

다중 안테나와 Doppler Shift를 고려한 고속 철도의 경로 손실 모델

박 해 규*, 윤 기 후*, 유 흥 균^o

Path Loss Model with Multiple-Antenna and Doppler Shift for High Speed Railroad Communication

Hae-gyu Park*, Kee-Hoo Yoon*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

본 논문에서는 다중 안테나를 사용한 고속철도 환경의 경로 손실 모델을 제안 하였다. 기본적으로 고속 철도의 모든 특성들 사이에서, 경로 손실(path loss)은 고속 철도 통신 시스템의 설계에서 매우 중요하다. 현재까지 진행되어진 연구 중 대다수는 경로 손실 모델은 송신단과 수신단 사이의 지리적 환경을 고려한 모델은 많았지만 다중 안테나를 사용한 시스템과 Doppler effect를 고려한 환경에서의 연구는 상대적으로 적게 고려되어 왔다. Doppler shift에 평균 residuals고려하는 모델링을 위해 사용되는 조정된 자유 공간 손실 모델(tuned free-space path loss model)은 최대 이동 속도가 340km인 ZhengZhou - Xi'an 간 전용선에서의 측정값을 활용하고 다중 안테나의 평균 residuals은 MRC 기법을 사용했을 시의 이론적 계산값을 다이버시티 이득을 활용한다. 통신 시스템상의 두 가지 요인으로 발생하는 평균 residuals을 추정하여 제안하는 모델은 다중 안테나를 사용한 시스템에서 수신 신호의 손실을 예측한다.

Key Words : Multiple-antenna, Path loss, Diversity, Doppler shift, MRC, Fading

ABSTRACT

In this paper, we propose a path loss model with the multiple antennas and doppler shift for high speed railroad communication. Path loss model is very important in order to design consider diverse characteristic in high-speed train communication. Currently wireless communication systems use the multiple antennas in order to improve the channel capacity or diversity gain. However, until recently, many researches on path loss model only consider geographical environment between the transmitter and the receiver. There is no study about path loss model considering diversity effect and doppler shift. In order to make average residuals considering doppler shift we use tuned free space path loss model which is utilized for measurement results at high speed railroad. The environment of high speed rail is mostly at viaduct and flatland over than 50 percent. And in order to make average residuals considering multiple antenna we use theoretical estimation of diversity gain with MRC scheme. proposed model predict loss of received signal by estimating average residuals between diversity effect and doppler shift.

※ 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음.(14-000-04-001, 고집적 Compact MIMO 안테나 개발), 그리고 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2013R1A2A2A01005849).

♦ First Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, haekue@naver.com, 학생회원

^o Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, ecomm@cnu.ac.kr, 정회원

* 충북보건과학대학교 반도체전자과, khyoon@chsu.ac.kr

논문번호 : KICS2014-04-112, Received April 4, 2014; Revised July 24, 2014; Accepted July 24, 2014

I. 서 론

고속철도 시스템이 현대사회에서 상용화됨에 따라 광대역의 높은 이동성을 갖는 통신에 대한 수요역시 급속도로 증가 되었다. 고속철도의 속도 증가와 4세대 이동통신의 높은 전송 속도에 따라 사용자들에게 더 좋은 신호 품질을 제공하기 위해 전송신호의 세기를 증가시키거나 또 MIMO(multiple input multiple output)와 같은 안테나 수에 비례하여 통신 용량을 높이는 방법을 사용하는 등 좋은 품질을 제공하기 위한 beamforming 기술이 통신 시스템에서 폭 넓게 사용될 수 있다. 그러나 철도 통신에 대한 beamforming 기술을 적용할 때, 기지국(base station; BS)이 충분한 실시간 채널 상태 정보(channel state information; CSI)를 얻는 데에 대한 어려움이 기차의 속도의 증가와 함께 커지는 것을 주의해야 한다. 따라서 기본적으로 고속 철도의 모든 특성들 사이에서, 경로 손실(path loss)는 고속 철도 통신 시스템의 설계에서 매우 중요한 기본이 되고 있는 것이다. 경로 손실을 분석하기 위한 많은 모델들이 존재하지만 어떤 모델도 포괄적으로 적용하기에는 어려움을 지니고 있다. 대표적인 경로 손실 모델인 Hata 모델과^{1,2} 같이 도시화된 도심(urban)과 시외(suburban) 그리고 개방(Open) 지역의 환경에서의 송신기와 수신기 사이의 경로 손실을 예측하기 위한 모델에 대한 연구는 많이 진행되어 왔다³. 그러나 다중 안테나를 사용한 시스템과 Doppler effect를 고려한 환경에서의 연구는 상대적으로 적게 고려되어 왔다.

