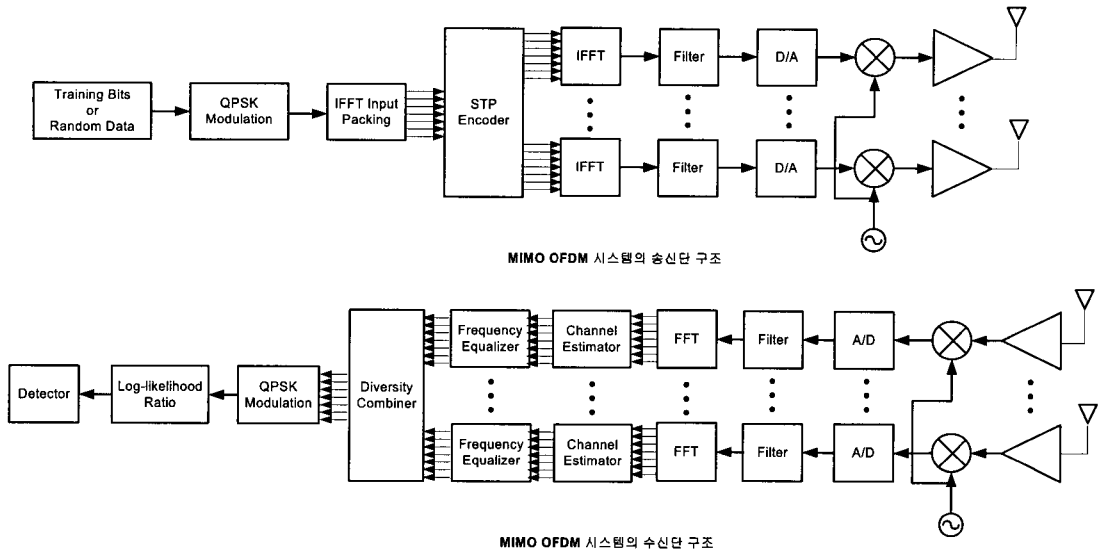


그림 9. MIMO-OFDM 시스템의 송·수신단 블록도
Fig. 9. Tx/Rx blockdiagram of MIMO-OFDM system.

있다.

수신 신호에 대한 AS가 넓을수록 신호 간의 상관도는 낮아지게 된다. 또한, AS와 관련하여 산란체의 분포 역시 채널 상관도에 영향을 준다. 주어진 AS에 대하여 산란체의 분포가 넓게 퍼지게 되면, 상대적으로 낮은 상관도를 갖게 된다. 마지막으로 안테나 간의 간격이 넓게 되면 각 안테나로 입사하는 신호간의 상관도는 낮아지게 된다.

그림 6 ~ 8은 이와 같은 결과를 보여주고 있다. 그림 6의 $\sigma = AS/2$ 인 경우, 그림 7의 $\sigma = AS/4$, 그림 8의 $\sigma =$ 제한된 $AS/2$ 인 경우와 비교하여 상대적으로 넓은 산란체 분포를 형성하게 되고, 따라서 낮은 상관도를 갖게 된다.

또한, 각 그림에서 주어진 산란체의 분포에 따라 AS가 커질수록, 안테나 간 간격이 넓어질수록 채널의 상관도가 낮아짐을 확인할 수 있다.

결국 그림 3 ~ 8의 결과를 통하여 구현된 링크레벨 성능 분석용 SCM 채널의 특성과 성능을 분석·검증할 수 있다.

다음 4장과 5장에서는 이를 바탕으로 다중안테나 응용 기법에 대한 링크레벨 성능 검증을 수행한다.

IV. SCM 채널 환경에서의 MIMO OFDM 시스템의 링크레벨 성능 검증

본 장에서는 앞에서 설명한 SCM 채널 환경에서의 MIMO OFDM 시스템의 링크레벨 성능을 검증

한다. 그림 9는 MIMO OFDM 시스템의 송·수신단 블록도를 나타낸다.

OFDM 기반 MIMO 시스템의 성능 향상을 확인하기 위하여 Alamouti가 제안하고 Tarkoh가 일반화시킨 Orthogonal Design에 근거한 2×2 STBC (Space Time Block Code)를 적용하여 모의실험을 진행하였다^[9].

