

철도 환경에서의 MIMO 시스템의 응용 방안

On the Application of MIMO systems for railway environment

이철진* 황현철** 조봉관*** 신승훈**** 곽경섭*****
(Cheol Jin Lee) (Hyun Chyeol Hwang) (Bong Kwan Cho) (Seung Hoon Shin) (Kyung Sup Kwak)

요약

본 논문에서는 이동 통신 시스템의 관점에서 철도 환경에 적용 가능한 MIMO 시스템을 고찰하였다. 먼저, 무선 통신 환경하에서 이동중인 열차와 기지국간의 무선 채널 환경의 특성을 분석하고, 이를 기지국이 선로 쪽에 있는 경우와 그렇지 않은 경우의 차이점을 비교하였다. 다음으로, 철도 환경의 열악한 무선 링크에 의한 성능 저하 문제를 해결하기 위하여 향후 적용 가능한 다중 안테나 시스템을 소개하고 이를 채널 용량과 다이버시티 측면에서 성능을 분석하였다. 특히, 다이버시티 기법 측면에서 페루프 방식과 개루프 방식을 비교하며, 안테나간 상관도에 따른 이들 성능을 분석하였다. 마지막으로, 다중안테나 시스템을 철도 환경에 적용시킨 유럽의 ESCORT 프로젝트의 실험 결과를 비교하고 분석하였다.

Abstract

In this paper, we examine the MIMO(Multiple Input Multiple Output) system in the point of mobile communication that is used for railway environment. First, under the radio environment, wireless channel characteristics are analyzed between moving train and base station, both assuming track side base stations and non-track side base stations. Next, the paper introduces the MIMO system which can be used to solve the problem of performance degradation in railway environment, and analyzes its performance in terms of channel capacity and diversity. We especially compares open-loop scheme with closed loop scheme at the diversity and analyzes their performance according to antenna correlation. Finally, the we presents experimental result from the ESCORT project that was studied in railway environment with the MIMO system.

Key Words : 철도(Railway), 다중 안테나(MIMO: Multiple Input Multiple Output), 시공간 다이버시티(Space-time diversity)

1. 서론

무선 통신 링크는 데이터 전송시 전송 채널의 잡음, 간섭 및 페이딩 등으로 인하여 유선 통신 채널과 동일

한 서비스 품질을 얻기가 어렵다. 특히, 이동체인 열차와 기지국간의 무선 채널은 상대적으로 빠른 이동 속도 때문에 채널의 특성이 시간에 따라 매우 빠르게 변하여 빠른 페이딩이 발생한다. 또한 열차와 기지국간에 존재

* 회원 : 인하대학교 정보통신공학과 석사과정
** 비회원 : 인하대학교 정보통신공학과 박사과정
*** 비회원 : 한국철도기술연구원 선임연구원
**** 비회원 : 인하대학교 정보통신공학과 박사후과정
***** 회원 : 인하대학교 정보통신대학원 교수
† 논문접수일 : 2004년 6월 1일

하는 건물, 터널 등의 장애물로 인해 무선 링크는 심한 왜곡을 겪게 되며 이로 인해, 수신 신호 대 잡음비가 저하되어 오류 확률(BER: Bit Error Rate)이 증가하게 된다. 따라서, 열악한 무선 채널환경에서 페이딩 경감, 다이버시티 이득의 증대, 무선채널의 성능 및 용량을 개선시킬 수 있는 기술에 대한 연구는 매우 중요하다.

현재 전세계적으로 고속 이동체와 기지국간 무선 링크 및 다이버시티 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 ESCORT (Enhanced diversity and Space Coding for underground metrO and Railway Transmission) 프로젝트는 다중 안테나 기술을 열차 전송 시스템에 적용하기 위한 대표적인 연구이다[1]. ESCORT 프로젝트는 유럽의 IST (Information Society Technologies) 연구과제의 하나로 GSM-R (Global System for Mobile communication - for Railways) 시스템을 열차제어에 적용할 경우 무선채널 환경이 열악한 지역 특히, 터널 및 지하 환경에서 신호 품질 향상 및 높은 데이터 전송률을 얻기 위한 연구 수행을 목적으로 하고 있다. 현재 ESCORT 프로젝트에서는 다이버시티 기법으로 송·수신단에 다수의 안테나를 사용하는 방법에 대한 연구를 진행 중에 있다.

MOSTRAIN (MOBILE communications Services for high speed TRAINs) 연구과제는 UMTS 이동통신 시스템에서 특히 고속 운행중인 열차에서 가입자들이 요구하는 이동서비스를 효율적으로 제공하기 위한 연구과제로 고속 운행중인 열차와 기지국간의 무선채널 환경에 대한 측정 및 모델링을 수행하였다.

