

Ray-Launching 기법을 이용한 2.6 GHz 대역의 터널 내 경로손실 특성 분석

° 김도윤*, 조한신*, 육종관*, 박한규*

* 연세대학교 전기전자공학과.

E-mail : kiwi9879@yonsei.ac.kr

Path Loss Characterization in Tunnel Using Ray Launching Method at 2.6 GHz

° Do-Youn Kim, Han-Shin Jo, Jong-Gwan Yook, Han-Kyu Park
Yonsei University.

Abstract

This paper presents the characteristics of large-scale fading in a tunnel environment. The Ray-Launching Method has been used to analyze the characteristics of the tunnel. For a curved tunnel, The concept of RDN (Ray Density Normalization) is introduced in order to obtain more accurate results. For our purposes, the structure of tunnel is assumed to be either a straight or curved tunnel having rectangular cross-section. A large scale fading has been presented shown in several tunnel cases.

Key words : RDN, A large-scale fading, Ray-launching method.

I. 서론

본 논문은 2.6 GHz 대역 신호에 대한 지하철 및 터널에서의 경로 손실 특성을 분석한다. 이 주파수 대역은 최근 위성 DMB Model E 시스템에 사용되며, 이 대역의 경로 손실 특성 분석을 통해 도심 지역의 대표적인 음영 지역인 지하철 터널에서의 안정된 서비스 품질을 확보할 수 있다. 본 논문은 경로 손실 모의실험을 위해 Ray-launching 기법을 사용하였으며, 곡면 환경에 대한 정확한 실험 결과를 얻고자 RDN(Ray Density Normalization)개념을 도입하였다. 모의실험에 사용된 터널의 구조는 단면을 직사각형 구조로 가정하였으며 터널의 선로는 직선과 곡선으로 구분하였다. 직선 터널과 곡률반경 400m, 800m, 1500m의 곡선 터널에 대해 분석하였고 각 터널 구조에 따라 large scale fading 특성 얻었다. 여기서 언급한 3가지 곡률 반경을 선택한 이

유는 실제 지하철 선로의 분석을 통해 선택하였다. 또한 터널 단면의 수신기 위치에 따른 경로 손실의 차이를 살펴보았다.

II. Ray-Launching Method

가 신호의 경로를 정확히 찾아주는 Image theory 방법과 달리 Ray launching 방법은 상당히 다른 접근을 시도한다. 일반적으로 Ray launching method는 Shooting and bouncing ray (SBR) method라 불리며, 명명되는 것으로부터 알 수 있듯이 수많은 신호가 송신기에서 방사된 후 수신기에서 조건에 맞게 들어온 신호를 합하여 결과를 얻는 방법이다. 이 해석 방법의 장점은 주어진 채널 환경에 곡면이 포함된 경우에도 적용 가능하다는 것이다. 본 논문에서 사용된 Ray-launching 방법의 특징은 다음 4가지 사항과 같다[1].

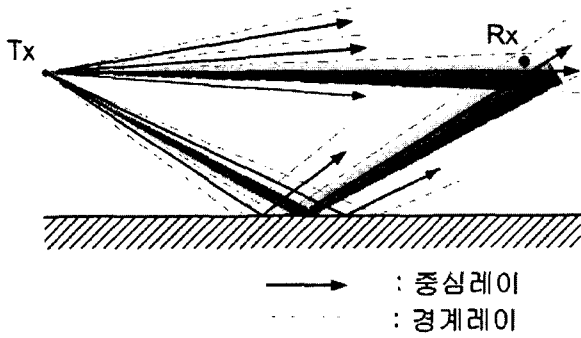


그림 1 Ray-Launching Method의 개념도

2-1 고정된 수신 반경

일반적으로 수신 조건을 결정하는 가장 중요한 부분이 수신 반경이다. Ray launching 방법에서 사용되는 방법으로 크게 2가지로 구분할 수 있다.

