JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 26, No. 5: 688~693, May. 2022

5G 주파수 대역에서의 실내 복도 전파 경로손실 측정 및 분석

김형중[1] · 최동유[2*]

Measurement and analysis of indoor corridor propagation path loss in 5G frequency band

Hyeong Jung Kim[1] · Dong-You Choi[2*]

[1]Graduate Student, Department of Information Communciataion Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452 Korea
[2*]Professor, Department of Information Communciataion Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452 Korea

요 약

본 논문에서는 5G 이동통신에 활용되고 있는 주파수 대역인 3.7 GHz, 28 GHz에 대한 건물 복도에서 채널 전파 경로손실을 측정하고, CI (Close-In), FI (Floating-Intercept) 채널 모델과 비교·분석하였다. 전파 경로손실 측정을 위해 송신기 (Tx)로부터 수신기 (Rx)를 10 m 씩 이동시키며 측정을 수행하였다. 측정 결과 3.7 GHz, 28 GHz에서의 CI 모델의 PLE (Path Loss Exponent)값은 각각 1.5293, 1.7795이며, 표준편차는 각각 9.1606, 8.5803으로 분석되었다. FI 모델에서 α값은 각각 79.5269, 70.2012, β값은 각각 -0.6082, 1.2517이며, 표준편차는 각각 5.8113, 4.4810으로 분석되었다. CI 모델과 FI 모델을 통한 분석 결과에서 FI 모델의 표준편차가 CI 모델에 비해 적으므로 FI 모델이 실제 측정 결과와 유사함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, channel propagation path loss was measured in building corridors for frequency bands of 3.7 GHz and 28 GHz, which are used in 5G mobile communication, and compared and analyzed with CI (Close-In) and FI (Floating-Intercept) channel models. To measure the propagation path loss, the measurement was performed while moving the receiver (Rx) from the transmitter (Tx) by 10 m. As a result of the measurement, the PLE (Path Loss Exponent) values of the CI model at 3.7 GHz and 28 GHz were 1.5293 and 1.7795, respectively, and the standard deviations were analyzed as 9.1606 and 8.5803, respectively. In the FI model, α values were 79.5269 and 70.2012, β values were -0.6082 and 1.2517, respectively, and the standard deviations were 5.8113 and 4.4810, respectively. In the analysis results through the CI model and the FI model, the standard deviation of the FI model is smaller than that of the CI model, so it can be seen that the FI model is similar to the actual measurement result.

키워드 : 전파 전파, CI 모델, FI 모델, 전파 경로손실

Keywords : wave propagation, CI model, FI model, propagation path loss

Received 21 February 2022, **Revised** 11 March 2022, **Accepted** 14 March 2022

*** Corresponding Author** Dong-You Choi (E-mail: dychoi@chosun.ac.kr, Tel: +82-62-230-7060)
Professor, Department of Information and Communication Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452 Korea

Open Access **http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.5.688** print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

무선 데이터 스트림은 전 세계적으로 빠르게 증가하고 있으며 2022년까지의 모바일 데이터 트래픽은 77.5 exabytes/month에 이를 것으로 예상된다.[1] 데이터 트래픽 증가의 대부분은 실내 무선 사용의 진화에서 비롯된다. 이러한 무선 데이터 트래픽은 5G 주파수 대역에서 밀리미터파 (mmWave) 대역의 넓은 대역폭을 요구한다.[2, 3] 밀리미터파 스펙트럼(30 - 300 GHz)은 무선 링크를 통하여 Gbps를 제공하는 것을 목표로 하는 미래 이동통신 네트워크에서 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

실외에서 실내로 통신하는 신호는 벽을 통해 전파되어야 하며, 이는 밀리미터파 대역에서 높은 침투 손실(최대 60 dB)을 수반하기 때문에 실외 이동통신 네트워크와 분리된 실내 밀리미터파 대역 통신 시스템을 설치하는 것이 유리하다.[4]

전문가들은 5G 시스템을 위한 28, 38, 60, 및 73 GHz 대역을 고려해 왔다. 현재 시행 중인 5G 시스템은 저속 광역망인 6 GHz 이하 주파수 대역 (FR1)과 초고속 근거리망에 사용되는 24 GHz 이상 (FR2)으로 나누어져 있지만, FR2 서비스는 아직 이루어지지 않고 FR1 대역인 3.5 GHz로만 서비스 되고 있다. 따라서 FR1 서비스 대역인 3.5 GHz와 인접한 주파수 대역 3.7 GHz으로 건물 복도에서 전파 경로손실을 측정하였다.

실내환경은 기본적으로 실외환경과 많은 차이가 있다. 결과적으로 실내 전파 경로손실 예측 모델은 건물에 사용된 건축 자재, 온·습도, 주변에서 사용되는 전자제품들의 규모, 사람의 영향으로 인한 산란, 굴절, 반사, 그림자 및 침투로 인한 다중 경로를 고려하여야 한다.[5]

본 논문은 2장에서 전파 경로손실 모델에 관해 설명한다. 3장에서는 측정 환경에 대해 설명하고 4장에서는 측정 결과 및 분석, 5장에서는 논문의 결과를 요약한다.