본 논문에서는, II절에서 철도 환경에서의 무선 채널 특성을 분석하고 철도 환경에서 특히 고려해야 할 여러 요소들을 제시한다. III절에서는, 다중 안테나 시스템에 대한 국내외의 연구 진행 사항 및 다이버시티 기법을 제시하고 이를 실제 철도 환경에 적용한 ESCORT 프로젝트의 결론을 소개한다. 마지막으로 V 절에서는 결론을 맺는다.

II. 철도 채널 환경

본 절에서는 이동통신 시스템의 관점에서 철도 환경을 고려한다. 철도 환경에서는 특히, 빠른 페이딩

(Fast fading), 도플러 천이(Doppler Transient) 현상 및 투과 손실(Penetration Loss)과 같은 무선 채널 환경과 철도를 위해 산을 깎아 만든 커팅(Cutting) 및 터널 등의 특수 지형을 고려해야 한다. 또한 이들에 대해서 기지국이 선로 쪽에 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 차이점도 비교한다. 기지국의 위치에 따른 철도 채널의 특성을 [표 1]에 설명하였다.

고속 열차란 보통 250km/h 이상의 속도로 달릴 수 있거나 500km/h의 속도까지 운행 가능한 열차를 의미한다. 일반적으로, 고속 열차의 선로는 완만한 곡면과 경사도가 낮은 커팅 지형 그리고 넓은 구조의 터널 등을 갖는다. 선로의 곡면이 완만하기 때문에 작은 수의 기지국만으로 LOS(Line of sight)를 유지할 수 있고, 충분히 넓은 터널은 좋은 도파관(Wave guide)이 되므로 무선통신을 위한 적절한 환경이 된다[1].

2.1. 철도 채널 모델

철도 환경에 대한 무선 채널은 보통 RAx (Rural Area, xkm/h)로 모델링하며, 산악 지형에서는 HTx (Hilly Terrain), 건물이 많이 들어서 있는 지형에서는 TUx (Typical Urban) 모델을 적용할 수 있다. RAx 채널모델은 라이시안(Rician) 분포를 가지는 하나의 직선 경로와 레일레이(Rayleigh) 분포를 따르는 3~5개의 페이딩 경로로 구성된다. 그러나 다중경로의 최대 지연 시간이 $0.5\mu s$ 이므로 RAx 채널은 CDMA IS-95 시스템에서도 단일 경로로 간주할 수 있다. 한편, 기지국이 선로 쪽에 위치한 경우에는, LOS 성분이 6dB~10dB인 RAx 채널로 모델링 할 수 있으며 특히 고속 열차 선로의 경우, 선로의 곡면이 완만하여 지속적으로 LOS가 유지된다[1].

고속으로 이동하는 열차의 경우 큰 도플러 주파수를 갖게 된다. 기존의 일반적인 셀룰라 시스템의 경우 기지국은 선로에서 먼 곳에 위치하고 있어 기지국에서 선로 쪽으로 전파의 입사각이 대부분 90도에 가깝기 때문에 도플러 주파수의 변화율이 크지 않다. 반면에, 기지국이 선로 쪽에 설치되어 있는 경우 열차가 빠른 속도로 기지국을 지나갈 때 도플러 주파수 값이 큰 값에서 작은 값으로 갑자기 변하게 되는 도플러 천이 현상이 발생한다.

음영효과(Shadowing) 또는 느린 페이딩(Slow Fading)은 무선 통신 환경에서 신호의 전파 경로에 고정된 장애물에 의해 발생하는 전파 손실을 의미한다. 기지국이 선로 쪽에 있지 않은 일반적인 셀룰라 시스템에서는 긴 커팅 지형 내에서 심각한 음영효과가 있게 되며 이는 통화를 끊기게 하는 원인이 된다. 이러한 심각한 음영효과는 커팅 지형의 너비와 깊이, 그리고 그 지역의 초목지 존재 유무에 따라 영향을 받게 된다. 일반적으로 도심 지역에서는 이동체 주위의 물체로부터 여러 반사 경로가 있지만 철도 환경에서는 그렇지 않다. 철도 환경에서의 커팅 지형은 경사도가 낮을 뿐 아니라 이들이 초목지일 경우 전파 신호를 반사하지 않고 흡수해 버리므로 긴 커팅 지역으로 들어오는 전파의 손실은 크게 된다. 이를 해결하기 위해서는 커팅 지형을 수직인 벽으로 잘 다듬어 놓거나 기지국을 선로 쪽에 세워야 한다. 하지만 기지국을 선로 쪽에 설치할 경우 투과 손실이라는 문제를 고려해야 한다.