- ① 고정된 수신 반경
- ② 유동적 수신 반경

본 연구에서는 첫 번째 방법을 사용하였다[2]. 고정된 수신 반경은 이웃하게 방사된 신호를 중복 수신 할 수 있다는 문제점이 있으나 그것은 랜덤하게 신호를 방사시킨 후, RDN(Ray density normalization)개념을 적용하여 극복할 수 있다.

2-2 확률론적인 신호 방사

신호를 방사하는 근본 원리는 각 신호가 대표하는 면적이 방사된 모든 신호에 대해 동일해야 한다. 따라서, 3차원 구면에 대해 확률적으로 신호를 방사하는 방법을 택하였다[2]. 각 신호의 방사 방향은 식 (1)과 (2)를 통해 3차원적으로 방향을 정할 수 있다.

$$\theta = \arccos(1 - 2\xi_1) \tag{1}$$

$$\phi = 2\pi\xi_2 \tag{2}$$

여기서, ξ_1, ξ_2 는 각각 0과 1사이의 Uniform random 변수이다.

2-3 RDN(Ray density normalization)개념 도입

주어진 환경에 곡면이 포함되면 자유 공간에서 전기장의 세기가 전파 거리에 반비례하는 것 조차 적용할 수 없게 되는 문제점이 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위한 방안으로 도입한 개념이 광선 밀도 표준화 (ray density normalization, RDN) 값이며 수학적으로 평면과 곡면에 따라 식 (3), (4)로 각각 표현 된다[2][3].

$$n_d = \frac{N}{4\pi r^2} \tag{3}$$

$$n_d^r = \left| \frac{\rho_1^r}{\rho_1^r + s} \right| \left| \frac{\rho_2^r}{\rho_2^r + s} \right| n_d^i \tag{4}$$

2-4 RDN을 적용한 수신 전력

전파전파 현상에서 다중 경로를 통해 수신된 전력은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 여기서, G_T, G_R, \vec{C}_R, Z_R 값은 각각 송수신 안테나의 이득값과 복소 지향성, 임피던스 값을 나타낸다. 광선 밀도 표준화 개념을 실제 해석 과정에 적용해 보자. 전파 환경이 평면 구조로 구성된 경우 식 (6)에서 발산값 ($T_{D,l}$)은 $1/r$ 값으로 표현할 수 있다. 그러나 전파 환경에 곡면이 포함된 경우, $T_{D,l}$ 값은 식 (7), (8)과 같이 광선 밀도를 이용해 구한다[2][3][4].

$$P_{R,tot}^C = \frac{|V_{R,tot}|^2}{8Re[Z_R]} = \frac{1}{8Re[Z_R]} \left| \sum_{l=1}^n V_{R,l} \right|^2 = \left(\frac{\lambda_0}{4\pi} \right)^2 G_R G_T P_T \left| \sum_{l=1}^n e^{-jk_0 r_l} \vec{C}_{R,l} \cdot \vec{T}_{D,l} \cdot \vec{T}_{P,l} \cdot \vec{C}_{T,l} \right|^2 \tag{6}$$

$$T_D = \sqrt{\left| \frac{\rho_{1,m}^r}{\rho_{1,m}^r + s} \right| \left| \frac{\rho_{2,m}^r}{\rho_{2,m}^r + s} \right|} \times \dots \times \sqrt{\left| \frac{\rho_{1,1}^r}{\rho_{1,1}^r + s} \right| \left| \frac{\rho_{2,1}^r}{\rho_{2,1}^r + s} \right|} \tag{7}$$

식 (7)을 광선 밀도에 관련된 식으로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$T_D = \sqrt{\frac{4\pi}{N}} n_d \tag{8}$$

결과적으로, 위 식을 이용해 수신 전력을 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$P_{R,tot}^C = (M)^2 T_P^2 \frac{4\pi}{N} n_d (X_F^C)^2 \tag{9}$$

