

고속 철도 채널 환경에서 시공간 블록 부호 성능 비교

박성근*, 이종우*, 전태현^o

Performance Comparison of Space-Time Block Coding in High-speed Railway Channel

Seong-guen Park*, Jong-woo Lee*, Taehyun Jeon^o

요약

현대의 철도는 인력 및 물류 수송에 대한 요구의 급증으로 인하여 기존의 궤도 회로 기반의 제한적인 선로 용량 개선에 대한 방안으로 통신 기반 열차 제어(CBTC) 시스템이 제안되었다. CBTC에서는 열차와 승객의 안전을 위해 신뢰도가 높은 통신 시스템이 요구된다. 다양한 간섭 및 잡음 요인을 포함하는 무선 채널 환경에서 성능 향상을 위한 방안 중 하나인 다이버시티 기법은 다수의 송수신 안테나를 이용하여 데이터 전송의 신뢰도를 향상시킨다. 본 논문에서는 시공간 블록 부호화 기법을 철도 채널 환경에 적용하여 그 성능을 분석한다. 이를 위해 철도 환경에 적합한 채널 모델 적용으로 철도의 중요한 부분을 차지하는 교량 환경에 대해 라이시안 페이딩 모델을 가정하였다. 또한 이동 통신 시스템에서 성능 열화의 가장 큰 요인 중 하나인 도플러 현상을 고려하여 다양한 채널 환경에서 시공간 블록 부호화 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 교량 환경에서는 위상오차에 대한 성능의 열화 정도가 다이버시티 차수에 무관하며, 변조 방식의 정상도에 관계됨을 알 수 있다.

Key Words : High-speed Railway, CBTC, MIMO, STBC, Rician fading, Doppler Shift

ABSTRACT

Due to the rapid increase in demand for transportation of human and freight in modern railway systems, the CBTC system has been proposed, which is the solution for improvement of the line capacity that has been limited by the conventional track circuit based train control system. In the CBTC system, higher reliability of the communication system should be guaranteed for the safety of passengers and trains. However, due to the inherent characteristics of the wireless channel environment, performance degradations are inevitable. The diversity techniques can increase the reliability of data transmission using multiple antennas. In this paper, we investigate the performance of the STBC in the railway channel environment. Rician fading model is used for the viaduct scenarios which take important roles in the railway system. Also, considered is the Doppler effect which is an important factor in the mobile communication system. Simulations are performed to analyze the performance of the STBC in various channel environments. Results show that the performance degradation due to the phase error in viaduct scenarios is independent of the diversity order but is affected by the constellation of the modulation.

※ 본 연구는 국토교통부 정부연구과제(2013-0818) 지원 및 서울과학기술대학교 산학협력단 관리로 수행되었습니다.

◆ First Author : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과, shefoooha@seoultech.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : 서울과학기술대학교 전기정보공학과, thjeon@seoultech.ac.kr, 정회원

* 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과, saganlee@seoultech.ac.kr, 정회원

논문번호: KICS2014-01-008, Received January 13, 2014; Reviewed February 21, 2014; Accepted March 7, 2014

I. 서 론

기존 철도에서의 열차 제어 시스템은 궤도 회로를 기반으로 하여 지상 설비 중심의 ATS(Automatic Train Stop)와 차상 설비 중심의 ATC(Automatic Train Control), ATO(Automatic Train Operation) 및 ATP(Automatic Train Protection) 등으로 발전하였다. 신호 시스템의 발전을 통한 열차 제어 시스템은 인원 수송의 안전성을 더욱 강화시키고 적절한 폐색 제어를 통한 표정속도 향상 즉, 열차 운행 간격을 줄여 선로의 운송 및 수송 용량 증대에 많은 기여를 하였다. 이러한 신호 시스템의 발전으로 과거보다 현재의 선로 용량은 더 늘어났지만 궤도 회로를 기반으로 한 열차 제어 시스템에는 여전히 선로 용량의 한계가 존재한다.^[1]