투과 손실이란, 신호가 열차 안으로 투과 할 때 잃게 되는 전력의 손실을 의미한다. 일반적으로 열차는 큰 창을 포함하는 금속체이고 이들 창들은 한 겹 이상의 유리 혹은 금속층으로 이루어진다. 창에 포함된 금속층은 태양 빛을 반사하여 열을 차단하는 역할을 하며 다소간에 무선 전파를 역시 반사 한다. 특히 기지국이 선로 쪽에 있는 경우, 전파는 대부분 열차에 작은 각도로 입사하게 되고 투과 손실은 최대가 된다. 이러한 투과 손실의 영향을 조사한 여러 연구가 MOSTRAIN 프로젝트[2]에서 수행되었다. 이것에 의하면 선로 쪽에 기지국이 있는 경우, 창이 금속으로 코팅된 열차는 약 32dB, 그렇지 않은 열차라도 약 20dB 정도의 전력 손실을 발생시키게 된다. 따라서 기지국이 선로 쪽에 있는 경우, 커팅 지역이나 그 밖에 환경에 의한 페이딩을 경감할 수 있지만 열차 안으로의 투과 손실이 크다는 단점이 있다[1].

고속 열차 환경에서의 터널은 벽이 잘 다듬어져 있고 충분히 큰 구조이다. 이러한 터널은 고속의 열차가 통과할 때 예상되는 큰 압력에 견딜 수 있도록 충분히 크게 설계된다. 따라서 터널 안에 두 열차가 동시에 있는 경우라도 신호가 터널 안쪽으로 전파되는데 지장이 없으며 도파관 특성을 갖게 된다. 한편, 터널의 공

<표 1>1 철도 채널 특성

기지국 위치	선로 쪽	선로에서 먼 곳
채널모델	RAx. 6~10	RAx. 3
음영효과	적음	보통
터널	안테나 있을 때 (RAx. 20)	-
도플러	전통적인 모델 도플러 전이 발생	전통적인 모델
투과 손실	높음	낮음

* TUx, HTx 그리고 LOS가 사용될 수 있음.

간이 크기 때문에 필요하다면 터널의 입구나 그 내부에 안테나를 설치할 수 있다. 하지만 이 경우, 앞에서 설명한 것처럼 도플러 천이가 발생할 수 있고 또한 작은 입사각 때문에 투과 손실은 커지게 된다. 이러한 기지국의 위치에 따른 철도 채널의 특성을 [표 1]에 설명해 놓았다.

2.2. 바람직한 기지국 위치

기지국이 선로에서 먼 곳에 있는 경우 철도 환경은 LOS성분이 3dB인 RAx 채널이며[3] 반면, 기지국이 선로 쪽에 있다면 LOS 성분이 약 6~10dB인 RAx 채널이 된다. 후자의 경우 열차가 기지국을 지나칠 때 큰 도플러 전이가 발생하게 되지만 도플러 전이의 영향은 MOSTRAIN 연구에서는 큰 문제가 되지 않는다고 결론 내려졌다[2]. 이는 고속 열차의 경우라도 주파수의 변화는 1ms동안 단지 수십 Hz이며, 오히려 이것은 LOS의 영향력 때문에 충분히 보상될 수 있는 문제이기 때문이다. 오히려 기지국이 선로 쪽에 있어 전파 신호와 열차 사이의 각이 아주 작을 경우, 투과 손실이 크게 증가하는 문제가 생긴다. 결국, LOS 성분으로부터 오는 성능의 향상과 열차 안으로 전파가 침투할 때 생기는 투과손실과의 손익을 비교해 볼 필요가 있다. 투과 손실은 큰 문제이며 이는 특히, 창이 금속으로 코팅된 열차의 경우에 더욱 심각하다.

한편, 기존의 셀룰라 시스템을 활용하지 않고 기지국을 선로 쪽에 새롭게 설치한다는 것은 시간과 비용 측면에서 쉬운 일이 아니다. 오히려, 기존 셀룰라 시스

템을 활용하되, 이로 인한 LOS의 부재 및 심각한 페이딩 현상을 극복하기 위한 접근이 더욱 현실적이다. 이것을 위해 다음절에서는, 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 다중 안테나 시스템의 특징을 소개하고 이를 철도 환경에 적용하기 위한 효과적인 다이버시티 기법에 대해 분석한다.