여기서, X_F^C 값은 광선 밀도 표준화 개념을 적용했을 때 수신 전력 계산에 추가해야 하는 가중치 값으로 식 (10)과 같다.

$$X_F^C = \frac{1}{M} = \frac{1}{n_d A} \tag{10}$$

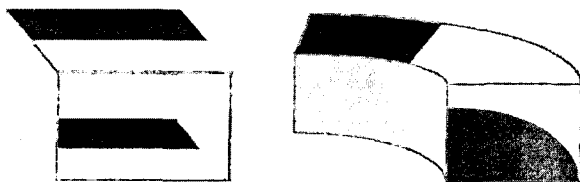
III. 터널 구조

본 논문에서 터널을 간단하게 대표하기 위해 사용한 구조는 그림 2과 같다. 터널의 단면은 직사각형으로 가정했으며 터널의 선로는 직선 선로 터널과 곡선 선로 터널의 2가지 유형으로 구분하였다. 터널 구조에서 변수로 사용된 것은 터널 재질의 유전율과 터널의 높이와 너비이다. 곡선 터널의 경우 곡률 반경을 추가적인 변수로 고려하였다.

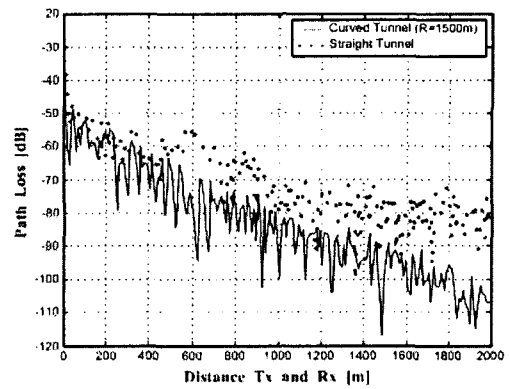
IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

직사각형의 동일한 단면을 갖는 터널의 경우 경로 손실은 터널의 선로 형태에 따라 값의 차이를 보일 것이다. 일반적으로 송신단과 수신단의 거리에 상관없이 항상 가시구간(LOS)이 존재하는 직선 터널의 경우와 일정 거리 후 비가시구간(NLOS)이 존재하는 곡선 선로 터널은 경로 손실의 차이가 발생한다. 그림 3는 직선 터널과 곡선 터널(반경 R=1500m)의 경로 손실을 비교한 결과이다. 거리가 증가함에 따라 곡선 터널과 직선 터널 사이의 경로 손실차이는 점차 증가함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면 200 m에서 7dB 정도의 차이가 2000 m에서는 20dB까지 차이가 발생했다.

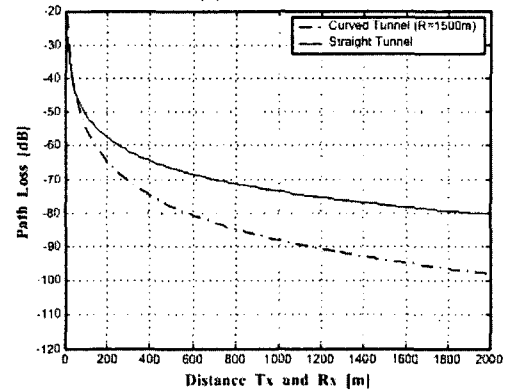
단면이 동일한 곡선 선로 터널 구조라 가정할 때, 경로 손실에 영향을 주는 부분은 터널 곡선의 곡률 반경이다. 간단하게 생각해서, 곡률반경이 굉장히 큰 경우는 직선 터널의 경로 손실에 흡사한 결과가 나올 것이다. 반면 곡률반경이 작은 경우는 동일 거리를 전파했을 때 직선 터널의 경로 손실과는 큰 차이를 보인다. 본 논문의 결과는 곡률 반경이 400 m, 800 m, 1500 m의 3가지 경우로 나눠서 결과를 도출했으며, 각각의 regression값을 비교해 보았다. 그림 7을 통해 곡률 반경이 작을 수록 동일 거리당 경로 손실이 급격히 발생함을 확인 할 수 있다. 그림 8에서 w값은 직사각형 단면의 터널 좌측 벽을 기준으로 할때 수신기와 좌측 벽 사이에 거리다.