현대에 들어서면서 열차를 이용하는 사람들이 점점 증가해왔고, 이에 따라 열차의 운행 횟수가 빈번해지며 대량 수송에 대한 요구가 증가함에 따라 선로 용량 개선에 대한 문제가 대두되기 시작했다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 새로운 열차 제어 시스템인 CBTC(Communication-based Train Control) 시스템이 제안되었다.^[1] CBTC 시스템은 기존의 궤도 회로 기반으로부터 탈피한 무선통신기반 열차제어시스템이다. CBTC 시스템은 궤도 회로 기반의 ATC, ATO 등의 시스템과 달리 별도의 신호 설비가 요구되지 않으면서 열차 제어 시스템의 효율을 더욱 향상시킬 수 있다. 이미 유럽을 선두로 하여 세계적인 철도신호 기술로서 자리매김하였으며, 현재 국내에서는 신분당선과 의정부, 용인, 부산-김해 등의 경전철 구간에서 채택되고 있으며, 한국형 무선통신열차제어시스템(KRTCS) 개발 같은 국가 R&D 사업에서도 관련 연구개발이 진행되고 있다. 이러한 CBTC 시스템은 향후 고속철도나 다른 일반철도의 신설선 및 기존선에 대한 적용이 예상되고 있다. 이 시스템의 적용 범위는 열차무인운전을 위한 제어 정보, 기관사와 관제실 간 HD 동영상 등을 통한 화상 통신 및 승객을 위한 다양한 멀티미디어 데이터 등을 포함하며 이를 실현하기 위해 LTE와 같은 최신 무선 통신 기술이 기반을 이룰 것으로 예상된다. 이와 관련하여 현재 한국형 철도전용무선통신망인 LTE-R에 대한 검증 또한 진행 중이다.

CBTC 시스템은 무선 통신을 기반으로 하기 때문에 통신 채널은 성능에 많은 영향을 미친다. 무선통신은 유선통신과 달리 통신 케이블이 아닌 자유공간을 매개체로 하기 때문에 전송 경로상의 지형과 이동체의 상대속도에 영향을 받으며 채널의 변화 속도가 유

선채널에 비하여 높은 특성을 가지고 있다. 이로 인한 시스템의 성능 열화는 궁극적으로 열차 운행 시스템의 장애가 발생시킬 수 있다. 데이터 전송 과정에서 발생하는 데이터의 사소한 오류는 또한 대형 사고로 이어질 수 있기 때문에 CBTC 시스템의 통신에 대한 신뢰도 보장은 필수적이며, 이 때문에 다른 시스템과 비교하여 상대적으로 높은 통신 신뢰도가 요구된다.^[2] 무선 통신 시스템에서 통신 성능의 열화를 발생시키는 원인에는 채널 상에 존재하는 간섭, 잡음 및 페이딩 현상이 있다. 철도 환경과 같은 이동 통신 시스템에서는 열차가 고속으로 운행할 경우 더욱 열악해지는 채널 환경에 따라 통신 신뢰도가 악화될 가능성이 높기 때문에 신뢰도 향상에 대한 방안이 요구된다.

무선 통신 환경에서 신뢰도 향상에 대한 방안으로는 일반적으로 진보된 채널 부호화 기법을 이용하는 방법과 송수신 시 다수의 안테나를 이용하는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템이 있다. 이러한 MIMO 시스템 중에는 다수의 안테나들을 공간상으로 서로 이격시켜 동일 정보를 반복 전송함으로써 오류율을 낮추는 공간 다이버시티 기법이 존재하는데, 본 논문에서는 Alamouti 코드로 알려져 있는 대표적인 시공간 부호화 기법의 적용을 검토한다.

적용된 기법의 효과적인 성능 분석과 최적의 방안에 대한 도출을 위해서는 정확한 철도 채널 모델에 대한 이해가 필수적인데, 철도 환경에서 고려할 수 있는 변수에는 도플러 천이, 지연 확산, 투과 손실 등과 함께 교량, 커팅, 터널, 지하와 같은 철도 환경만의 지형적 특성을 들 수 있다. 이처럼 환경 변수가 다양하기 때문에 먼저 특정 지형 환경에 대한 채널 모델을 명확히 해야 할 필요성이 있다.^[3] 본 논문에서는 이러한 점을 고려하여 시공간 부호화 기법 적용에 적합한 철도 채널 모델의 선정을 검토한다.