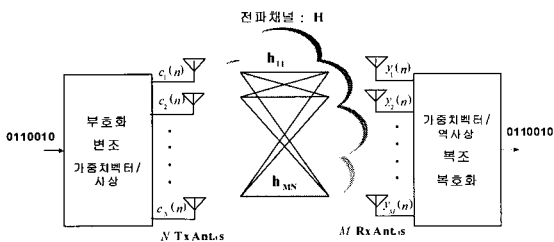
III. 다중 안테나 시스템(MIMO)

다중 안테나 시스템은 간단히 말해 전송단과 수신단에 공간적으로 이격된 다중안테나를 사용하는 시스템이다. 이 시스템은 기존의 단일 입력 단일 출력시스템(SISO: Single Input Single Output System)에 비해 무선 품질(BER) 또는 데이터 전송 효율(Spectral Efficiency)을 향상시킬 수 있고, 이는 송수신 안테나간의 무선 링크들을 통해 수신되는 모든 신호를 적절하게 결합하여 얻을 수 있다. 따라서 추가로 주파수 대역을 사용하지 않고 무선 통신 성능을 크게 향상시킬 수 있으나, 하드웨어와 연산 복잡도가 기존 시스템에 비해 추가되어야 한다. [그림 1]은 다중 안테나 시스템을 간략하게 나타내고 있다. 여기서 전송단에 N 개, 수신단은 M 개의 안테나를 가지고 있고 전파 채널 \mathbf{H} 는 채널 행렬 나타낸다.

본 절에서는 무선 통신에서 다중 안테나 시스템이 갖는 특징을 다이버시티와 채널 용량의 관점에서 설명하고, 다중안테나 시스템을 철도 환경에 적용한 ESCORT 프로젝트에 대하여 고찰한다.

3.1 다중안테나 시스템의 다이버시티 기법

무선 채널은 전송 매체를 통해서 들어온 다중경로



<그림 1> 다중 안테나 시스템의 개념도

신호들이 바람직하지 못한 가감으로 인한 신호 감쇄와 다른 사용자들의 간섭으로 인한 신호 왜곡이 발생하는 열악한 채널 환경이다. 수신기는 이를 극복하기 위해 다이버시티 기법을 사용하는데, 이러한 다이버시티 기법으로는 시간 다이버시티(Temporal Diversity), 주파수 다이버시티(Frequency Diversity), 공간 다이버시티(Antenna Diversity) 등이 있다. 기존의 공간 다이버시티는 주로 수신 다이버시티를 고려했는데, 시공간 부호(Space-Time Code)는 여러 개의 송신 안테나를 이용하여, 일반적으로 수신 다이버시티를 얻기 어려운 하향링크에 적합한 부호화 방식이다.

다중 송신안테나를 이용한 송신 다이버시티 기법은 크게 수신기에서 송신기로의 귀환 정보의 유무에 따라 개루프 방식(Open Loop)과 폐루프 방식(Closed Loop)으로 나눌 수 있다. 보통 전송안테나 배열(TxAA: Transmit Antenna Array)과 고유 빔형성 기법(Eigen Beamforming)은 폐루프 방식에 속하며 시공간 부호화 기법은 개루프 방식에 속한다.

폐루프 방식은 수신단에서 송신단으로 채널상태정보를 귀환하거나 상향링크의 채널을 추정하여 채널정보를 송신단에서 알 수 있는 경우, 이를 활용하여 전송하는 방식이다. 채널 상태 정보를 통해 우세한 고유모드로 데이터 심볼을 전송하여 공간 다이버시티를 얻을 수 있게 되며 이는 전송빔형성 시스템(Transmit Beamforming System)이라고도 불린다.

TxAA(Transmit Antenna Array) 방식은 수신안테나가 하나일 경우에 대한 전송빔형성 시스템이다. 이는 수신기에서 채널의 상태를 측정하여 채널 상태에 따른 최적의 송신 가중치를 계산하여 이를 송신기로 귀환시키며 이 값을 송신 신호에 곱하여 송신함으로써 다이버시티를 얻고자 한다. 이론적으로 송신 안테나의 수가 M 개 일 때, $10 \log(M)$ dB의 평균 SNR(Signal to Noise Ratio: 신호 대 잡음비) 성능 개선이 있으며 이러한 우수한 성능 때문에 현재 3GPP(The 3rd Generation Partnership Project) 표준에는 2개 송신 안테나를 사용한 TxAA방식이 표준으로 채택되어 있다.

이러한 폐루프 방식들은 수신기의 이동속도가 저속인 경우 개루프 방식보다 향상된 성능을 보이는 장점을 지니고 있으나, 귀환 채널로 인한 전체 시스템의

복잡도 증가와 고속 이동 시에 귀환에 필요한 지연효과에 의한 성능저하 등의 문제를 안고 있다.

한편, 송신 다이버시티를 이용한 개루프 방식은, 크게 시공간 트렐리스 부호(STTC: Space-Time Trellis Code)와 시공간 블록 부호(STBC: Space Time Block Code)로 분류할 수 있다. 시공간 트렐리스 부호는 대체적으로 더욱 좋은 성능을 보이지만, 최대 다이버시티 차수를 얻기 위해서는 최대우도복호기(Maximum Likelihood decoder)의 복잡도가 송신 안테나의 수와 전송률에 대해 지수적으로 증가한다는 단점이 있다. 또한 이들은 높은 차수의 변조 기법에 대해서 성능이 좋은 부호를 찾는 데 어려움이 있다.