고속철도 환경과 같은 V2I(Vehicular to Infrastructure)통신 환경에서는 대용량 고품질 서비스를 원하는 요구를 만족시킬만한 통신 성능을 원활하게 제공하는데 어려움이 존재한다. 현재 V2I 통신 환경은 유선으로 연결된 기지국과 이동체간의 통신이 이루어지고 이동체에서는 유저들에게 무선 LAN의 형태로 사용자 등에게 분배해주는 통신 구조를 가진다. V2I 통신 시스템은 기본적으로 이동체가 높은 속도로 이동하기 때문에 Doppler effect에 대한 영향이 상대적으로 크게 발생한다. 또한 다양한 지형지물 등에 의한 영향으로 다중 경로 현상이 생기고 이는 수신된 진폭이 변동하는 페이딩 현상을 초래한다. 이와 같은 페이딩 현상에 의한 전송 품질의 저하를 발생시키고 보다 높은 품질을 원하는 사용자들의 요구를 최대한 충족시키기 위해 다이버시티를 이용할 수 있다. 수신 다이버시티 기법 중 MRC(Maximal Ratio Combining)⁵기법을 사용하였을 때, 통신 시스템에서

수신단의 안테나의 개수에 따라 송신단의 송신 신호의 전력은 다이버시티 효과 때문에 변동하게 된다. 따라서 경로 손실 모델이 고속 철도 통신 시스템의 설계에 있어 매우 중요한 기본이 되기 때문에 이러한 Doppler shift를 정확하게 분석하여 모델링을 할 필요가 있다. 전달 경로 손실 모델링 방법은 다양한 형태가 있다. Ray tracing⁶을 이용한 방법, 구체적인 형태학(morphological)과 빌딩 데이터를 이용한 방법⁷, 평균 residuals을 기존 모델에 더하는 방법⁸ 등이 있다. 본 논문에서 고려한 방식은 참고문헌 [8]의 방법을 적용하였다.

본 논문에서는 측정 육교와 평지의 환경에서 측정된 데이터를 통해 조정된 자유 공간 손실 모델⁹에 Doppler shift를 고려한 변화된 경로 손실과, 다이버시티 이득을 통해 변화하는 수신 신호의 세기를 계산하여 변화하는 신호의 세기로 변화되는 경로 손실을 추정하여 제안하는 경로 손실 모델을 모델링 하였다.

II. 다중안테나를 고려한 경로 손실 모델

그림 1은 다중안테나를 고려한 경로 손실모델의 안테나 구조를 나타낸다. 비 선택적 페이딩 채널인 Rayleigh 페이딩 채널에서 MRC기법을 사용하였을 때 BPSK또는 QPSK의 변조방식에서의 BER은 다음과 같은 연산으로 계산할 수 있다^{10,11}.

$$P_b = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^{M/2} (w'_i) P_i \right) \quad (1)$$

이때의 $w'_i = w_i + w_{M-i}, w_{M/2} = w_{M/2}$ 이다. 여기에서 w_i 는 심볼 i 에 할당된 Hamming weight이다. 그리고 P_i 는 다음과 같이 나타낸다.

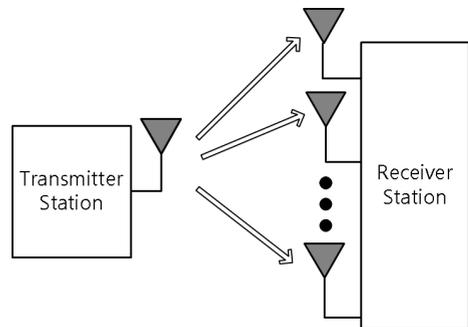


그림 1. 수신단의 안테나 배열 구조.
Fig. 1. Structure of array receiver's antenna.