Alamouti에 의해 제안된 STBC 방식은 2개의 송신 안테나를 이용하여 첫 번째 시간 구간에는 S_0, S_1 를 전송하고, 두 번째 시간 구간에는 S_1^*, S_0^* 를 전송하고, 수신기에서 M개의 안테나로 수신하게 된다.

이 경우에 채널이 주파수 비선택적이며, 두 개의 연속되는 심볼 구간에서는 채널이 일정하다고 가정한다. 이렇게 수신한 신호를 이용할 경우 1개의 안테나로 송신하여 2M개의 안테나로 수신하는 시스템과 동등하게 되어 다이버시티 차수는 2M이 되는 장점을 갖게 된다. 그림 10은 2×2 STBC 시스템 모델에 대한 개념 및 시공간 코드를 나타낸다.

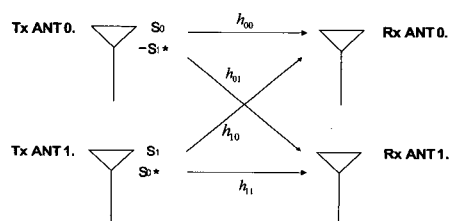


그림 10. 2×2 STBC 시스템 모델 개념도
Fig. 10. 2×2 STBC system model.

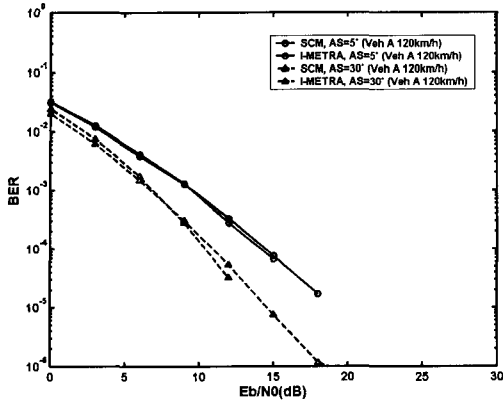


그림 11. 2x2 STBC BER 성능 비교 그래프 (SCM vs. I-METRA).
 Fig. 11. 2x2 STBC BER performance comparison graph. (SCM vs. I-METRA).

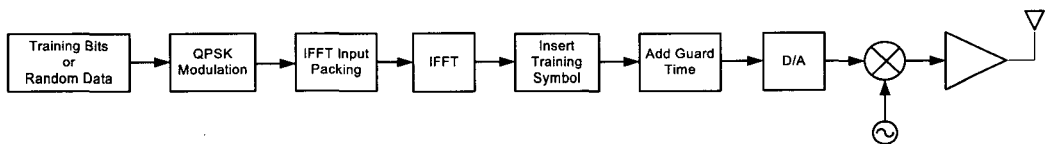
기본적인 모의실험 환경은 표 1과 같다. MIMO OFDM 시스템에서의 링크레벨 성능 검증은 Vehicular A 채널 환경 (120 km/h)에서 모의실험을 통해 수행하였으며, AoA / AoD를 30°로 고정하고, DoT를 0°로 하였다. 이와 같은 환경에서 비교적 높은 상관값을 갖는 AS = 5° 환경과 비교적 낮은 상관도를 갖는 AS = 30° 환경에서 각각 모의실험을 수행함으로써 채널의 상관도에 따른 SCM 채널에서의 링크 레벨 성능을 비교·검증하였다. 또한, 기존에 다중 안테나 시스템의 성능 분석에 많이 사용된 I-METRA 채널에 대하여 SCM 채널과 동일한 조건에서 모의실험을 수행함으로써 다중 안테나 채널 환경을 묘사하는 두 채널을 비교하고, 검증에 대한 신뢰도를 높였다.

모의실험 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 실선은 SCM 채널 환경에서의 OFDM STBC 시스템의 성능 곡선이고, 점선은 I-METRA 채널 환경에서의 성능 곡선을 나타낸다. 그림에서 보듯이, 채널 상관도가 비교적 높은 AS 5° 상향에서의 성능이 채널 상관도가 비교적 낮은 30° 상향에 비하여 Target BER 10e-4에서 약 3.3 dB 낮은 성능이 나오는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 공간 다이버시티를 이용하는 STBC OFDM 시스템이 낮은 채널 상관도를 갖는 환경에서 코드의 직교성을 잘 유지함을 나타내는 것이다.