지형적인 특징과 함께 철도 환경과 같이 열차가 고속으로 이동하는 이동 통신 시스템에서는 도플러 효과는 일반적인 상황에 비해 중요하게 고려되어야 할 요소 중의 하나이다. 도플러 효과로 인해 발생하는 주파수 천이 현상은 반송파 주파수의 천이를 초래한다. 이러한 천이 현상으로 인해 수신 신호에 위상 오차가 발생하는데, 기존의 도플러 효과 보정 또는 위상 복구 기법들의 존재에도 불구하고 철도 환경 특성 상 시스템의 열화로 잔여 위상 오차가 여전히 존재할 수 있다. 본 논문에서는 선정된 철도 채널 모델에서 이러한 잔여 위상 오차가 시공간 부호화 기법의 성능에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 비교 분석한다.

II. 시스템 모델

2.1 채널 모델

철도 환경과 같은 이동 통신 시스템을 고려할 때, 먼저 터널, 지하, 교량, 커팅과 같은 철도의 특징적인 지형 환경이 존재하기 때문에 각 환경에 대한 채널 모델을 고려해야 할 필요성이 있다. 무선 채널 환경에서는 다양한 전파 방해 요소의 존재로 다중경로파가 발생하게 된다. 이러한 다중경로파는 시간에 따라 진폭과 위상이 변하여 수신되므로 신호의 왜곡을 일으킨다. 따라서 다중경로파 즉, NLOS(Non-line of sight) 성분은 LOS(Line of sight) 성분보다 열화의 정도가 크게 된다. 철도에서 고속 열차는 250km/h 이상의 속도로 달릴 수 있거나 500km/h의 속도까지 운행 가능한 열차를 의미하는데, 일반적으로 고속 열차의 선로는 완만한 곡면으로 되어 있어 작은 수의 기지국만으로 LOS를 유지할 수 있다.^[4]

철도의 특수 지형은 그림 1과 같이 터널, 커팅, 교량 등 다양한데, 이러한 환경들에 대한 채널 모델의 연구는 현재까지도 활발하게 진행되고 있다. 지형적 환경이 다양하기 때문에 이러한 환경마다 채널 모델이 달라진다. 도심과 같이 다중경로파를 발생시키는 장애물이 많은 환경에서는 LOS 성분보다 NLOS 성분이 더 강해서 Rayleigh 페이딩 모델을 따르고 교량과 같이 장애물이 적은 환경에서는 NLOS 성분보다 LOS 성분이 더 강해서 Rician 페이딩 모델을 따른다.^[5]

본 논문에서는 LOS 성분이 강한 교량 환경을 포함한 철도 채널 환경에서 시공간 블록 부호화 기법의 성능을 비교 분석하고자 한다. 교량 환경은 다른 지형에 비해 기지국과 열차 사이에 장애물이 적기 때문에 지속적으로 높은 LOS가 유지된다. LOS 환경은 K-factor에 의해 결정되는 Rician 분포를 따른다. K-factor는 NLOS 성분에 대한 LOS 성분의 비율로 설명되는데, 다음과 같은 수식을 따른다.

$$K = \frac{s^2}{2\sigma^2} \tag{1}$$



Fig. 1. Various railway environment
그림 1. 다양한 철도 환경

여기서 s^2 는 LOS 성분의 전력 세기, σ^2 는 NLOS 성분의 분산을 나타낸다. LOS 환경에서 철도의 지형 환경 특성에 따라 K-factor가 달라지는데, 교량 환경에서는 K-factor가 6dB인 Rician 분포를 따르는 것을 실제 측정데이터를 통한 분석으로 확인할 수 있다.^[6]