Alamouti는 최초로 2×2 복소 직교 설계(Complex Orthogonal Design)을 이용한 송신 다이버시티를 제시하였고[4], Tarokh는 이를 일반화하여 직교 설계 이론에 기반한 직교성을 갖는 부호어(Codeword) 행렬을 이용하여 시공간 블록부호를 제안하였다[5]. 시공간 블록부호는 상대적으로 부호화 이득은 작지만, 최대 다이버시티 차수를 가지면서 수신기에서 선형처리(Linear Processing)만으로 최대우도복호를 가능하게 하기 때문에, 수신기의 복잡도가 송신 안테나의 개수에 따라 선형적으로 증가하여 수신기의 구조가 간단해지는 장점이 있다.

최근에 Seshadri와 Jafarkhani는 시공간 트렐리스부호와 시공간 블록부호를 결합하여 최대 다이버시티를 만족하면서, 기존의 Alamouti의 부호보다 더욱 높은 전송률을 갖는 새로운 SOSTTC (Super Orthogonal Space-Time Trellis Code)를 제시하였다[6]. 즉, 기존의 시공간 트렐리스부호는 최대 다이버시티이득 (Diversity Gain)과 추가적인 부호화 이득(Coding Gain)을 얻을 수 있었으나, 최적의 부호 설계 방법이 없었다. 또한, 기존의 직교 설계를 이용한 시공간 블록 부호는 최대 다이버시티 이득과 간단한 수신기 구조를 얻을 수 있지만, 특별한 부호화 이득을 얻지는 못했다. SOSTTC는 내부부호(Inner code)로 Alamouti가 제시한 직교 설계와 외부부호(Outer code)로 시공간 트렐리스부호를 연결하여, 최대 다이버시티, 최대 전송률(Full rate)이면서 최적의 부호화 이득을 얻는 구조를 설계하였다.

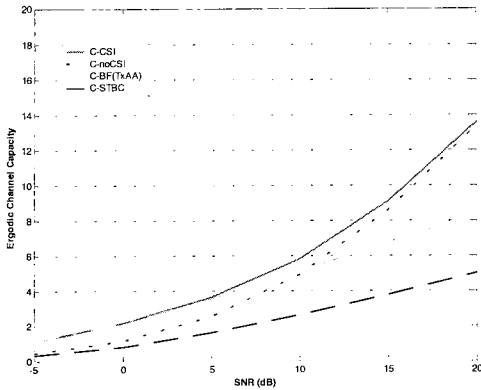
한편, 신호 공간 다이버시티를 이용한 성상회전 부호를 이용하여, 신호공간 다이버시티를 얻는 시공간 성상회전부호 (Space-Time Constellation Rotating Code)가 소개되었다[7]. 시공간 성상회전 부호의 가장 큰 특징은 임의 개수의 송신 안테나에 대해 최대 다이버시티와 최대 전송률을 만족하는 부호가 존재한다는 것이다. 또한 좋은 성상회전행렬을 선택함으로써, 비교적 훌륭한 부호화 이득을 얻을 수도 있다.

3.2. 다중안테나에서의 채널 용량 비교

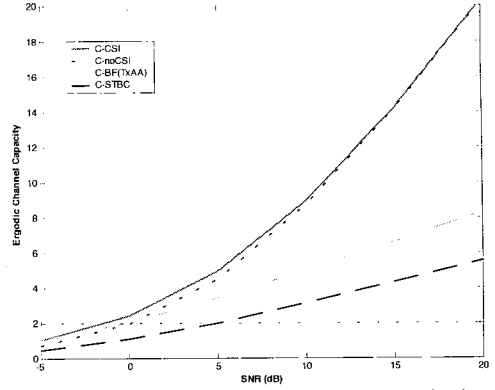
[그림 1]에서와 같이 \mathbf{H} 를 전파 채널이라 할 때, $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 의 고유값 분포가 중요한 역할을 하게 되며, 이들 고유값들이 각 부채널들의 특성을 결정하기 때문이다[8]. 예를 들어, $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 에 우세한 고유값들이 있는 경우와 그렇지 않을 경우는 각각 LOS 채널과 NLOS 채널에 해당하며 이는 무선링크의 주파수 효율성의 판단 기준이 되는 Ergodic 채널용량에 큰 영향을 미치게 된다. [그림 2]는 4×4 다중안테나 시스템에 대하여 여러 전송방식들의 채널용량 한계를 나타낸다[9].

그림에서, CSI(Channel State Information: 채널 상태 정보)는 물채움(Water pouring) 알고리즘으로 얻어지는 채널 용량을 의미하며 noCSI는 채널 상태 정보가 없는 경우를 의미한다. 이를 앞에서 설명한 실제적인 시스템인 TxAA 및 STBC의 채널 용량과 비교하였다.