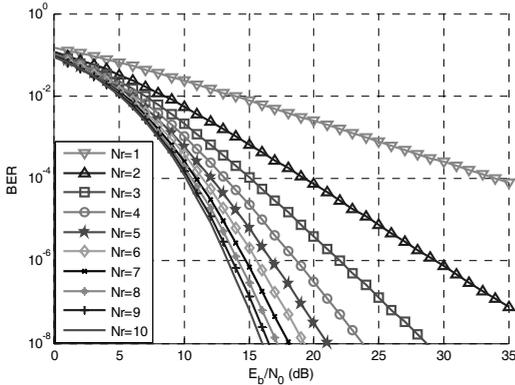


그림 2. N_R 의 개수에 따른 BER 곡선.
Fig. 2. BER curve by the number of N_R .

$$P_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2i-1)/M)} \prod_{l=1}^L M_{r_l} \left(-\frac{kE_b}{N_0} \frac{\sin^2[(2i-1)\pi/M]}{\sin^2\theta} \right) d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2i+1)/M)} \prod_{l=1}^L M_{r_l} \left(-\frac{kE_b}{N_0} \frac{\sin^2[(2i+1)\pi/M]}{\sin^2\theta} \right) d\theta \quad (2)$$

그림 2는 Rayleigh 페이딩 채널에서 BPSK 또는 QPSK인($M=2$ or 4) 경우, 수신 안테나의 개수 N_R 에 따른 BER 곡선을 나타낸 것이다. 수신된 신호의 BER이 $P_b = 10^{-4}$ 을 만족하기 위해 송신단에서 요구하는 SNR은 $N_R=1$ 인 경우 $E_b/N_0 = 33.981$ 이고, $N_R=2$ 일 경우 $E_b/N_0 = 19.284$ 이다. 즉 안테나가 2개로 증가 했을 때의 다이버시티 이득은 14.697dB가 된다.

표 1은 수신단의 안테나의 개수 N_r 이 10개까지 증가함에 따라 얻어 지는 다이버시티 이득을 나타낸다. 안테나의 개수가 증가함에 따라 다이버시티 이득이 증가한다. 그러나 안테나의 개수가 5개가 되었을 때부터 다이버시티 이득이 일정 값으로 포화 되는 것을 확

표 1. N_R 의 개수에 따른 수신 신호 세기의 이득
Table 1. Gain of signal strength by the number of N_R .

N_R	E_b/N_0	Gain of signal strength
1	33.981	0
2	19.284	14.697
3	15.082	18.899
4	13.174	20.807
5	12.103	21.878
6	11.419	22.562
7	10.948	23.033
8	10.603	23.378
9	10.34	23.641
10	10.133	23.848

인 할 수 있다.

표 2는 위와 같은 방법으로 수신 신호의 BER, P_b 가 10^{-2} 부터 10^{-6} 까지 5가지의 경우에서의 수신 신호 세기의 이득 나타낸다. 이 때 곡선 맞춤을 통하여 만든 수식은 $G(N_R)$ 로 정의 한다. 단 $N_R=1$ 일 때의 $G(N_R)$ 은 다이버시티 효과가 없기 때문에 항상 0으로 정의 한다.

표 3은 수신 신호의 BER, P_b 에 따른 곡선 맞춤을 사용해 정의한 $G(N_R)$ 을 표기 하였다.

표 3에서 나타낸 $G(N_R)$ 은 $G(N_R) = \frac{a}{N_R^b} \cdot \log_{10}(N_R) + c$ 와 같이 세 개의 계수로 표기할 수 있고, $G(N_R)$ 의 계수 a, b, c 는 수신 신호의 BER의 크기에 따라 변화 한다. 세 개의 변수는 $a, b, c = f(BER)$ 과 같이 어떠한 함수의 결과 값으로 해석할 수 있으며, 세 개의 계수를 보간법을 사용하여

표 2. 수신 신호의 BER에 따른 수신 신호 세기의 이득
Table 2. Gain of signal strength at target BER.

