

고속 열차를 위한 다중안테나 시스템 성능 분석

On the Performance of STBC/Beamforming Systems for High Speed Trains

이철진¹ · 신승훈² · 최규형³ · 황현철⁴ · 곽경섭⁵

Cheol-jin Lee · Seung-Hoon Shin · Kyu-Hyoung Choi · Hyun-Chyeol Hwang · Kyung-Sup Kwak

Abstract

Recently, MIMO communications are regarded as one of the most promising emerging wireless technologies. This paper investigates MIMO wireless systems and their applications in a railway communication system. We firstly discuss railway communication environments including propagation characteristics and radio channel modeling. Next, we consider channel estimate methods, which is a crucial issue under rapidly varying channel condition due to the movement of trains. Channel estimation methods for MIMO systems are addressed and the effect of estimation error is studied. We also have performed simulations for transmit beamforming system and STBC(Space-time block coding) to investigate the performance of MIMO schemes in railway systems.

Keywords : 다중안테나(MIMO: Multiple Input Multiple Output), 시공간 블록 코드(STBC:Space-time Block Code), 전송 빔형성 시스템(Transmit Beamforming System), 고속 열차

1. 서론

무선 통신 링크는 데이터 전송시 전송 채널의 잡음, 간섭 및 페이딩 등으로 인하여 유선 통신 채널과 동일한 서비스 품질을 얻기가 어렵다. 특히, 이동체인 열차와 기지국 간의 무선 채널은 상대적으로 빠른 이동 속도 때문에 채널의 특성이 시간에 따라 매우 빠르게 변화하여 빠른 페이딩이 발생한다. 또한 열차와 기지국간에 존재하는 건물, 터널 등의 장애물로 인해 무선 링크는 심한 왜곡을 겪게되며 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 무선 및 이동통신에 관한 연구의 대부분은 무선채널에 의한 성능 저하 및 시스템 용량 감소를 극복하기 위한 기술 개발에 초점이 맞추어져 있다. 특히, 무선채널 환경하에서 페이딩 등에 의한 성능 저하를 극복하기 위하여 시공간 다이

버시티(Space-time diversity) 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-4]. 시공간 다이버시티 기법은 송·수신 양단에 다수의 안테나를 사용하여 추가적인 자원(주파수 또는 시간)의 소모 없이 다이버시티 이득을 얻는 방법이다.

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[5]. ESCORT 프로젝트는 유럽의 IST(Information Society Technologies) 연구과제의 하나로 GSM-R(Global System for Mobile communication for Railways) 시스템을 열차 환경에 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.

MOSTRAIN(Mobile communications Services for high speed TRAINs) 연구과제는 UMTS(Universal Mobile Telecommunications System) 시스템에서 특히 고속 운행 중인 열차 안의 가입자들에게 이동 서비스를 효율적으로 제공하기 위한 기법에 대한 연구 과제로 이동 중인 열차와 기지국 간의 무선채널을 측정하고 모델링을 수행하였다[6].

1 인하대학교 정보통신공학과 석사 과정
2 인하대학교 UWB-PC 연구원
3 한국철도기술연구원 전기신호연구본부
4 인하대학교 전자공학과 박사 과정
5 인하대학교 정보통신공학과 교수

그러나 MOSTRAIN 프로젝트는 단지 단일 안테나 시스템만을 고려하여 성능을 분석하였고 ESCORT 프로젝트에도 지하 및 터널 환경이 아닌 교외 환경에서의 구체적인 성능지표를 제시하지 못하고 있다. 또한 이러한 연구들은 고속 이동체의 성능에 크게 영향을 미치는 파일럿 심볼 간격에 따른 구체적인 성능 차이를 제시하지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 두 가지 대표적인 다중 안테나 시스템을 교외 지역을 달리는 고속 열차 환경에 적용했을 때의 구체적인 BER 성능을 분석하며 파일럿 간격의 차이에 따른 성능 차이를 제시한다.