- 직선터널 -
- 곡선터널 -
그림 2. 모의실험에 사용한 터널 구조도



(a) Path Loss



(b) Regression

그림 3. 직선 터널과 곡선 터널의 경로 손실 비교

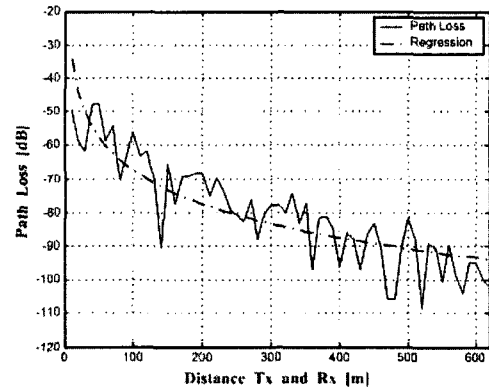


그림 4. 곡률반경 400m 터널의 경로 손실

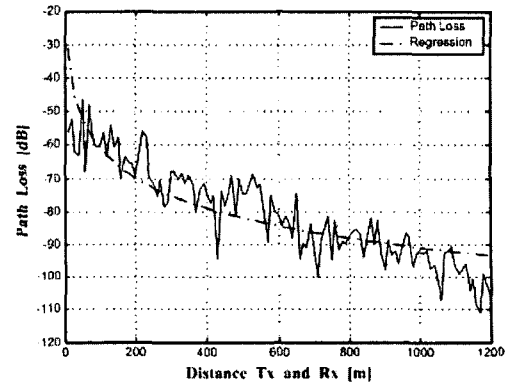


그림 5. 곡률반경 800m 터널의 경로 손실

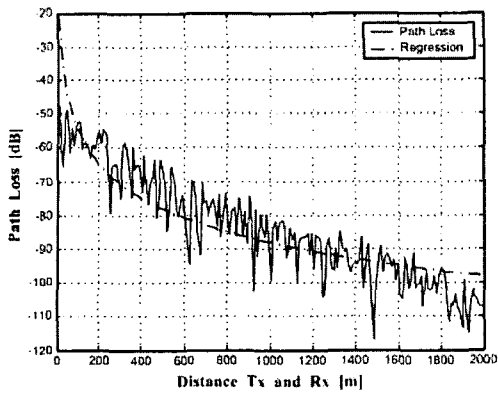


그림 6. 곡률반경 1500m 터널의 경로 손실

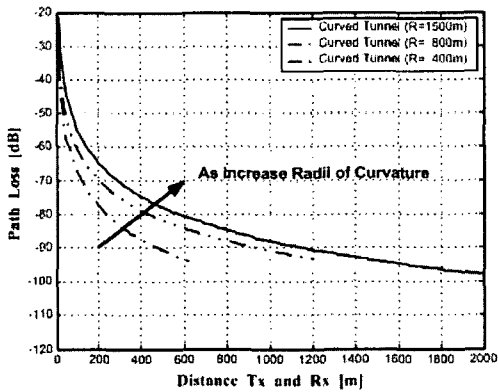


그림 7. 3가지 곡률 반경에 따른 터널의 Regression

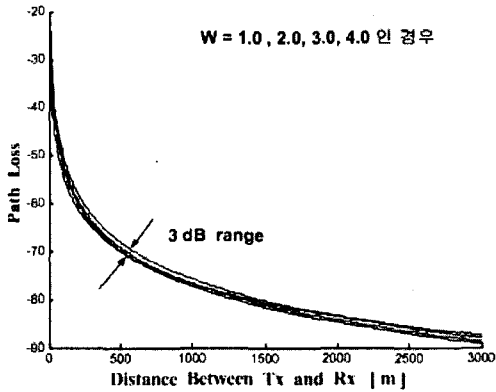


그림 8. 수신기의 단면 위치에 따른 결과값 차이

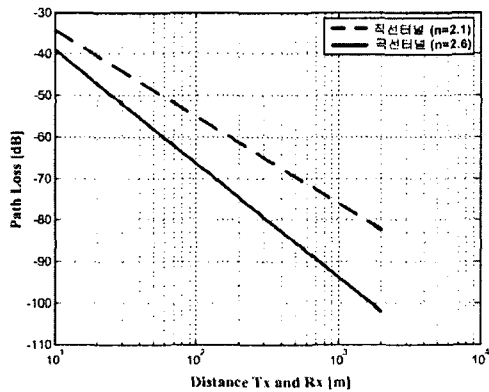


그림 9. 직선과 곡선(반경 1500 m)의 Exponent

송신기와 수신기 사이 거리에 따라 경로 손실은 증가하게 된다. 그러나, 송수신 거리가 동일한 경우에도 경로 손실은 달라진다. 따라서, 수신기가 터널 단면에서 다른 위치에 있을 경우의 경로 손실 차이를 살펴보았다. 그림 8은 수신단의 단면 위치에 따른 경로 손실 차이를 파악한 것이다. 이 결과에서 살펴볼 수 있듯이 수신기의 단면 위치에 따라 약 3 dB 차이가 발생함을 확인하였다. 앞의 결과로부터 그림 9의 Path Loss Exponent(n)값을 구할 수 있었다. 직선 터널의 경우 $n = 2.1$ 이며 곡선 터널인 경우 $n = 2.6$ 값을 가졌다.

V. 결론