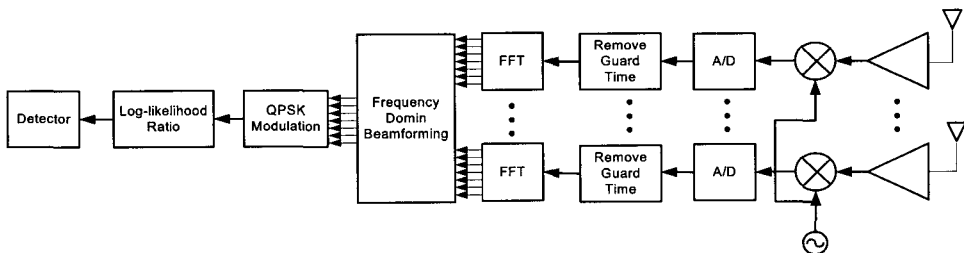
이 결과는 I-METRA 채널에서도 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 I-METRA 채널과 마찬가지로 SCM 채널에서 DoA, AS 등의 공간 정보를 나타냄에 있어 크게 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 11에서 I-METRA 채널과 SCM 채널에서의 링크레벨 성능이 완전히 같지 않게 나타나는데, 이는 구현에 있어 완벽하게 같지 않은 점과 함께 두 채널의 특성에 기인한다. 단순히 공간 정보를 채널 상관도로써 반영하는 I-METRA 채널과 공간 정보를 바탕으로 각 산란체에 대한 신호 경로를 추적하여 묘사하는 SCM 채널과의 차이가 그림 11에서 나타나고 있다.

V. SCM 채널 환경에서의 Smart Antenna OFDM 시스템의 링크레벨 성능 검증

이번 장에서는 공간 다이버시티 기법을 이용한 MIMO OFDM 시스템에 이어 SCM 채널 환경에서



Smart Antenna - OFDM 시스템의 송신단 구조



Smart Antenna - OFDM 시스템의 수신단 구조

그림 12. Smart Antenna OFDM 시스템의 송·수신단 블록도.
 Fig. 12. Tx/Rx blockdiagram of smart antenna OFDM system.

의 스마트 안테나 시스템에 대한 링크레벨 성능을 검증한다. 그림 12는 1개 BS 안테나와 2~8의 MS 안테나 어레이로 구성된 기본적인 OFDM 기반 스마트 안테나 상향링크 시스템의 송·수신 블록도를 나타내고, 그림 13은 적응 빔 형성 시스템의 블록 다이어그램으로서, 안테나 어레이에 수신된 신호는 기준 신호를 이용하여 적응 모듈에서 계산된 가중치에 곱해져서 출력 신호로 나오게 된다.

OFDM 기반 스마트 안테나 시스템의 성능 분석을 위하여 본 논문에서는 TRB(Temporal Reference Beamforming) 방식의 수신 빔형성 기법을 다루며, 적응 알고리즘으로서 LMS(Least Mean Square), NLMS(Normalized Least Mean Square) 그리고 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘을 사용하였다.

5.1 수신 적응 빔 형성 알고리즘

5.1.1 LMS 알고리즘

LMS 알고리즘은 안테나 빔의 지속적인 적응을 위하여 사용하는 가장 일반적인 적응 알고리즘으로 특정 기준을 만족할 때까지 가중치를 반복해서 계산하고 갱신함으로써 MSE (Mean Square Error)를 최소화시키는 알고리즘이다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{1}{2} \mu [-\nabla(E\{\varepsilon^2(n)\})] \quad (5)$$

식(5)에서 $\mathbf{w}(n+1)$ 은 (n+1)시간에서의 가중치를, $\mathbf{w}(n)$ 은 n시간에서의 가중치 벡터, $\varepsilon^2(n)$ 은 안테나

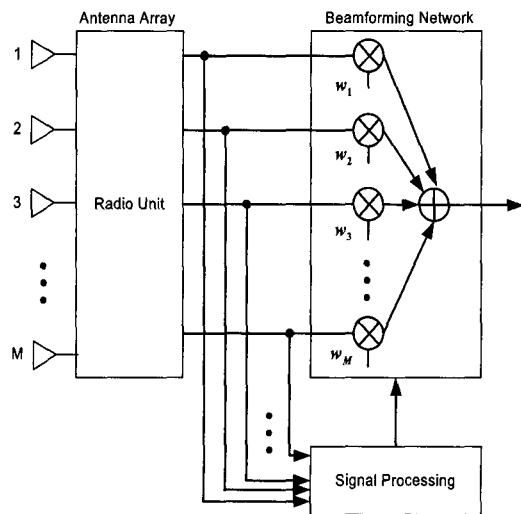


그림 13. 수신 빔 형성 모듈 블록도
Fig. 13. Rx beamforming module blockdiagram.