[그림 2(a)]는 채널에 우세한 고유값들이 있을 경우이다. 전송빔형성 시스템은 상대적으로 낮은 SNR에서 물채움 알고리즘으로 구해지는 최적 채널용량에 근접하거나 같음을 볼 수 있다. 이러한 LOS 채널환경에서는 상대적으로 전송빔형성 시스템의 주파수 효율이 좋으며 이것은 특히 SNR이 낮을 경우 뚜렷하다. 채널 정보를 사용하지 않는 시스템(noCSI)은 확실히 준최적임을 알 수 있으며 이는 감쇠가 많은 모드에서 에너지 손실이 있기 때문이다. 반면에 SNR이 클 경우 물채움 알고리즘을 사용하는 전송방식에 근접하고 특정 SNR 이상에서는 전송빔형성 시스템의 채널용량을 초과한다. 따라서, 높은 SNR에서 CSI를 활용하는 경우와의 차이가 작아지며 결국에는 CSI를 활용하는 경우와 활용하지 않는 경우의 채널용량이 같아진다.



a) Tx 및 Rx 안테나간 상관도가 각각 0.9일 경우



b) Tx 및 Rx 안테나간 상관도가 각각 0.1일 경우

〈그림 2〉 MIMO 시스템의 Ergodic 채널용량 비교

[그림 2(b)]는 산란이 심한 채널환경인 경우이며 이들의 고유값들은 서로 비슷하고 우세한 고유모드가 없다. CSI를 활용하지 않는 전송방식의 성능 향상을 기대할 수 있으며 적당한 SNR 이후 바로 물채움 알고리즘을 사용하는 전송방식에 근접함을 볼 수 있다. 따라서, NLOS채널에서 CSI는 채널용량을 많이 향상시키지 못한다. 한편, 단지 하나의 고유모드만을 사용하는 전송빔형성 시스템은 상대적으로 채널 용량이 크게 떨어지게 되는데 이는 채널에 우세한 고유모드가 없기 때문에 효율이 떨어지기 때문이다.

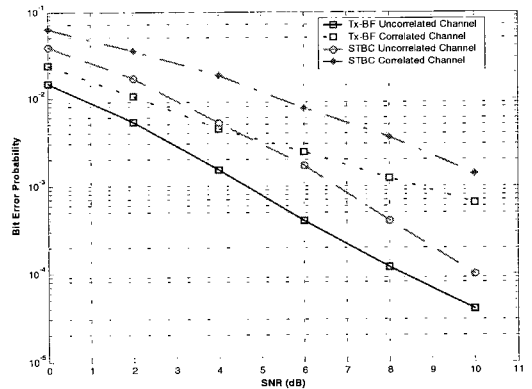
높은 SNR에서 최적 전송시스템과 준최적 전송시스템은 CSI의 유무에 관계없이 비슷한 용량을 갖게 되고, 이들 모두 전송빔형성 시스템과 STBC 시스템보다는 여전히 큰 채널 용량의 향상이 기대된다.

3.3. 링크 성능 향상을 위한 MIMO 시스템

고속 열차와 같은 열악한 환경에서는 MIMO 시스템을 이용한 채널 용량의 향상보다는 다이버시티 효과를 통한 링크의 통화 품질 향상이 더욱 중요한 문제가 된다. 본 절에서는 다이버시티 이득을 얻기 위한 대표적인 시스템인 Alamouti의 STBC와 전송빔형성 시스템을 비교한다.

[그림 3]은 2x2 MIMO 시스템에서의 전송빔형성 시스템과 Alamouti의 STBC의 BER 성능을 나타낸다. 채널환경은 [표 2]와 같은 전송안테나와 수신안테나의 상관도를 갖는다고 가정한다. 전송빔형성 시스템은

귀환된 채널상태정보를 전송안테나에서 활용할 수 있기 때문에 STBC에 비해 어레이 이득(Array Gain)을 얻을 수 있으며 이것은 채널상관도에 관계없이 STBC보다 항상 성능이 2dB 이상 좋은 것을 알 수 있다. 하지만 전송빔형성 시스템은 귀환채널을 통해 동위상 시간(Coherence Time)보다 작은 시간 내에 주기적으로 채널상태정보를 보내주어야 하기 때문에 실제 데이터를 전송할 수 있는 대역폭을 소비하고 수신단이 고속으로 이동할 경우 동위상 시간이 짧아져 적용하기에 무리가 있다. [그림 3]에서 보여지듯, 채널에 상관도가 있는 경우, 다이버시티 차수(Diversity Order)가 낮아져서 두 시스템 모두 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 열차에 안테나를 설치할 경우 안테나간 상관도를 줄이기 위한 안테나간 배치가 중요하다는 것을 의미한다.