본 논문에서는 먼저 2절에서, 철도 환경하에서 이동체와 기지국간의 무선 채널 환경의 특성을 분석한다. 다음으로 3절에서는 고속 이동 환경 하에서의 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 채널에 대한 시스템 모델링에 대해 논의한다. 마지막으로 4절에서, 모의실험을 통하여 성능 비교 분석을 수행한다.

2. 철도 무선 통신 환경

본 절에서는 이동통신 시스템의 관점에서 철도 환경을 고려한다. 철도 무선 통신 환경에서는 빠른 페이딩(Fast Fading), 도플러 천이(Doppler Transient) 및 투과 손실(Penetration Loss)과 같은 무선 채널 환경과 철도를 위해 산을 깎아 만든 커팅(Cutting) 및 터널 등의 특수 지형을 고려해야 한다.

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(Cellular) 시스템에서는 긴 커팅 지형 내에서 심각한 음영효과가 발생하게 되며 이는 통화를 끊기게 하는 원인이 된다. 이러한 심각한 음영효과는 커팅 지형의 너비와 깊이 및 지역의 초목지 존재 유무에 따라 영향을 받게 된다. 철도 환경에서의 커팅 지형은 경사도가 낮은 뿐만 아니라 초목지일 경우 전파 신호를 반사하지 않고 흡수하게 되어 긴 커팅 지역으로 들어오는 전파의 손실은 크게 된다.

그러나 기지국을 선로변에 설치할 경우 커팅 및 터널 등에 의한 영향은 극복될 수 있고, 반면에 기지국이 선로변에 설치되어 있지 않은 일반적인 셀룰라 환경의 경우 도플러 천이 및 투과 손실 문제는 크지 않다[7,8]. 따라서 본 논문에서는 특수 지형에는 선로변에 기지국이 설치되어 있다고 가정하고 일반적인 셀룰라 환경에서의 빠른 페이딩 환경에 의한 영향에 대해서 논의한다.

철도 환경에서의 빠른 페이딩에 대한 무선 채널은 보통 $R\alpha_X$ 3dB (Rural Area, X km/h, LOS: Line Of Sight 3dB)로 모델링 하며, $R\alpha_X$ 채널 모델은 라이시안(Ricean) 분포를 가

지는 하나의 직선 경로와 레일레이(Rayleigh) 분포를 따르는 3~5개의 페이딩 경로로 구성된다[8]. 그러나 주요 다중 경로의 최대 지연 시간이 $0.5\mu s$ 이므로 $R\alpha_X$ 채널은 CDMA IS-95 시스템에서도 단일 경로로 간주할 수 있다. 일반적으로 도심 지역에서는 이동체 주위의 물체로부터 여러 반사 경로가 있지만 철도 환경에서는 초목지 등이 전파를 흡수하므로 반사 경로가 존재하지 않게 되며 도심 지역과 같은 전물이 많지 않으므로 직선 경로 성분이 존재할 수 있다. 따라서 4절의 모의 실험에서는 철도 환경에서의 MIMO시스템에 대한 채널 모델을 LOS가 3dB 존재하는 $R\alpha_X$ 라 가정한다.

철도 환경하의 무선 채널은 빠른 페이딩 및 심각한 음영효과가 존재하는 열악한 환경이기 때문에 이를 극복하기 위해서는 다이버시티 이득을 통한 링크 품질 향상이 필수적으로 요구된다. 다음절에서는 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 다중 안테나 시스템의 전송 빔형성 다이버시티와 시공간 다이버시티 기법을 소개한다.

3. MIMO 시스템 모델링

3.1. 전송 빔형성 시스템

다중 송신안테나를 이용한 송신 다이버시티 기법은 크게 수신기에서 송신기로의 귀환 정보의 유무에 따라 개루프(Open Loop) 방식과 폐루프(Closed Loop) 방식으로 나눌 수 있다. 보통 TxAA(Transmit Antenna Array)와 고유빔 형성 기법(Eigen beamforming)은 폐루프 방식이며 시공간 부호화 기법은 개루프 방식에 해당된다. 폐루프 방식 또는 전송빔형성 시스템(Transmit Beamforming System)은 수신단에서 송신단으로 채널 상태 정보(Channel State Information)를 귀환하거나 상향링크의 채널을 추정하여 활용하는 전송방식이다. 채널 상태 정보를 통해 우세한 고유모드로 데이터 심볼을 전송하여 공간 다이버시티를 얻을 수 있게 된다.