어레이에 수신된 신호와 기준 신호와의 MSE, μ 는 수렴률을 나타내는 파라미터로 적응의 속도를 나타내게 되며, 0에서 1 사이의 값을 갖는다.

$$\varepsilon^2(t) = [d^*(t) - \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t)]^2 \quad (6)$$

식 (6)에서 $d^*(t)$ 는 Reference Symbol (Training Symbol), \mathbf{w}^H 는 가중치 벡터로써 MSE를 최소화 시키는 가중치를 반복적으로 계산함으로써 최적의 가중치를 찾게 된다^[10].

5.1.2 Normalized LMS 알고리즘

LMS 알고리즘은 수신 신호 $x(n)$ 이 클 때 식 (5)에서 Gradient Noise의 증폭 현상이 발생하게 된다. 이를 방지하기 위하여 NLMS 알고리즘에서는 수신 신호의 Norm을 구한 후, 이 값을 이용하여 수신 신호를 정규화 시키는 알고리즘이다

식 (7)은 NLMS 알고리즘의 가중치 계산식이다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{\mu}{a + \|x(n)\|^2} \mathbf{x}(n)e^*(n) \quad (7)$$

식 (7)에서 $e^*(n)$ 는 Root Mean Square Error이며, a 는 0에서 1 사이 값을 갖는 상수이다.

5.1.3 RLS 알고리즘

RLS 알고리즘은 Kalman Filter의 특별한 경우로 생각할 수 있는 적응 알고리즘이다.

RLS 알고리즘은 LMS 알고리즘에 비하여 수렴율이 빠르다는 장점이 있지만, 계산의 복잡도가 다소 높은 높은 알고리즘이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(n) &= \mathbf{w}(n-1) + k(n)\xi^*(n) \\ \xi(n) &= d(n) - \mathbf{w}^H(n-1)\mathbf{x}(n) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)은 RLS 알고리즘의 가중치를 계산하는 수식으로, $k(n)$ 은 칼만 필터이며, $\xi(n)$ 은 기준 신호와 가중치가 곱해진 수신 신호와의 차이다.

5.2 모의실험을 통한 링크레벨 성능 검증

OFDM 기반 스마트 안테나 시스템의 성능 분석을 확인하기 위한 모의실험 환경은 표 1과 유사하다. 본 모의 실험에서는 Veh (Vehicular) A 120 km/h 환경에서 AoA 와 AoD를 30°로 고정 시켜놓

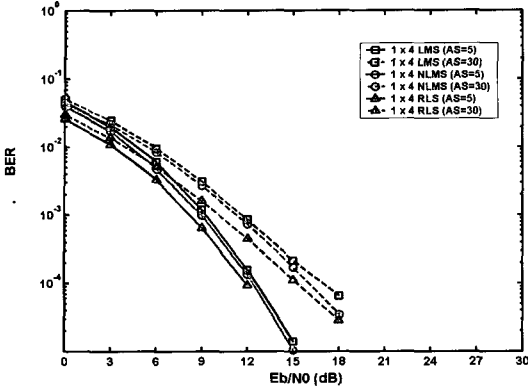


그림 14. 1 x 4 안테나 구성에 대한 SCM 채널 (Veh. A (120 km/h)) 환경에서 각 적응 빔 형성 알고리즘 간의 성능 비교 (AS = 5° / 30°).
 Fig. 14. Performance comparison among adaptive beamforming algorithms using SCM channel (Veh. A (120 km/h)) in the 1 x 4 antenna configurations. (AS = 5° / 30°).