〈그림 3〉 2x2 MIMO 시스템에서 전송빔형성 시스템과

〈표 2〉 전송 안테나 및 수신 안테나간 상관도

	R_T	R_R
비상관 채널	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
상관 채널	$\begin{bmatrix} 1 & -0.7249 + 0.6665j \\ -0.7249 - 0.6665j & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -0.33043 \\ -0.3043 & 1 \end{bmatrix}$

3.4. ESCORT 프로젝트 평가

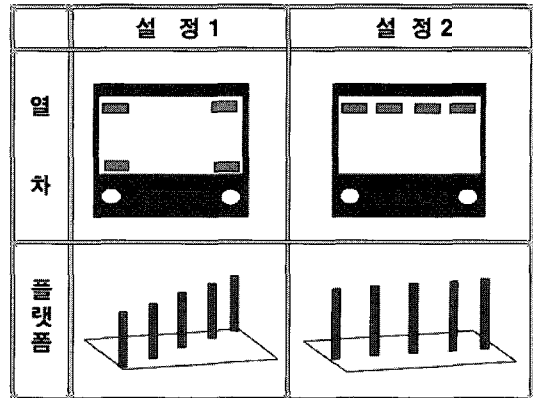
ESCORT 프로젝트[10]에서는 전송 시스템의 성능을 분석하기 위하여 다음의 세 가지 전송 환경에서 MIMO 시스템을 검증하였다. 첫 번째 경우 협소한 터널에서의 전송이며, 두 번째 경우 밀폐된 역사에서의 전송 환경 그리고 세 번째는 실외에서의 전송 환경에서 성능을 분석하였다.

협소한 터널의 경우, 만약 전송 안테나간의 간격이 2미터 이하로 설치한 경우에 대한 전송시스템의 유효 도달 범위(Coverage)는 대략 450미터인 것으로 나타났다.

이는 터널환경에서는 송·수신단 사이의 거리에 따른 전송 채널 사이의 상관도가 증가하여 성능을 저하시키기 때문이다. 그러나 송신기를 터널에 중간에 설치하면 지하철에서도 충분한 유효 도달 범위를 얻을 수 있다. 한편, 밀폐된 역사의 경우 전송 시스템은 대부분 오류 없이 전송 되었고 다중 안테나 시스템은 우수한 성능을 발휘할 수 있었다. 또한 실외의 경우에서도 유효 도달 범위가 1km 정도의 만족스러운 결과를 얻었다. 여기서, 유효 도달 범위란 30dBm의 전력에 대해 10^{-6} 의 BER이 얻어지는 범위까지를 말한다.

이러한 일련의 실험들과 모의실험 결과를 바탕으로 ESCORT 프로젝트에서는 MIMO 전송 시스템이 전송 조건이 열악한 환경하에서도 유효한 기술임을 확인하였다[11]. 이는 송·수신단의 다중 안테나를 이용하여 채널 용량을 증가시키고 다이버시티 효과를 얻어 기존의 SISO 전송 시스템에 비해 성능을 크게 향상시키기 때문이다.

송·수신단 안테나간 간격을 넓혀 안테나들간의 상관도를 줄이면 더 큰 다이버시티 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다[12]. [그림 4]에서는 ESCORT 프



〈그림 4〉 ESCORT 프로젝트에서 사용된 플랫폼과 열차에서의 안테나 배치

로젝트에서 안테나의 배치에 따른 상관도를 비교하기 위해 사용된 안테나들의 배치 형태이다. 열차의 경우 4개의 안테나를 각각 4개의 모서리에 배치하여 간격을 넓히면 안테나간의 상관도를 줄일 수 있게 되고 플랫폼에서는 대각의 방향으로 송신 안테나를 배치할 때 상관도를 줄일 수 있다고 결론 내려졌다. 즉 설정 1 이 열차에 4개의 안테나를 사용하면서 상관도를 낮출 수 있는 최적의 배치임이 실험을 통해 확인되었다[10].