높은 신뢰도를 요구하는 철도 무선 통신 환경을 고려할 때, 고속 철도에서의 성능 열화 요인을 이해하는 것은 필수적이다. 철도 환경과 같은 이동 통신 시스템에서 특히 고려해야할 요인 중에 하나가 도플러 효과이다. 도플러 효과는 무선 채널 환경에서 전송 품질에 큰 영향을 미친다. 열차가 고속으로 이동하는 환경에서는 그 영향이 더욱 크게 된다. 열차의 이동으로 발생하는 도플러 효과에 의해 반송파의 주파수가 천이 되는 도플러 천이가 발생하는데, 이로 인해 신호의 위상이 주파수 천이에 비례하여 시간 축에서 선형적으로 변하게 된다. 도플러 천이 시 최대 도플러 주파수는 다음과 같다.^[7]

$$f_m = \frac{v \times f_c}{c} \tag{2}$$

여기서 v 는 열차의 속도, f_c 는 신호의 반송파 주파수, c 는 빛의 속도(약 $3.0 \times 10^8 m/s$)이다. 이 최대 도플러 주파수에 의한 위상의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta\theta = 2\pi f_m T_p \tag{3}$$

여기서 f_m 은 (2)의 최대 도플러 주파수, T_p 은 한 패킷이 점유하는 시간 구간의 길이이다. 또한 $\Delta\theta$ 는 패킷의 마지막 시점에서 관찰되는 최대 위상 오차를 나타낸다.^[8]

도플러 효과로 인한 위상의 변화로 수신 신호에는 시간에 따라 선형적으로 변화하는 위상 오차가 발생하게 된다. 이러한 위상 오차를 보상하기 위한 방법으로 도플러 효과에 둔감한 변조 방식이나 수학적 모델링을 통한 도플러 편이치 추정과 같이 다양하게 제안되어있지만, 이러한 보상에도 불구하고 시간에 대해 가변적인 도플러 효과의 영향으로 수신 신호에는 여전히 잔여 위상 오차가 남아있을 수 있다.^[9] 잔여 위상 오차는 송신 신호의 패킷 길이가 길어질수록, 열차 속도가 높아질수록 증가하게 된다. 표 1은 2.4GHz의 반송파를 가정한 데이터 전송시스템에서 열차의 속도와 송신된 패킷의 길이에 따른 위상 오차 수치를 보여준다. 여기서는 잔여 위상 오차가 보상되지 않고 패킷의

표 1. 2.4GHz 대역에서 속도 및 패킷 길이에 따른 위상 변이량

Table 1. Phase variation for different speed and packet duration in 2.4GHz band

Speed (km/h)	$\Delta\theta$ (rad) for each T_p (ms)			
	0.5ms	1.0ms	2.0ms	3.0ms
50	0.035	0.070	0.140	0.210
100	0.069	0.139	0.278	0.417
200	0.139	0.279	0.558	0.837
300	0.209	0.419	0.838	1.257
400	0.279	0.559	1.118	1.677

마지막까지 누적되는 것을 가정하였으며 성능 시뮬레이션에서도 동일한 가정을 하였다.

2.2 시공간 부호화 기법

무선 채널 환경, 특히 이동체가 고속으로 이동하는 이동 통신 환경에서의 페이딩을 극복하는 방법 중의 하나로서 다중안테나를 이용하는 MIMO 시스템을 활용한 공간 다이버시티 기법이 존재한다. 이는 동일한 정보를 각 안테나에서 부호화 기법을 적용한 후 다중 전송함으로써 정보가 손실될 확률을 낮춘다. 독립된 전송 안테나와 서로 다른 시간을 통해서 복제된 신호들을 부호화하여 전송하는 방법을 STC(Space-Time Coding)라 한다. Alamouti는 최초로 복소 직교 코드를 이용한 STBC(Space-Time Block Code)를 제안했다. Alamouti 코드는 STBC의 일종으로서 전송된 신호를 수신단에서 직교성을 이용하여 간단하게 분리하여 검파할 수 있다.^[10]

Alamouti 코드는 그림 2와 같이 기본적으로 2개의 송신 안테나와 N개의 수신 안테나 구조로 이루어져 최대 다이버시티 이득 2N를 얻을 수 있으며, 공간적으로 이격된 두 개의 송신 안테나를 활용하여 두 번의 전송 구간을 통해 신호를 전송한다. Alamouti 코드는