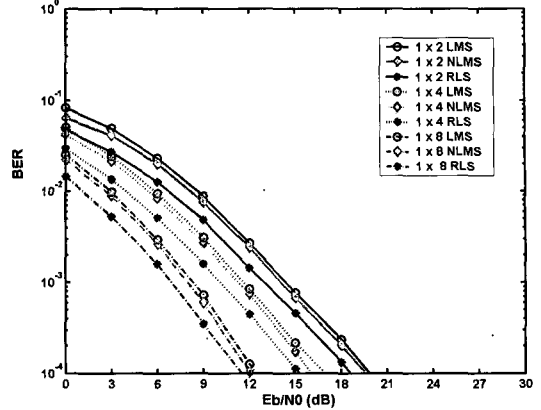


그림 16. 각 안테나 구성에 대한 SCM 채널 (Veh A(120km/h))환경에서 각 적응 빔형성 알고리즘 간의 성능 비교 (AS=30°).
 Fig. 16. Performance comparison among adaptive beamforming algorithms using SCM channel (Veh. A (120 km/h)) in the 1 x 2, 1 x 4, 1 x 8 antenna configurations. (AS = 30°).

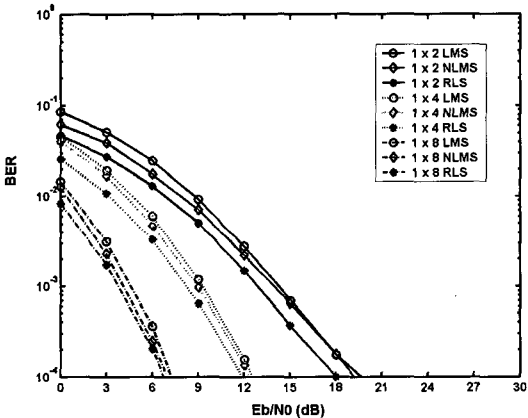


그림 15. 각 안테나 구성에 대한 SCM 채널 (Veh A (120km/h))환경에서 각 적응 빔형성 알고리즘간의 성능 비교 (AS=5°).
 Fig. 15. Performance comparison among adaptive beamforming algorithms using SCM channel (Veh. A (120 km/h)) in the 1 x 2, 1 x 4, 1 x 8 antenna configurations. (AS = 5°).

고, AS = 5°와 AS = 30°의 경우에 대하여 수신 적응 빔 형성 알고리즘인 LMS, NLMS, RLS 방식을 적용하였으며, 안테나 구성은 1x2, 1x4, 1x8 등의 ULA (Uniform Linear Array)를 이용하였다. 또한, 성능 비교를 위하여 SCM 채널 환경에 근사한 채널 환경을 갖는 독립채널을 적용하였을 때의 링크레벨 성능을 함께 나타내었다.

그림 14는 1x4 안테나 구성을 갖는 Smart Antenna OFDM 시스템에 대하여 SCM 채널 환경에서의 채널 상관도에 따른 각 수신 적응 빔형성 알고리즘의 링크레벨 성능을 나타낸다. 그림에서 보

면 수렴율이 빠르고 복잡도가 가장 높은 RLS 알고리즘의 성능이 다른 두 알고리즘에 대하여 Target BER 10⁻⁴에서 약 1 ~ 2 dB 정도 좋게 나타나며, NLMS 와 LMS 알고리즘의 성능 차이는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 상관도가 높은 AS = 5° 일 때가 상관도가 낮은 AS = 30°일 때와 비교하여 성능이 높은 것을 확인 할 수 있으며, 높은 상관도를 가질 때 각 알고리즘 간의 성능 차이가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

그림 15 ~ 16은 수신단의 안테나 수를 2, 4, 8개로 증가 시키면서 SCM 채널 환경에서 각 적응 빔 형성 알고리즘의 성능을 비교한 결과이다. 그림 15와 16에서 보면 상관도가 높은 AS = 5°인 경우, 안테나 수가 증가 할수록 안테나 수 증가에 따른 성능 이득이 상관도가 낮은 AS = 30°인 경우에 비해 뚜렷이 증가함을 알 수 있다.

그림 17 ~ 18은 채널 경로가 상호 독립적인 채널 모델과 SCM 채널에 적응 빔 형성 알고리즘을 적용한 경우의 BER (Bit Error Rate) 그래프를 나타낸 그림이다. 그림 17과 18을 비교하였을 경우 독립 채널의 경우 신호의 강도만을 추정하여 채널을 묘사하기 때문에 안테나 상관도에 따른 영향을 받지 않으므로, AS가 30° 일 때와 AS가 5°일 때의 성능이 같음을 알 수 있다. 하지만 SCM 채널을 사용한 경우에는 AS가 5°일 때 AS가 30°인 경우에 비해 성능이 좋아짐을 알 수가 있다. 또한 AS가 작을수록 안테나 수가 증가함에 따라 AS에 따른 적응 빔 형성 알고리즘의 성능 차이가 많이 남을