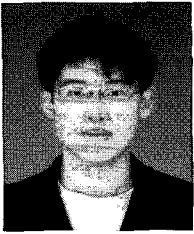
IV. 결 론

본 논문에서는 철도 환경에서 다중안테나 시스템의 이동 통신 시스템에의 적용 가능성을 알아보았다. 철도 환경에서 열차와 기지국간의 무선 채널 모델을 제시하였으며 기지국이 선로 쪽에 있는 경우와 그렇지 않은 경우의 차이점을 제시하였다. 기지국이 선로 쪽에 있지 않은 경우 LOS의 감쇄와 음영효과의 증대로 인한 성능 저하 문제를 극복하기 위한 방법으로 다중 안테나 시스템을 소개하였다. 현재까지의 MIMO 시스템의 연구 진행 사항을 다이버시티와 채널 용량의 관점에서 설명하였으며 다이버시티 효과를 증대하는 응용이 적합한 활용 방안을 제시하였다. 한편, 안테나간의 상관도는 성능에 큰 영향을 미치게 되며 이는 ESCORT 프로젝트에서 제시한 안테나 배치를 통해 성능을 최적화시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Farrokh Abrishamkar, James Irvine, "Comparison of Current Solutions for the Provision of Voice Services to Passengers on High Speed Trains," IEEE VTS-Fall VTC 2000, 52nd, Volume: 4, pp. 24-28, Sept. 2000
- [2] Vainikainen, P. et al, "Characteristics of the 2GHz radio propagation channel in high speed train environment," Proceedings of the ACTS Mobile Communications Summit, pp. 616-623, November 1996.
- [3] Goller, M, "Application of GSM in High Speed Trains: Measurements and Simulations," Radio communications in Transportation, IEE Colloquium on, pp. 5/1-7, 16 May 1995.
- [4] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity techniques for wireless communications," IEEE J. Select. Areas Com., vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [5] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, pp. 744-765, Mar. 1998.
- [6] Y. Xin, Z. Wang, and G. B. Giannakis, "Linear unitary precoders for maximum diversity gains with multiple transmit and receive antennas," Signals, Systems and Computers, pp. 1553 -1557, 2000
- [7] Z. Liu, G. B. Giannakis, B. Muquet, and S. Zhou, "Space-time coding for broadband wireless communications," Wireless Syst. Mobile Comput., vol. 1, no. 1, pp. 3553, Mar. 2001.
- [8] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," European Transactions on Telecommunications, pp. 585-595, Nov.-Dec. 1999.
- [9] Mattias Wennstrom, "On mimo Systems and adaptive arrays for wireless communication: Analysis and Practical Issues," Uppsala University, Dissertation, 2002.
- [10] IST 1999-20006 D 6021 Final Report.
- [11] Martine Lienard, Pierre Degauque, "Investigation on MIMO channels in subway tunnels," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, Volume: 21 Issue: 3, pp. 332 -339, April 2003
- [12] Jean-Francois Pardonche, Marion Bernineau, Christophe Sequinot, Martine Lienard, "MIMO propagation channel models in underground environment," Communication dans 5th Nordic Signal Processing Symposium, october 2002.
- [13] 박인규, 김백현, 신승훈, 광경섭, "기지국용 스마트 안테나를 적용한 MC/DC-CDMA 시스템의 성능 분석," 한국통신학회논문지, Vol. 27, No. 4B, 2002. 4.
- [14] 이해정, 양청해, 광경섭, "다이버시티와 공간 다중화를 고려하여 선형 STBC를 사용한 OFDM 시스템 성능 분석," 한국통신학회논문지, Vol. 29, No. 3A, 2004. 3.

〈저자소개〉



이 철 진 (Cheol Jin Lee)

2003년 2월 : 인하대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업
2003년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 정보통신공학과 석사 과정



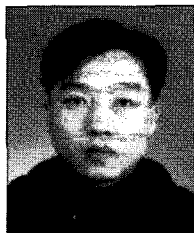
황 현 철 (Hyun Chyeol Hwang)

1997년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
1999년 2월 : 인하대학교 전자공학과 석사 졸업
1999년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 전자공학과 박사 과정



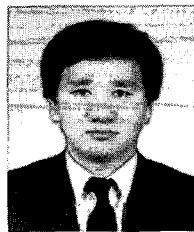
조 봉 관 (Bong Kwan Cho)

1992년 2월 : 대구대학교 전자공학과 학사
1995년 3월 : 일본 게이오대학교 계측공학과 석사
1996년 12월 : 한국철도기술연구원 근무(선임연구원)



신 승 훈 (Seung Hoon Shin)

1995년 2월 : 인하대학교 전자공학과 학사 졸업
1997년 2월 : 인하대학교 전자공학과 석사 졸업
2003년 2월 : 인하대학교 전자공학과 박사
2003년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 UWB-ITRC 연구원



곽 경 섭 (Kyung Sup Kwak)

1977년 2월 : 인하대학교 전기공학과 학사 졸업
1979년 2월 : 인하대학교 전기공학과 석사 졸업
1981년 12월 : 미국 USC 전자공학과 석사 졸업
1988년 2월 : 미국 UCSD 통신이론 및 시스템 박사
1988년 2월 ~ 1989년 2월 : 미국 Hughes Network Systems 연구원
1989년 2월 ~ 1990년 3월 : 미국 IBM Network Analysis Center 연구원
1995년 1월 ~ 1999년 12월 : IEEE Seoul Section 총무 이사
2000년 3월 ~ 2002년 2월 : 인하대학교 정보통신전문대학원 원장
2002년 1월 ~ 현재 : 한국통신학회 부회장