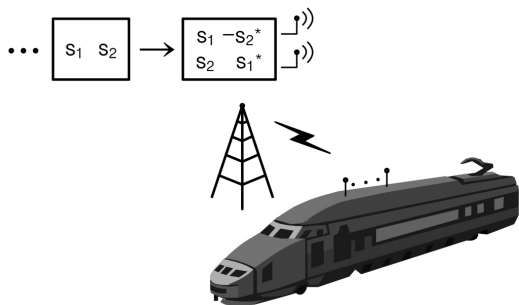


Fig. 2. STBC in railway environment
그림 2. 철도 환경에서 시공간 부호화 과정

송신단에서 CSI(Channel State Information)가 요구되지 않으며 수신단으로부터 피드백이 없이 최대 다이버시티 이득을 얻을 수 있으며, 직교성을 이용한 낮은 복잡도의 복호가 가능하며 소수의 추가적인 안테나와 선형 연산만으로 전송 품질을 높일 수 있다. 수신단에서 다중 안테나 기법을 이용할 경우, 수신단에 연산 복잡도가 집중되기 때문에 전력 부담이 커지며, 설비 비용도 증가하게 된다. 상대적으로 송신 다이버시티는 기지국에서 다중 안테나를 이용하기 때문에 시스템상의 부담이 적다. 이러한 이유로 보다 경제적으로 페이딩 영향을 감소시킬 수 있는 장점이 존재한다. 이러한 시공간 부호는 이미 많은 셀룰러 이동통신의 표준으로 채택되었으며 차세대 무선통신 표준의 적용도 예상되고 있으며 데이터 전송의 신뢰성을 우선으로 하는 CBTC 기반 철도 시스템에도 기여를 할 것으로 예상된다.^[11]

III. 시뮬레이션

본 절에서는 앞 절에서 검토된 철도 채널 모델을 시공간 부호화 기법에 적용하여 성능 분석 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템의 성능은 비트오류율을 기반으로 측정되었으며 열차의 이동으로 인한 도플러 천이 현상으로 발생된 위상 오차 존재의 유무에 따른 시공간 부호 및 수신단에서의 데이터 복원 기법에 따른 성능을 분석하였다. 채널 환경으로는 페이딩이 없는 AWGN 모델과 Rayleigh 페이딩 모델 그리고 교량 환경을 고려한 K-factor가 6dB인 Rician 페이딩 모델을 적용하였다.

먼저 위상 에러가 존재하지 않을 때, 각 환경에서 시스템의 다이버시티 차수가 0, 2 그리고 4인 경우의 성능들을 분석하였다. 최대 위상 오차는 패킷의 전송 길이와 열차의 속도에 따라 달라지는데, 이는 표 1에서 확인할 수 있다. 이러한 위상 오차가 존재할 때, 그 변화 정도가 STBC 기반의 시공간부호의 성능에 미치는 영향을 성능 변화의 민감도로 분석하였다. 시뮬레이션을 위하여 잔여 위상 오차는 계속 남아있는 것을 가정하였으며 변조 방식으로는 Gray 코딩을 채택한 BPSK와 QPSK 변조 방식을 가정하였다.

그림 3은 BPSK 변조 방식에서 전송 시스템의 다이버시티 차수 및 채널 모델에 따른 성능 곡선 그래프이다. CBTC 시스템에서 제어 신호에 대한 최소 통신 신뢰도 기준인 BER이 10^{-4} 임을 고려할 때, 교량 환경을 고려한 6dB K-factor Rician 페이딩 모델에서 STBC를 적용하지 않았을 때에 비해 다이버시티의 차

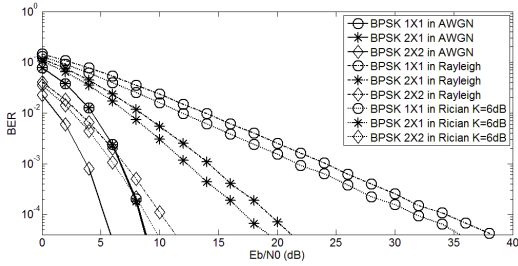


Fig. 3. BPSK에서 STBC 성능 비교
그림 3. Performance comparison of STBC in BPSK

수가 2인 STBC는 약 16dB, 4일 때는 약 23dB의 성능의 이득을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 QPSK 변조 방식에서 STBC의 다이버시티 차수 및 채널 모델에 따른 성능 곡선 그래프이다. 위 성능 곡선을 통해 STBC를 적용하지 않았을 때에 비해 다이버시티의 차수가 2일 때는 약 16dB, 4일 때는 약 25dB의 성능의 이득을 갖는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과, LOS가 유지되는 교량 환경에서 다른 환경에 비해 STBC를 채택한 전송 시스템의 성능이 더 좋은 것을 확인하였다.