N_R	$P_b = 10^{-2}$	$P_b = 10^{-3}$	$P_b = 10^{-4}$	$P_b = 10^{-5}$	$P_b = 10^{-6}$
1	0	0	0	0	0
2	5.389	9.861	14.697	19.631	24.612
3	6.916	12.643	18.899	25.383	31.965
4	7.624	13.91	20.807	27.995	35.308
5	8.032	14.633	21.878	29.445	37.207
6	8.296	15.094	22.562	30.383	38.396
7	8.481	15.414	23.033	31.019	39.211
8	8.618	15.649	23.378	31.485	39.803
9	8.723	15.829	23.641	31.837	40.251
10	8.806	15.972	23.848	32.114	40.602

추정을 하였다.

표 4는 수신 신호의 BER에 따라 변화하는 계수를 보간법으로 추정된 결과를 나타낸다.

위의 내용을 종합하여 경로 손실의 변화는 BER과 안테나의 개수 N_R 에 의하여 변화 하는 것을 확일 할 수 있으며, 최종적으로 두 요소를 고려한 경로 손실 모델을 다음과 같은 나타낸다.

$$G(N_R, BER) = \frac{13.2525|\log_{10}(BER)| - 9.115}{N_R^{-0.005|\log_{10}(BER)| + 0.37}} \times 10\log_{10}(N_R) + 0.323(|\log_{10}(BER)| - 0.34)^{1.75} + 0.357|\log_{10}(BER)| - 0.326 \quad (3)$$

표 3. 곡선 맞춤을 통한 $G(N_R)$.
Table 3. $G(N_R)$ by curve fitting.

Target BER	Equation by curve fitting
$P_b = 10^{-2}$	$G(N_R) = \frac{15.39}{N_R^{0.36}} \cdot \log_{10}(N_R) + 1.24$ (If $N_R = 1, G(N_R) = 0$)
$P_b = 10^{-3}$	$G(N_R) = \frac{30.64}{N_R^{0.355}} \cdot \log_{10}(N_R) + 2.53$ (If $N_R = 1, G(N_R) = 0$)
$P_b = 10^{-4}$	$G(N_R) = \frac{43.89}{N_R^{0.35}} \cdot \log_{10}(N_R) + 4.32$ (If $N_R = 1, G(N_R) = 0$)
$P_b = 10^{-5}$	$G(N_R) = \frac{57.15}{N_R^{0.345}} \cdot \log_{10}(N_R) + 6.24$ If $N_R = 1, G(N_R) = 0$)
$P_b = 10^{-6}$	$G(N_R) = \frac{70.4}{N_R^{0.34}} \cdot \log_{10}(N_R) + 8.52$ (If $N_R = 1, G(N_R) = 0$)

표 4. 보간법을 사용한 계수 추정.
Table 4. Estimating Coefficient by Interpolation

Coefficient	Estimating Coefficient by Interpolation
a	$13.2525 \log_{10}(BER) - 9.115$
b	$-0.005 \log_{10}(BER) + 0.37$
c	$0.323(\log_{10}(BER) - 0.34)^{1.75} + 0.357 \log_{10}(BER) - 0.326$

III. 고속 철도 환경에서의 경로 손실 모델

3.1 측정 환경

경로 손실의 측정은 길이가 458Km인 Zhengzhou-

Xi'an(Zhengxi) 고속 철도 환경에서 수행한다. 이 철도의 최대 속력은 340Km/h이다. 육교의 표면은 거의 평평하고 대부분 주변의 환경보다 높게 위치해 있다. Zhengxi의 육교선로 중 지면보다 높게 건설된 육교는 모든 환경의 50% 이상을 차지한다. 또한 그리고 평지 환경은 육교에서와 같이 지면의 fluctuation이 작기 때문에 전달 특성이 유사하다.

측정에서 사용되는 철도 네트워크의 실험 주파수는 930.2MHz에서 933.4MHz의 범위에 이르는 200KHz의 대역폭을 갖는 하향링크 주파수이다. 선로 위의 송신 안테나는 주로 17dBi의 이득과 수평 65°와 수직 6.8°의 빔폭(beam width)으로 cross-polarized된다. 안테나의 송신 전력은 43dBm이다. 그리고 전 방향성 수신 안테나는 기차 위에 설치되고 3.5m의 높이를 갖는다.