전송빔형성 시스템의 성능은 열차의 이동 속도, 귀환 채널의 반복 주기(f_b), 채널 상태 정보의 양자화 수준(Quantization level)에 의해 영향을 받는다. 채널 상태 정보를 수신단으로 귀환시키기 위해서는 채널 상태에 대한 양자화를 수행하여야 하며, 송신 안테나의 수가 M 개인 경우 채널 정보는 M 차원의 벡터로 표현된다. 그러나, 첫 번째 안테나에 대하여 상대적인 진폭과 위상으로 동일한 정보를 표현할 수 있으므로 $(M-1)$ 개의 상대적인 채널 정보만을 송신단 측으로 귀환시킬 수 있다. $(M-1)$ 개의 상대적인 채널 정보는 벡터 양자화를 통하여 표현할 수 있으며, 수신단에서는 수신 신호 대 잡음비를 최대화 시키도록 송신 안테나의 가중치 w 를 다음과 같이 계산한다.

$$W = \arg \max_{x \in W} ||Hx||^2 \quad (1)$$

위 식에서 W 는 송·수신 양단 모두 가지고 있는 가중치 벡터를 선택하기 위한 코드 집합이다. 코드 집합의 크기가 증가할수록 보다 정확한 가중치 값을 송신단에서 사용할 수 있다. 그러나 코드 집합 W 의 크기가 W_n 이라면, 하나의 코드 값을 전송하기 위해서 $Q_n = \lceil \log_2 W_n \rceil$ 비트가 필요하기 때문에 귀환 채널의 전송량이 증가하게 되어 귀환 채널의 효율이 떨어지게 된다. 본 논문에서는 각 안테나에 대하여 Q_n 비트를 사용하여 채널 상태 정보를 송신단으로 f_b 의 갱신률로 귀환시킨다고 가정한다. 따라서, 송신 안테나의 수가 M 개일 경우, 채널 상태 정보를 위한 귀환 채널의 전송률은 다음과 같다.

$$R_{total} = (M - 1) \times Q_n \times f_b \quad (bps) \quad (2)$$

즉, 송신 안테나가 3개이고 2 비트를 사용하여 1,500Hz로 채널 상태를 귀환 시키는 경우의 귀환 채널의 전송률은 6kbps가 된다. 전송 빔형성 시스템의 경우 보통 귀환 채널의 전송률이 제한되어 있으므로 채널의 시간적 변화가 큰 환경의 경우 성능이 크게 열화되는 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 상대적으로 저속인 열차 환경에 전송 빔형성 시스템을 적용하고 그 모의 실험 결과를 제시한다. 채널 정보는 수신단에서 완벽히 알고 있다고 가정하였고 Q_n 과 R_{total} 에 따른 전송 빔형성 시스템의 성능 그래프를 제시한다.

3.2. Alamouti의 STBC(Space-time Block Code)

시공간 부호(Space-time Code)화 기법은 수신 다이버시티를 얻기 어려운 하향링크에 적합한 부호화 방식으로 여러 개의 송신 안테나를 이용하여 다이버시티 이득을 얻는다. Alamouti는 최초로 2 * 2 복소 직교 설계(Complex Orthogonal Design)를 이용한 송신 다이버시티를 제시하였고[1], Tarokh은 이를 일반화하여 직교 설계 이론에 기반한 직교성을 갖는 부호어(Codeword) 행렬을 이용하여 시공간 블록부호를 제안하였다[2,3].

다중 송·수신 안테나를 사용한 시스템에서 시스템 용량 및 성능 향상을 위해서는 채널 상태 정보를 알 수 있어야 한다. 2개의 송신 안테나와 1개의 수신 안테나에 대한 STBC(Space-time Block Coding) 시스템의 신호 모델은 다음과 같다[1].