본 논문은 2.6 GHz 대역 신호에 대한 지하철 및 터널에서의 전송 손실 특성을 분석하였다. 특성을 파악하기 위해 어떤 요소가 경로 손실에 영향을 주는지 확인, 분석하는 과정이 필요했다. 본 연구에서 수행한 모의 실험 변수는 터널의 선로 구조, 터널의 곡률 반경, 터널 단면에서의 수신단의 위치 변화, 터널 외벽의 재질을 선택하였다. 결과적으로 직선 터널의 경우 경로 손실 평균 감소량이 3dB/[100 m] 였으며, 곡선 터널의 경우 5~10dB/[100 m]로 곡률 반경에 따라 가변적으로 나타났다. 또한 터널 구조 중에서 터널의 선로와 곡률 반경에 의한 경로 손실 차이는 컸으며, 터널 단면의 수신기 위치에 따른 차이는 3 dB 오차 범위내에서 차이가 발생했다. 직선 터널과 곡선 터널의 Exponent 값이 $n=2$ 보다 크게 나왔다. 이는 자유공간에 비해 거리 증가에 따른 수신 전력의 감소가 크다는 사실을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 SKTelecom 사의 지하철 및 터널 내 전파모델 수립과 품질확보방안에 관한 연구의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Dirk Didascalou, *Ray-Optical Wave Propagation Modeling in Arbitrarily Shaped Tunnels*, Prentice

Hall, 1990..

- [2] Dirk Didascalou, "Ray-Density Normalization for Ray-Optical Wave Propagation Modeling in Arbitrarily Shaped Tunnels", IEEE trans.on AP, vol. 48, no. 9, pp. 1316-1325, Sept. 2000.
- [3] S.H. Chen and S.K. Jeng, "SBR Image Approach for Radio wave Propagation in Tunnels with and without Traffic", Proc. IEEE, vol. 45, no. 3, pp. 570-578, Aug. 1996.
- [4] J.D.Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel Second Edition*, 1990.