3.2 고속철도 환경에서의 경로 손실 모델

자유공간 경로 손실은 다음에 따라 계산된다.

$$L_0(dB) = 32.45 + 20 \times \log_{10}(d) + 20 \times \log_{10}(f) \quad (4)$$

여기서, d 는 송신기와 수신기 사이의 거리로 Km단위이고, f 는 반송파 주파수로 MHz단위이다.

측정된 데이터를 통해 경로 손실을 얻을 수 있으며, 다음과 같이 계산된다.

$$L_m = P_t + G_b - l_b - l_d - P_r \quad (2)$$

여기서, P_r 은 수신 전력, P_t 는 송신 전력으로 $P_t = 43dBm$ 이다. G_b 는 송신 안테나 이득으로 $G_b = 17dBi$ 이다. l_b 는 기지국의 feeder 손실로 $l_b = 3.3dB$ 이다. l_d 는 전력 분배기로서 $l_d = 3.5dB$ 이다.

자유공간과 측정된 경로 손실 사이의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta L = L_m - L_0 \quad (5)$$

반면에, 각 시간에서의 측정값에서, 기지국과 수신기 사이의 거리만이 변화된다. 반면에, 경로 손실은 log 영역에서 거리에 대해 선형적이다. 따라서, 조정된 식은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta L = K_1 \log_{10} d + K_2 \quad (6)$$

여기서, K_1 은 거리에 대한 파라미터; K_2 는 상수 값이다. 두 파라미터들은 Least-square 기준에 의해 얻을 수 있다.

참고 문헌 [7]에서, K_1 과 K_2 의 중앙값(median value)들이 적용되었다. 최종적으로 얻은 값은 육교 환경에서 $K_1 = 6.26$, $K_2 = 9.855$ 이고, 평지 환경에서 $K_1 = 14.19$, $K_2 = 12.72$ 이다. 따라서 육교와 평지 환경에서 조정된 자유 공간 경로 손실 모델을 정리하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$L = \Delta L + L_0 \quad (7)$$

$$L_{via} = 42.305 + 26.26 \times \log_{10}(d) + 20 \times \log_{10}(f) \quad (8)$$

$$L_{pla} = 46.17 + 34.19 \times \log_{10}(d) + 20 \times \log_{10}(f) \quad (9)$$

IV. 다중 안테나와 Doppler shift를 고려한 추정 모델

Doppler shift는 이동에 따른 Doppler effect에 의한 결보기 수신 주파수의 변동을 말한다. Doppler shift는 이동체의 속도, 수신 전파 및 이동 방향 사이의 각도와 관련된다. 이러한 Doppler shift로 인해 수신 주파의 변동이 발생하면 별도의 보상 기법을 적용하지 않을 경우 자유공간 경로 손실 모델의 반송파 주파수의 변동요인으로서 수신 신호의 손실로 인식될 수 있다^[12].

그림 3과 같이 열차가 X에서 Y로 v의 속도로 이동

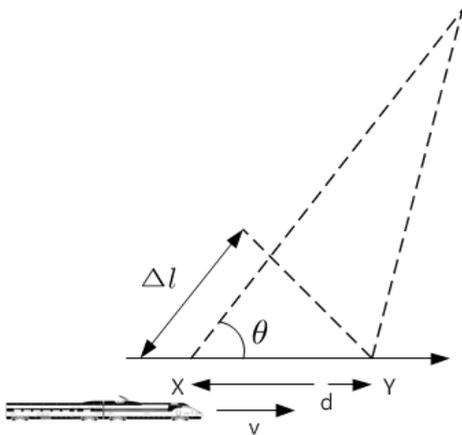


그림 3. 도플러 편이
Fig. 3 Doppler shift

할 때, 경로 길이의 차이 Δl 는 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta \quad (10)$$

여기서, θ 는 기지국과 열차 사이의 입사각 (incoming angle)이다. 이에 따른 위상 변화 $\Delta \phi$ 는 다음과 같다.