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 \\ h_2^* & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4)$$

식에서 n 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 나타내며 평균이 0, 분산은 σ_n^2 이다. 서로 다른 두 채널 h_1 과 h_2 는 연속인 두 심볼 s_1, s_2 구간 동안 각각 일정한 값을 갖는다고 가정한다.

채널 추정을 위한 파일럿 심볼 블록의 길이를 BL이라 할 때 채널 추정 정확도는 다음의 분산 값에 의해 평가될 수 있다[9].

$$\sigma_\epsilon^2 = \frac{2}{BL} \cdot \frac{\sigma_n^2}{P_p} \quad (5)$$

여기서 P_p 는 파일럿 심볼의 전력이다.

그러나 채널이 시간에 따라 변하기 때문에 추가적인 오류가 발생하게 되고 채널 추정 오류 ϵ 은 식 (5)에 의해 야기되는 ϵ_n 부분과 채널의 시간 변화에 의해 발생하는 추가적인 추정오류 부분 $\epsilon_{\Delta h}$ 로 나눌 수 있다. 따라서, 채널 추정오류는 다음의 식으로 표현된다.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_n + \mathcal{E}_{\Delta h} \quad (6)$$

채널 추정 오류는 크게 두 가지 성분, 즉 잡음에 의한 성분과 채널의 시간 변화에 의한 성분으로 분류할 수 있으며, 잡음에 의한 채널 추정 오류는 파일럿 심볼 블록의 길이를 증가시킴으로써 감소시킬 수 있다. 그러나 열차가 고속으로 이동 중일 때는 잡음에 의한 영향보다는 채널의 시간 변화에 의한 오류가 주된 채널 추정 오류의 원인이 된다. 따라서 열차의 이동 속도가 높은 경우 채널 추정 오류를 낮추기 위해서는 파일럿 심볼의 반복 구간을 가능한한 최소화해야 한다. 다음절의 모의실험에서는 철도 환경에서 이러한 파일럿 간격에 따른 Alamouti STBC의 성능 결과를 제시한다.

4. 성능 평가 및 모의 실험

4.1 전송빔형성 시스템에 대한 성능 평가

본 절에서는 다중 안테나 시스템에서 특히 채널 상태가 천천히 변화하는 경우에 우수한 성능을 제공할 수 있는 전송빔형성 시스템에 대하여 모의실험을 수행하고 결과를 분석한다.

전송빔형성 시스템은 열차가 정지 상태에 있거나 저속 운행하고 있는 구역에서 효율적으로 사용될 수 있다. 비록 이동 속도가 증가함에 따라 송신 안테나의 가중치 오류 증가로 인해 성능이 저하되지만 기존의 단일 송·수신 안테나를 사용하는 시스템에 비하여 보다 우수한 성능을 보인다.

[표 1]은 모의 실험에 사용된 주요 파라미터이다. 실험에

사용된 반송 주파수는 2GHz이고 수신단의 안테나간 간격은 3λ (λ : 반송파의 파장)이며 4개의 안테나를 장착할 수 있다고 가정하였다[5][10,11]. 송신단은 2개의 안테나로 구성되며 고정 기지국임을 고려해 5λ 의 안테나 간격을 갖는다고 가정하였다. 채널 모델은 앞 절에서 제시한 바와 같이 LOS 성분이 3dB인 RAx 채널이며 안테나들간의 상관도는 고속 이동체를 위한 MIMO 채널 모델인 3GPP Case3[12]를 적용하였다. 채널 상태 정보는 수신단에서 알고 있다고 가정하였다.

표 1. Simulation Parameters

파라미터	값
변조 방식 및 전송률	BPSK, 30kbps
반송파 주파수	2.0 GHz
안테나 구성 및 간격	송신단: 2개(5λ) 수신단: 4개(3λ)
채널 모델	RAx 3dB, 3GPP Case3