그림 5는 CBTC 시스템에서 요구하는 10^{-4} 의 BER를 고려했을 때, 해당 통신 신뢰도 상에서 BPSK 변조 방식으로 진행한 경우, 위상 오차에 따른 STBC의 성능 민감도 곡선 그래프이다. 그래프를 보면 위상 오차가 높아짐에 따라 성능의 이득이 완만하게 떨어짐을 확인할 수 있다. 동일 위상 오차 상에서 STBC의 다이버시티 차수가 증가할 때에도 성능 민감도 곡선이 STBC를 적용하지 않았을 때에 비해 다이버시티의 차수가 2와 4일 때, 각각 14와 22dB의 성능 이득이 항상 유지되며, 성능의 변화가 크게 달라지지 않음을 확인할 수 있다.

그림 6은 QPSK 변조 방식으로 진행한 경우, 위상 오차에 따른 STBC의 성능 민감도 곡선 그래프이다. 그림 5의 BPSK 변조 방식에 비해 위상 오차가 증가

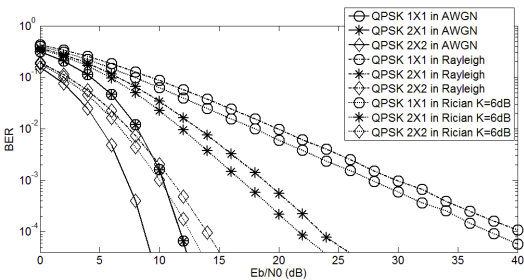


Fig. 4. QPSK에서 STBC 성능 비교
그림 4. Performance comparison of STBC in QPSK

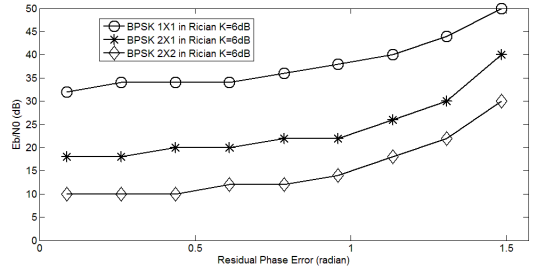


Fig. 5. BPSK에서 위상 오차에 대한 민감도 비교
그림 5. Sensitivity comparison for phase error in BPSK

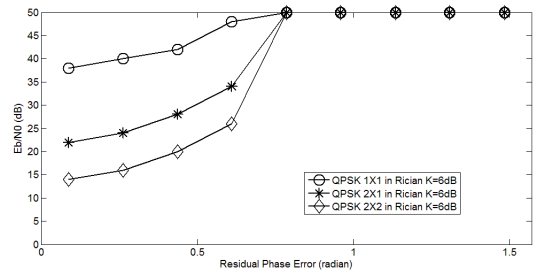


Fig. 6. QPSK에서 위상 오차에 대한 민감도 비교
그림 6. Sensitivity comparison for phase error in QPSK

함에 따라 성능이 더 가파르게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 변조 방식 상의 이유로 BPSK에 비해 QPSK가 심볼을 구분하는 위상의 여유가 $\pi/4$ 만큼 부족하여 위상 왜곡에 더 취약하기 때문이다.^[12] 또한 그림 6의 에러 플로어는 동일한 이유로 QPSK 변조 방식에서 위상 오차가 0.7을 넘을 때, 왜곡이 심해져 10^{-4} 의 BER을 달성하지 못하여 일어나는 현상으로 성능 분석이 거의 불가능해진다. 상대적으로 그림 5의 BPSK 변조 방식은 위상 오차가 1.5를 넘을 때, 성능 분석이 어려워진다.