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi \Delta t}{\lambda} \cos \theta \quad (11)$$

따라서 Doppler effect에 의한 주파수의 변화 즉, Doppler shift는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta = v \frac{f_c}{c} \cos \theta \quad (12)$$

그림 4는 다중안테나가 설치된 이동국의 Doppler shift를 고려한 경로 손실 모델의 환경을 나타낸다. 본 논문에서는 기지국과 철로 사이의 최단 거리를 30m라고 가정하였다. 또한 측정 구간을 기지국으로부터 철로 사이의 거리가 100m인 지점에서부터 최대 이동 지점을 1km 떨어진 지점까지의 구간에서 100m 단위로 측정하였다. 따라서 추정된 새로운 모델의 각 지점들의 값과 조정된 경로 손실 모델의 지점들의 값과의 비교를 통해 오차가 가장 작은 경로 손실 모델을 추정하게 된다. 송신 신호의 중심 주파수 f_c 는 930MHz, 차량의 속도는 최대 속도인 340km/h(=94.4m/s)로 고정하여 추정 과정을 간략하게 하도록 하였다.

자유 공간 손실 모델과 고속 철도 환경의 자유 공간 손실 모델 사이의 차이가 존재한다. 고속철도 환경

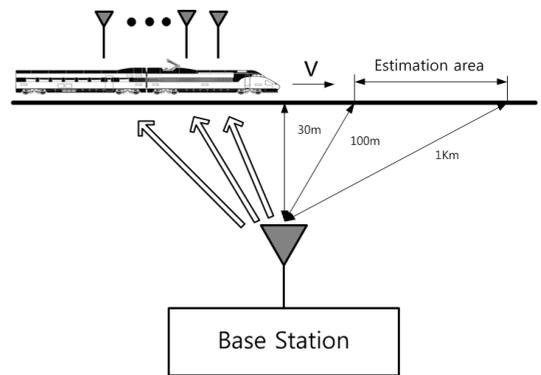


그림 4. 경로 손실 모델의 환경
Fig. 4 Environment of path loss model

의 경로 손실 모델은 기존의 자유 공간 경로 손실 모델에 측정값의 중앙값(median value)을 취한 형태의 residuals을 더하는 형태로 나타난다. Residuals은 $K_1 \times \log_{10}(d) + K_2$ 의 형태로 나타나며, 실험을 통한 측정을 통해 K_1 과 K_2 의 값을 얻게 됨을 III장의 과정을 통해 확인할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 조정된 경로 손실 모델에서 Doppler shift의 영향을 표현하기 위해 조정된 경로 손실 모델을 다음과 같은 형태로 표현한다.

$$L = K_1 \times \log_{10}(f_d) + K_2 \times \log_{10}(d) + K_3 + \underbrace{32.45 + 20 \times \log_{10}(d) + 20 \times \log_{10}(f)}_{Free-space path loss model} \quad (13)$$

여기서 f_d 는 Doppler shift로 주파수의 변화를 나타낸다. 파라미터 K_1 , K_2 그리고 K_3 를 각각 0-20 사이로 범위를 정하고 0.1의 단위로 MLE(maximum likelihood estimation)을 통해서 고속철도 경로 손실 모델과의 오차가 가장 작은 모델을 선택하는 과정을 진행한다.

이 과정을 통해 얻게 되는 계수 K_1 , K_2 그리고 K_3 는 육교와 평지 환경에서 다음의 수식 (14)과 수식 (15)과 같이 선택된다^[12].

$$K_1 = 6.2, K_2 = 12.5, K_3 = 4.0 \quad (14)$$

$$K_1 = 5.0, K_2 = 19.2, K_3 = 9.0 \quad (15)$$

그림 4는 이동하는 이동국의 수신단에서 다중 안테나를 사용한 경로 손실 모델 환경을 나타낸다. 수신 다이버시티는 송신단의 하나에 안테나와 수신단의 다수의 안테나를 사용하는 시스템을 말한다^[13]. 비선형적 페이딩 채널을 가정하면, 채널을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H = [h_1 h_2 \dots h_{N_R}]^T \quad (16)$$