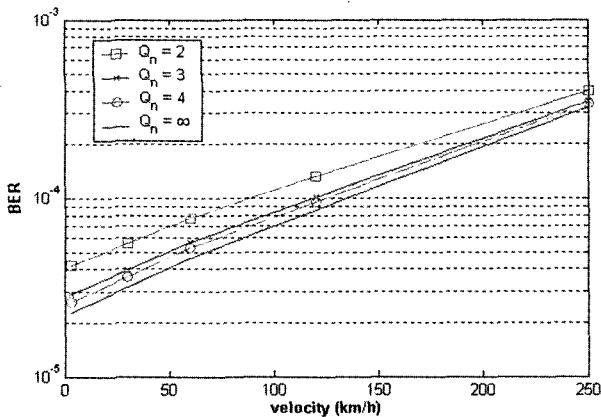


그림 1. BER Performance according to Quantization Level

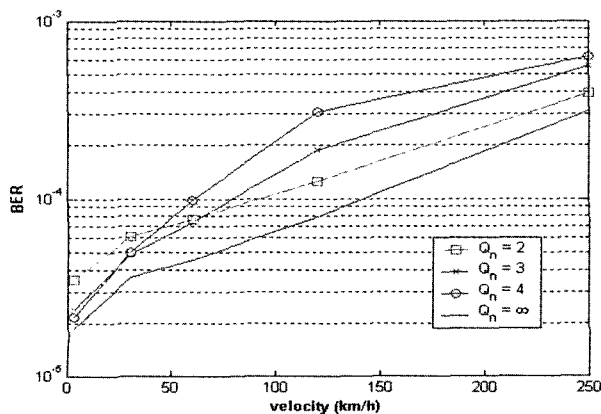


그림 2. BER Performance in Fixed Rtotal

[그림 1]과 [그림 2]는 열차의 이동 속도에 따른 전송빔형성 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 실제 시스템에서는 채널 상태 정보를 양자화를 통하여 귀환시키기 때문에 이상적인 경우($Q_n=\infty$)에 비해 양자화 오류가 발생하게 된다.

[그림 1]로부터, 양자화 수준이 높아짐에 따라 이상적인 경우로 성능이 근접해 가는 것을 볼 수 있다. 열차의 이동 속도가 상대적으로 저속인 경우, 4비트($Q_n=4$)를 사용한 시스템이 2비트($Q_n=2$)를 사용한 시스템 비하여 우수한 성능을 제공할 수 있다. 그러나 4비트를 사용한 경우는 전체 귀환 채널의 전송량이 2비트를 사용한 시스템의 두 배가 되어 시스템의 오버헤드가 증가하게 된다. 또한, 열차의 속도가 상대적으로 높은 경우에는 채널의 시간 변화에 의한 채널 상태 정보의 지연 오류가 양자화에 따른 오류보다 지배적인 영향을 미치게 되어 열차의 속도가 증가함에 따라 양자화에 의한 성능차이는 현저히 감소하게 된다.

[그림 2]는 전체 귀환 채널의 전송률을 고정한 경우의 열차의 이동 속도에 따른 BER 성능을 나타낸다. 식 (2)로부터, R_{total} 이 고정된 경우 귀환 채널의 갱신률을 높이기 위해서는 양자화 수준을 낮추어야 한다. 이동체의 속도가 상대적으로 고속인 경우에는 현재 채널 상태 정보를 빠르게 귀환하는 것이 중요하므로 귀환 채널의 양자화 수준을 낮추는 것이 유리하다. 그러나 상대적으로 저속의 경우에는 채널의 시간 변화율이 작으므로 양자화 수준을 높여 현재의 정확한 채널 상태 정보를 귀환시키는 것이 성능을 더욱 개선시키는 방법이 된다.

전송빔형성 기법은 열차의 이동 속도, 귀환 채널의 반복 주기 및 채널 상태 정보의 양자화 수준에 의해 성능이 크게 변화하며 열차의 이동 속도가 증가함에 따라 시스템 성능은 급격히 저하됨을 볼 수 있었다. 따라서 채널의 시간 상관도에 따라 가변적인 양자화를 수행하는 방법을 사용한다면 보다 효율적인 전송빔형성 기법을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 예를 들어, [그림 2]의 경우에서 열차의 속도가 40km/h 일 때까지는 양자화 수준, $Q_n=4$ 를 사용하다가 70km/h까지는 $Q_n=3$ 을 그리고 그 이후로는 $Q_n=2$ 인 양자화 수준을 가변적으로 사용하면 철도 환경에서 좀 더 효과적인 성능을 얻을 수 있다.