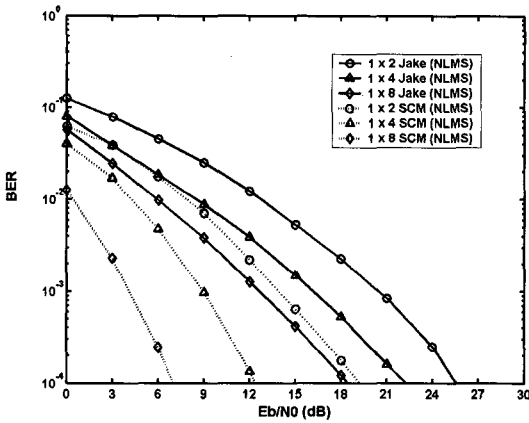


그림 17. 각 안테나 구성에 대한 SCM 및 독립 채널 (Veh A (120 km/h)) 환경에서의 NLMS 알고리즘의 성능 비교 (AS=5°).

Fig. 17. Performance comparison of NLMS algorithms in SCM channel and JAKE channel (Veh. A (120 km/h)) in the 1 x 2, 1 x 4, 1 x 8 antenna configurations. (AS = 5°).

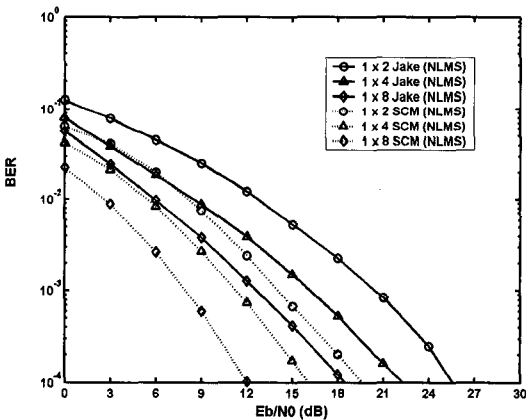


그림 18. 각 안테나 구성에 대한 SCM 및 독립 채널 (Veh A (120 km/h)) 환경에서의 NLMS 알고리즘의 성능 비교 (AS=30°).

Fig. 18. Performance comparison of NLMS algorithms in SCM channel and JAKE channel (Veh. A (120 km/h)) in the 1 x 2, 1 x 4, 1 x 8 antenna configurations. (AS = 30°).

알 수가 있다. 즉, 다중 안테나 채널을 독립 채널로 대체하는 경우, 공간 채널 상관도가 0이므로 스마트 안테나 시스템에서는 실제 성능과 비교하여 열화된 성능을 보이나, 이와는 달리 그림 11에 나타난 MIMO 시스템에서는 실제 성능보다 더 높은 성능을 보임을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 차세대 이동통신 시스템 모델의

하나로 제안되고 있는 다중 안테나 시스템에 적합한 채널 모델 중 3GPP & 3GPP2 Spatial Channel AHG에서 제안한 SCM 채널 모델에 대하여 그 특징을 분석, 구현하고 이러한 채널의 다양한 특성을 검증하였다.

시스템레벨 성능 비교용으로 제안된 SCM 채널을 링크레벨 성능의 비교·분석을 위하여, 본 논문에서는 시스템레벨 채널에 대한 채널 계수 및 파라미터들을 링크레벨 성능 비교용으로 변환하여 구현하였다. 이와 같이 구현된 링크레벨 SCM 채널을 기반으로 일반적인 다중 안테나 시스템 송·수신 알고리즘으로서 MIMO OFDM 시스템에서의 STBC와 스마트 안테나 OFDM 시스템에서의 수신 빔 형성 기법에 대한 링크레벨 성능을 비교·분석하고, 동일한 환경에서 I-METRA 채널 및 독립 채널을 적용하여 성능 분석을 수행하였다.