송신 신호를 x 로 가정하고 수신된 신호와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \sqrt{E_s} Hx + z \quad (17)$$

여기서 y 는 $N_R \times 1$ 크기의 수신 신호 벡터를 나타

내고, z 는 $E\{zz^H\} = N_0 I_{N_R}$ 의 특성을 가진 AWGN 이다. 수신부의 합성법 중 MRC(maximal ratio combining)기법은 N_R 개의 모든 branch에 독립적인 가중치를 적용하는 기법이다^[1]. 가중치 같은 각 branch의 SNR(signal to noise ratio) 값을 이용하여 계산하고, 각 branch에서 수신하는 신호가 y_i , 각 branch의 가중치 값을 G_i 라고 할 때 다음과 같은 수식으로 나타낸다.

$$y_{MRC} = \sum_{i=1}^{N_R} G_i y_i \quad (18)$$

이 때 $y_i = h_i x_i + n_i$, $E\{|x_i|^2\} = 2E_s$ 는 수신 신호이고 n_i 는 각 branch에서 잡음 성분으로 $2N_0$ 의 전력 스펙트럼을 가진다. 그러므로 다음과 같은 형태로 표현 할 수 있다.

$$y_{MRC} = \sum_{i=1}^{N_R} G_i h_i x_i + \sum_{i=1}^{N_R} G_i n_i \quad (19)$$

각 branch의 SNR을 계산할 때, $G_i = h_i^*$ 이고 정확히 채널 정보를 알고 있다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{MRC} = \frac{E_s}{N_0} \sum_{i=1}^{N_R} |G_i|^2 \quad (20)$$

수식 (20)은 수신단의 안테나의 개수에 따라 증가하는 다이버시티 이득을 나타낸다. 이 다이버시티 이득을 통해 통신환경에서는 수신신호의 전력 효율을 향상시킬 수 있으며, 이 때문에 경로 손실 모델이 변화 하게 된다. 수신 다이버시티의 MRC 기법의 효과로 변화 수신 신호의 세기는 수식 (1)과 수식 (2)의 연산을 통해 표 1와 같이 예상할 수 있다. 이 영향으로 이동국과 기지국 사이의 경로 손실이 변화 하게 되고 경로 손실 모델의 변화를 발생시킨다. 다중안테나에 의해 변경된 경로손실 모델은 위의 II장의 과정에서 설명 하였듯이 수식 (3)와 같이 예측할 수 있다.

따라서 Doppler shift로 인한 경로손실의 변화를 L_D , MRC기법을 사용한 경로손실의 변화를 L_M 라고 하였을 때, 본 논문에서 고려하는 이동하는 고속철도 환경에서의 변화 하는 경로 손실 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta L = L_D + L_M \quad (21)$$

$$L_D = 6.2\log_{10}(f_d) + 12.5\log_{10}(d) + 4 \quad (22)$$

$$L_D = 5\log_{10}(f_d) + 19.2\log_{10}(d) + 9 \quad (23)$$

$$L_m = \frac{13.2525|\log_{10}(BER)| - 9.115}{N_R^{-0.005|\log_{10}(BER)| + 0.37}} \times 10\log_{10}(N_R) + 0.323(|\log_{10}(BER)| - 0.34)^{1.75} + 0.357|\log_{10}(BER)| - 0.326 \quad (24)$$

위의 식에서 식 (22)는 철도의 환경을 식 (23)은 평지의 환경을 나타낸다.

위와 같이 방법으로 기존의 경로 손실 모델로 예상할 수 없었던 경로 손실을 Doppler shift와 다이버시티 효과로 변경된 경로 손실을 추가적으로 고려하면서 다중안테나를 사용한 고속철도의 경로 손실 예측할 수 있는 모델을 제안한다.