4.2. 시공간 블록 부호기법에 대한 성능 평가

본 절에서는 송·수신 안테나 수, 파일럿 심볼 블록의 주기 및 이동체 속도에 따른 Alamouti STBC의 성능을 분석한다. [표 2]는 모의 실험에 사용된 파라미터이며 안테나의 구성 및 간격은 [표 1]의 경우와 동일하다. 또한 수신단에서는 파일럿 심볼을 사용하여 채널을 추정한다고 가정한다.

[그림 3]은 SNR이 10dB이고 파일럿 심볼의 간격이 8개 블록인 경우에 대하여 이동 속도에 따른 Alamouti STBC의 성능을 나타낸다. 모든 안테나 구성에 대하여 속도가 증가함에 따라 BER 성능이 저하되지만 Alamouti STBC를 사용한 다중 안테나 구성은 단일 안테나 시스템보다 더 좋은 성능을 보여주며 안테나 수가 증가함에 따라 더욱 성능이 개선된다. 이는 단일 안테나 시스템에 비해 송·수신 안테나 수가 증가할수록 다이버시티 차수가 증가하며 수신 안테나 수가 많아질수록 어레이 이득(Array Gain)이 증가하기 때문이다. 다중 안테나 시스템은 상대적으로 저속에서 큰 성능 향상을 얻을 수 있게 되며 고속으로 갈수록 채널 추정 오류에 의해 다이버시티 이득이 반감되어 성능 차이가 줄어들게 된다. 그럼에도 불구하고 열차에 4개의 안테나가 있는 경우 단일 안테나 시스템에 비해 약 350km/h의 속도에서도 10배 이상 좋은 BER 성능을 얻을 수 있다.

[그림 4]와 [그림 5]는 각각 고속열차와 일반 열차의 속도 상에서 파일럿 심볼의 반복 주기에 따른 BER 성능을 나타낸다. [그림 4]는 도플러 주파수(f_d)와 심볼 시간(T_s)의 곱이 0.02(324km/h)일 경우의 SNR에 따른 BER 성능이다. [그림 4]에서, 파일럿 심볼의 반복 주기가 8개 블록인 경우 10^{-3} 의 BER 성능을 얻기 위한 SNR은 약 11dB이다. 파일럿 심볼의 반복 주기를 줄일수록 성능이 크게 향상되며 이 심볼의 반복 주기를 4개 블록으로 한 경우에는 10dB의 SNR에서 약 10^{-4} 의 BER을 얻을 수 있게 된다.

[그림 4]로부터, 고속 이동체의 경우에는 파일럿 심볼의 반복 주기에 따라 민감한 성능차이를 보이며 이 반복 주기가 충분히 짧지 않은 경우 높은 품질을 보장할 수 없음을 알 수 있다. 그러나 이 주기를 줄일 수록 전송할 수 있는 데이터 심볼의 양은 줄어들게 되므로 데이터 전송률은 점차 떨어지게 된다. 또한, SNR이 15dB 이상에서는 SNR을 증가시켜도 특정 BER 이상의 성능을 얻을 수 없는 오류 바닥(Error floor) 현상이 나타난다.

[그림 5]는 동일한 시스템에서 $f_d T_s = 0.005$ (81km/h)인 경우에 대한 BER 성능을 나타낸다. [그림 4]와 비교할 때 모

표 2. Simulation Parameters

파라미터	값
도플러($f_d T_s$)	0.005, 0.02
파일럿 심볼 간격	4~30 심볼 블록
안테나 구성 (안테나간 간격은 [표 1]의 경우와 동일)	[그림 3]의 경우 1by1, 1by2, 2by2, 2by4 [그림 4]와 [그림 5]의 경우 2by4

든 경우에 대하여 더 좋은 BER 성능을 보여주고 있으며 이는 채널의 시간 변화에 의한 추정 오류가 상대적으로 더 적기 때문이다. 파일럿 심볼의 반복 주기를 30개 블록으로 할