각 시스템에 대하여 채널 상관도를 다르게 적용하여 모의실험을 수행한 결과, 낮은 채널 상관도를 갖는 환경의 경우, 공간 다이버시티 기법 중 하나인 STBC의 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 반대로, 높은 상관도를 갖는 환경의 경우에는 공간 다중화 기법 중 하나인 수신 빔 형성 기법의 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

다중 안테나 시스템을 위한 채널 모델의 한 종류인 I-METRA 채널에서의 모의실험 결과 역시 SCM 채널의 경우와 유사함을 확인하고, 이를 통하여 구현된 링크레벨 성능 분석을 위한 SCM 채널이 공간 정보를 제대로 표현하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 이상적인 독립 채널 모델과 비교하여 실제 환경과 유사하게 공간 정보를 추가적으로 반영하는 SCM 채널의 경우, 공간 상관도의 영향에 따라 성능 차이가 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 본 논문을 통하여 다중 안테나 시스템의 정확한 성능 분석을 위하여 SCM 채널을 사용하는 것이 적절하며, 낮은 상관도 환경에서 공간 다이버시티 기법을 적용하고, 높은 상관도 상황에서 공간 다중화 기법을 적용하는 것이 전반적인 다중 안테나 시스템의 성능을 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] R. Van Nee, R. Prasad, *OFDM for Wireless multimedia Communication*, Artech House, 1999.
- [2] 한승희, 이규인, 안재영, 조용수, "주파수 선택적 채널에서 OFDMA 시스템을 위한 적응 빔

포밍 방법”, 한국통신학회 논문지, vol.30, No.10C, pp.976 - 982, 2005.10.

- [3] A. pidwerbetsky and D. M. Romain, “Very High Spectral Efficiencies for Wireless Communications,” *DARPA NGIPI Meeting*, Jan. 2002.
- [4] 오성근, 류원형, “안테나 배열을 사용하는 시스템을 위한 일반화된 벡터 채널 모델과 공간 채널 시뮬레이터 구현”, 한국통신학회 논문지, vol.25, No.3, pp.408 - 422, 2000. 02.
- [5] D. Reed, J. Smith, and A. Rodriguez, “Spatial Channel Models for Multi-antenna Systems,” in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. fall*, Oct. 2003, Vol.5, pp.99 - 103.
- [6] R. Kohno, “Spatial and Temporal Communication Theory using Adaptive Antenna Array,” in *Proc. IEEE Personal Communications*, Feb. 1999, Vol.5, pp.28 - 35.
- [7] 3GPP&3GPP2 Spatial Channel Model AHG, Spatial Channel Model Text Description Rev 7.0, Aug., 2003.
- [8] P. Cardieri, K. W. Sowerby, T. S. Rappaport, and J. H. Reed, “Overview of Spatial Channel Models for Antenna Array Communication Systems,” in *Proc. IEEE Personal Communications*, Feb. 1998, Vol. 5, pp. 10 - 22.
- [9] V. tarkph, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, “Space-time Block Coding for Wireless Communications: Performance results,” in *Proc. IEEE J.Select, Areas Comm.*, Vol.17, pp.51 - 70, Mar. 1999.
- [10] J. Litva and K. Y. Lo, *Digital beamforming in Wireless Communications*, Artech house, 1996.

박 성 호 (SungHo Park)

준회원



2004년 2월 인하대학교 컴퓨터 공학과 (공학사)
2006년 2월 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)
2006년 3월~현재 LG전자 기술원 이동통신 기술연구소 4G 표준화 그룹

<관심분야> 4세대이동통신 시스템, MIMO 및 Smart Antenna, MIMO Channel Modeling, DMB 시스템 무선 전송 규격

김 규 현 (Kyoohyun Kim)

준회원



2005년 2월 인하대학교 정보통신 공학과 (공학사)
2005년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
<관심분야> 4세대 이동 통신 시스템, MIMO 및 Smart Antenna System, WiBro 시스템 무선 전송 규격, Cooperative Relaying System

허 주 (Joo Heo)

준회원



2002년 2월 인하대학교 전자 공학과 (공학사)
2004년 2월 인하대학교 전자 공학과 (공학석사)
2004년 3월~현재 인하대학교 정보통신 대학원 박사 과정
<관심분야> Smart Antenna and MIMO System, Radio Resource Management, 4세대 이동통신 무선전송 방식, Cross-layer Design

장 경 희 (KyungHi Chang)

종신회원



1985년 2월 연세대학교 전자 공학과 (공학사)
1987년 2월 연세대학교 전자 공학과 (공학석사)
1992년 8월 Texas A & M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
1989년~1990년 삼성종합기술원 주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송 방식 연구팀장 (책임연구원)
2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수
<관심분야> 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선 전송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술 Cognitive Radio, Cross-layer Design