V. 결 론

본 논문에서는 다중 안테나를 사용한 고속철도 환경의 경로 손실 모델을 제안 하였다. 현재 까지 진행된 경로 손실 모델의 연구는 송신단과 수신단사이의 지리적 환경을 고려한 연구가 많이 진행되는 것과는 대조적으로 Doppler shift를 고려한 경로 손실 모델, 또는 다중 안테나를 사용한 경로손실 모델의 연구는 상대적으로 적제 연구되었다. Zhengxi 고속 철도의 육교와 평지 환경에서의 측정 데이터를 기반으로 한 조정된 자유 공간 경로 손실 모델을 기반으로 하여 Doppler shift를 고려한 경로 손실 모델을 추정하였고, 수신 다이버시티 중 MRC 기법을 사용하였을 때의 수신세기의 변화를 이론적인 연산을 통해 추정하였다. 최종적으로 Doppler shift와 다이버시티 효과를 변화하는 경로 손실의 평균 residuals을 제시하여 기존의 경로 손실 모델 residuals을 더하는 제안하는 모델을 모델링 하였다. 본 논문에서 제안하는 모델로 위와 같은 환경에서 경로 손실을 이론적으로 추정할 수 있음을 확인 하였다.

References

[1] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service," *Rev. Elec. Commun. Lab.*, vol. 16, no. 9-10, pp.

825-873, 1968.
 [2] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 29, no. 3, pp. 317-325, 1980.
 [3] J. V. Traveset, G. Caire, E. Biglieri, and G. Taricco, "Impact of diversity reception on fading channels with coded modulation-Part I: Coherent detection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 5, pp. 563-572, May 1997.
 [4] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.
 [5] T. K. Y. Lo, "Maximum ratio transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 10, pp. 1458-1461, Oct. 1999.
 [6] A. Amornthipparat, H. Shirai, K. Yonezawa, T. Inoue, and Y. Nakamura, "Estimation of high frequency NLOS path loss in street-cell environment," *Int. Conf. Commun. Electron. (ICCE 2008)*, pp. 336-340, Hoi an, Jun. 2008.
 [7] I. Schneider, F. Lambrecht, and A. Baier, "Enhancement of the okumura hata propagation model using detailed morphological and building data," *IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, vol. 1, pp. 34-38, Taipei, Oct. 1996.
 [8] J. Turkka and M. Renfors, "Path loss measurements for a non-line-of sight mobile-to-mobile environment," *Int. Conf. ITS Telecommun.*, pp. 274-278, Phuket, Oct. 2008.
 [9] H. Wei, Z. Zhong, K. Guan, and B. Ai, "Path loss models in viaduct and plain scenarios of the high-speed railway," *Int. ICST Conf. CHINACOM*, pp. 1-5, Beijing, Aug. 2010.
 [10] M. K. Simon and M. S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels - A Unified Approach to Performance Analysis*, 1st Ed., NY: Wiley, 2000.
 [11] P. J. Lee, "Computation of the bit error rate of coherent M-ary PSK with gray code bit

mapping,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-34, no. 5, pp. 488-491, 1986.

- [12] J. Bok and H.-G. Ryu, “Path loss model considering doppler shift for high speed railroad communication,” *Int. Conf. Advanced Commun. Technol.(ICTACT 2014)*, PyeongChang, Korea, Feb. 2014.
- [13] Y. S. Cho, J. Kim, and W. Y. Yang, *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*, 1st Ed., NY: John Wiley & Sons, 2008.

박 해 규 (Hae-gyu Park)



2014년 2월: 충북대학교 전자공학과 졸업
 2014년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 무선통신시스템, 이동통신시스템, ESPAR안테나 설계

윤 기 후 (Kee-Hoo Yoon)



1979년: 충북대학교 전기공학과 공학사
 1982년: 성균관대학교 대학원 전기공학과 공학석사
 1989년 10월~1992년 2월: 순천제일대학 전자과 전임강사
 2005년: 충북대학교 대학원 전자공학과 공학박사
 1992년 3월~현재: 충북보건과학대학교 반도체전자과 부교수
 <관심분야> 무선통신시스템, 이동통신시스템

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 1996년~현재: IEEE, IET 논문심사위원
 2002년: 한국전자과학회 학술상 수상
 2008년: ICWMC 2008 국제학술대회 “Best Paper Award” 수상
 2009년: SPACOMM 2009 국제학술대회 “Best Paper Award” 수상
 <관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리