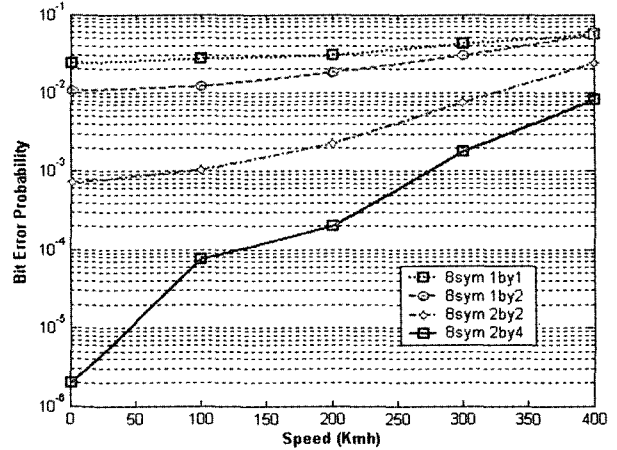


그림 3. Train Speed vs. BER Performance

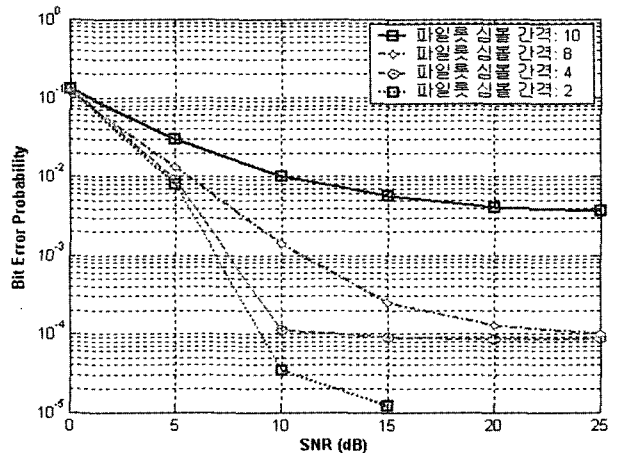


그림 4. STBC Performance in High Speed Trains

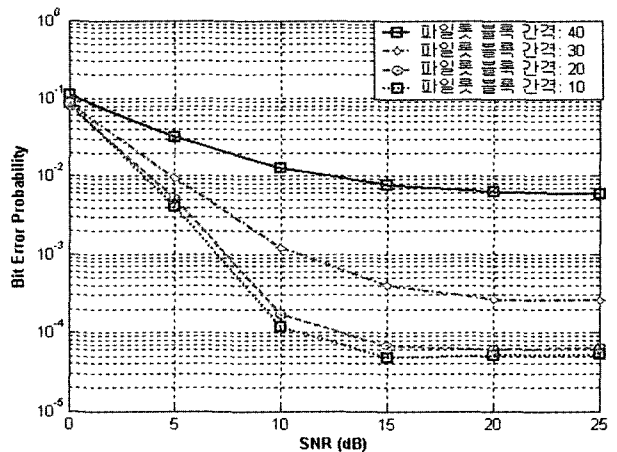


그림 5. STBC Performance in Normal Speed Trains

경우에 약 10dB에서 10^{-3} 의 BER 성능이 얻어졌다. 또한 이 블록의 반복 주기가 10개 블록일 때, 고속열차의 경우에는 10^{-3} 의 BER 성능을 얻을 수 없지만 일반 열차의 경우에는 약 7dB에서 이 성능을 얻을 수 있다. 상대적으로 저속인 경우 고속의 경우와 비교할 때 파일럿 심볼 블록의 간격에 따른 성능 변화는 덜 민감하지만 이 경우에도 SNR이 15dB 이상일 경우 Error floor 현상이 발생하게 된다.

이동체가 특정 속도 이상일 경우 아무리 높은 전력으로 데이터를 전송하더라도 BER을 특정 값 이하로 낮출 수 없는 Error Floor가 발생하게 되고 이 지점은 다이버시티 차수와 파일럿 심볼의 반복 주기에 따라 조금씩 차이를 보이게 된다. 따라서 철도 환경에서 시스템이 목표로 하는 SNR 대비 BER에 따라 송·수신단의 안테나 구성 및 파일럿 심볼의 반복 주기를 정해야 한다.