시뮬레이션 결과, 교량 환경에서는 위상오차에 대한 성능의 열화 정도가 다이버시티 차수에 무관하게 유지됨을 알 수 있다. 그리고 QPSK 변조 방식의 경우, 심볼을 구분하는 위상 마진이 BPSK보다 작기 때문에 위상 오차에 더 취약함을 확인하였다.^[13]

IV. 결론

본 논문에서는 통신기반 열차 제어 시스템의 성능 향상 방안의 하나로서 다중안테나를 활용한 시공간 부호를 적용하고 그 성능을 시뮬레이션을 통하여 측정하고 분석하였다. 이를 위하여 고속열차의 통신 채널 환경에 적합한 모델과 이동체와 기지국의 상대적

인 속도로 인하여 발생하는 도플러 주파수 천이를 적용하여 다양한 변조방식과 시공간 부호 기법의 조합에 대한 성능 시뮬레이션을 수행하였다. 대표적으로 LOS가 지속적으로 유지되는 Rician 페이딩 모델을 교량환경에 적용하여 성능 분석이 이루어졌다. 시뮬레이션 결과, 통신기반 열차 제어 시스템(CBTC)에서 요구되는 데이터 전송의 신뢰도 향상을 위해서는 도플러 주파수 천이 등으로 발생하는 위상 오차에 대한 민감도, 변조 방식 및 시공간 부호 그리고 이에 따른 수신단에서의 복조 방식이 고려되어 시스템이 설계되어야 함을 알 수 있다. 또한 성능 분석 결과를 기반으로 요구되는 비트 오류율 조건에 따라 전송 패킷의 길이 혹은 운행 가능한 열차의 속도가 결정될 수 있다. 향후 보다 정확한 성능 분석을 위해 도플러 효과 외에 철도 환경에서 존재하는 다른 변수들을 고려한 채널 모델에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

References

[1] IEEE Std. *Communications based Train Control Performance and Functional Requirements*, 1999.

[2] J. K. Kim, K. H. Choi, and K. S. Lee, "A construction method for CBTC communication networks," *J. Korean Soc. Railway*, vol. 9, no. 3, pp. 257-263, Jun. 2006.

[3] F. Abrishamkar and J. Irvine, "Comparison of current solutions for the provision of voice services to passengers on high speed trains," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 1498-1505, Boston, US, Sept. 2000.

[4] C. J. Lee, H. C. Hwang, B. K. Cho, S. H. Shin, and K. S. kwak, "On the application of MIMO systems for railway environment," *J. Korean Inst. Transport Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 9-17, Dec. 2004.

[5] J. Lu, G. Zhu, and C. Briso, "Fading characteristics in the railway terrain cuttings," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 1-5, Budapest, Hungary, Jun. 2011.

[6] J. Lu, G. Zhu, and B. Ai, "Radio propagation measurements and modeling in railway viaduct area," in *Proc. WiCOM*, pp. 1-5, Chengdu, China, Sept. 2010.

[7] P. H. Moose, "A technique for orthogonal

frequency division multiflexing frequency offset correction," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 10, pp. 2908-2914, Oct. 1994.

[8] J. Terry and J. Heiskala, *OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide*, SAMS, 2002.

[9] J. M. Woo and S. J. Lee, "Doppler shift compensation algorithm through Train control packet analysis," *J. Korean Inst. Commun. and Inf. Sci.*, vol. 2011, no. 11, pp. 234-235, 2011.

[10] S. Alamouti, "A simple transmitter diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Selected Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.

[11] Z. Chen, J. H. Yuan, B. Vucetic, and Z. Zhou, "Performance of alamouti scheme with transmit antenna selection," *IEEE Elect. Lett.*, vol. 39, no. 23, pp. 1666-1668, Nov. 2003.

[12] E. S. Kim, J. S. Lee, and S. J. Moon, "An analysis of bit error probability of phase-compensated PSK for mobile radio channel," *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 14-17, 1995.

[13] J. S. Roh, C. J. Lee, and S. J. Cho, "Effect of phase error on error performance of DS/CDMA-BPSK signal in rician fading channel," *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 82-86, 1996.

박성근 (Seong-guen Park)



2013년 3월~현재 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 석사과정
<관심분야> 무선통신공학, 철도신호공학

이 증 우 (Jong-woo Lee)



2005년 3월~현재: 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수
<관심분야> 열차제어, 철도안전

전 태 현 (Taehyun Jeon)



2005년 3월~현재: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
<관심분야> 무선통신시스템, 다중안테나 시스템