동일한 안테나 다이버시티 차수를 사용한 시스템에서도 수신단 안테나를 많이 사용한 시스템이 송신단 안테나를 많이 사용한 시스템에 비해서 우수한 성능을 제공할 수 있고, 열차의 무선 통신 시스템은 기존의 이동통신용 단말기에 비하여 다수의 수신 안테나를 구축하는 것이 용이함으로 다중 송·수신 안테나를 이용한 시스템은 실제적 측면에서도 구현 가능성이 높을 것으로 예상된다.

또한, 열차가 정지한 상태 혹은 저속인 경우에는 전송빔 형성 기법을 사용함으로써 시스템 용량 증가 및 성능 향상을 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 열차의 이동 속도가 고속인 경우에는 전송빔형성 기법보다는 이동체 속도에 덜 민감한 STBC 등의 시공간 블록 부호화를 사용하는 것이 시스템 성능 측면에서 보다 효과적인 방법으로 여겨진다.

5. 결론

본 논문에서는 대표적인 두 가지 다중안테나 시스템인 전송빔형성 시스템과 STBC 시스템을 철도 환경 적용하여 성능을 분석하였다. 열차의 특성상 수신단에는 4개의 안테나까지 장착할 수 있다고 가정하였다. 모의 실험을 통해 다중 안테나 시스템은 고속에서도 단일 안테나 시스템에 비해 우수한 성능을 제공할 수 있음을 볼 수 있었다.

전송 빔형성 시스템의 경우 수신단에서 채널 상태 정보를 정확히 안다고 가정하고 양자화 수준과 채널의 전송률에 따른 성능을 분석하였다. 전송 채널이 고정되어 있는 경우 이동체의 속도에 따라 최적의 양자화 수준이 변하게 됨을 볼 수 있었다. 따라서 철도 환경에서 이동 속도에 따른 적절한 가변 양자화 수준을 사용하면 최적의 성능을 얻을 수 있다.

Alamouti STBC 시스템의 경우 수신단으로의 귀환 정보가 필요하지 않으므로 상대적으로 고속에서 적용하는 것이 유리하다. 그러나 채널이 빠르게 변할 경우 수신단에서 채널 상태 정보를 정확히 안다고 가정할 수 없으므로 파일럿 심볼의 간격에 따른 BER 성능을 제시하였다. 주어진 안테나 구성에 대하여 시스템이 목표로 하는 BER 성능에 따라 시스템의 적절한 파일럿 심볼 간격을 볼 수 있었다.

참고 문헌

1. S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity techniques for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Com.*, vol.16, pp.1451-1458, Oct. 1998.
2. 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.
3. V. Tarokh, Hamid Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block coding for wireless Communications : Performance Results," *IEEE J. Select. Areas Com*, Vol. 17, No. 3, pp.451-460, March 1999.
4. A. F. Naguib, N. Seshadri, and R. Calderbank, "Increasing data rate over wireless channels," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 17, pp. 76-92, May 2000.
5. IST 1999-20006 D 6021 Final Report.
6. P. Vainikainen, 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.
7. 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, Vol. 4, pp.24-28, Sept. 2000.
8. M. Goller, "Application of GSM in High Speed Trains: Measurements and Simulations," *Radio communications in Transportation*, IEE Colloquium on, pp.5/1-7, 16 May 1995.
9. M. Stege, M. Bronzel, G. Fettweis, "On the performance of space-time block codes," *VTC 2001 Spring*. *IEEE VTS 53rd*, Vol. 3, pp.2282-2286, May 2001.
10. Martine Lienard, Pierre Degauque, "Investigation on MIMO channels in subway tunnels," *Selected Areas in Communications*, *IEEE Journal on*, Vol. 21, pp.332-339, April 2003.
11. 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.
12. 3GPP, TSGR1#23 R1-01-1179, "A standardized set of MIMO radio propagation channels," *Jesu, Korea*, November 19-23, 2001.