Ⅱ. 전파 경로손실 모델

송신되는 전파는 주파수의 특성과 같은 물리적 현상을 겪으며 다중 경로로부터 수신되기 때문에 거리와 시간에 따라 수신 신호의 강도는 변한다. 따라서 측정된 신호 또한 거리와 시간에 따라 변하므로 평균 수신 강도로부터 경로손실 예측값을 얻을 수 있다.[6]

2.1. CI 모델

CI 경로손실 모델은 특정 시나리오에 대한 여러 주파수에서 거리에 따른 대규모의 전파 경로손실을 설명하는 통계(확률론적) 모델이다.

PLE (Path Loss Exponent)와 SF (Shadow Factor)를 고려한 경로손실 모델은 식 (1)과 같다.[7, 8]

$$PL^{CI}(f,d) = FSPL(f,d_0) + 10n\log_{10}(\frac{d}{d_0}) + X_\sigma^{CI}\ [dB]\ \ , d \geq d_0 \tag{1}$$

식 (1)에서 n은 PLE이며, 자유공간에서의 n값은 2로 정의한다. 송·수신단 간 거리의 증가에 따른 경로손실의 증가량을 의미하므로 n값이 증가할수록 전파 환경이 좋지 않음을 의미한다. d는 송·수신기 간의 거리이며, d_0는 자유공간에서의 기준거리이다. X^{CI_σ}는 반사, 산란, 회절 등에 의한 손실값으로 표준편차가 σ이고, 평균이 0인 GRV (Gaussian Random Variable)이다.

식 (1)의 자유공간 경로손실값인 FSPL (Free Space Path Loss)은 식 (2)와 같다.

$$FSPL(f,d_0) = 20\log_{10}(\frac{4\pi f d_0}{c})\ [dB] \tag{2}$$

식 (2)에서의 c는 빛의 속도로 정의한다. CI 모델은 본질적으로 $FSPL$에 포함되어 있는 경로손실의 주파수에 대한 종속성을 가지고 있다.

PLE는 MMSE (Minimum Mean Square Error) 방법에 의해 결정된다. 경로손실이 최적인 PLE값을 결정하기 위하여 MMSE 방법을 사용하여 식 (1)을 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$X_\sigma^{CI} = PL^{CI}(f,d) - FSPL(f,d) - 10n\log_{10}(\frac{d}{d_0})\ [dB]\ ,\ d \geq d_0 \tag{3}$$

$A = PL^{CI}(f,d) - FSPL(f,d_0)$, $B = 10\log_{10}(d)$ 라고 가정하면 식 (3)을 재구성 할 수 있다.

$$X_\sigma^{CI} = A - nB\ [dB] \tag{4}$$

SF의 표준편차는 식 (5)와 같이 결정된다.

$$\sigma^{CI} = \sqrt{\frac{\Sigma(X_{\sigma}^{CI})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\Sigma(A-nB)^2}{N}} \quad (5)$$

식 (5)에서 N은 송신기와 수신기 사이의 데이터 수신 위치의 개수이다. 표준편차 σ^{CI}를 포함한 SF를 최소화하는 것은 $\Sigma(A-nB)^2$을 제거하는 것과 같다. 만약 $\Sigma(A-nB)^2$을 제거하려면, PLE의 편차를 식 (6)과 같은 방법으로 0으로 만들어야 한다.

$$\frac{\triangle\Sigma(A-nB)LSUP2}{\triangle n} = \Sigma 2B(nB-A) \quad (6)$$
$$= 2\Sigma B(nB-A) = 2(n\Sigma B^2 - \Sigma BA) = 0$$

식 (6)으로부터 PLE를 정의하면 다음과 같다.

$$n = \frac{\Sigma BA}{\Sigma B^2} \quad (7)$$

결론적으로, 식 (7)의 n 값을 식 (5)에 CI 모델의 최소 SF 표준편차는 식 (8)과 같이 도출할 수 있다.

$$\sigma_{\min}^{CI} = \sqrt{\frac{\Sigma(A-nB)^2}{N}} \quad (8)$$

2.2. FI 모델

CI 모델은 단일 매개변수인 PLE만 사용되지만, FI 모델은 두 개의 매개변수가 필요하다. FI 모델은 MMSE 방법을 사용하여 실험 데이터에 가장 유사한 곡선을 결정하고 두 개의 매개변수, 기울기와 절편으로 식을 유도하여 식 (9)와 같다.[9, 10]

$$PL^{FI}(d) = \alpha + 10\beta\log_{10}(d) + X_{\sigma}^{FI}[dB] \quad (9)$$

식 (9)에서 α는 dB 단위의 Floating-intercept 이고 이 매개변수는 자유공간과 손실과 동일하며, β는 PLE와 유사한 기울기이며, X_{σ}^{FI}는 평균값이 0인 GRV이고, σ는 송신기와 수신기 사이의 길이에 대한 평균 경로손실에 대한 대규모 신호 변동을 정의하는 표준편차이다.

$A = PL^{FI}(d)$, $B = 10\log_{10}(d)$라고 가정한다면, 최적화된 SF를 결정할 수 있다.

$$X_{\sigma}^{FI} = A - \alpha - \beta B\ [dB] \quad (10)$$

α와 β는 다음 식에 의해 결정된다.

$$\frac{\triangle\Sigma(A-\alpha-\beta B)}{\triangle\alpha} = \Sigma 2(\alpha+\beta B-A) \quad (11)$$
$$= 2(N\alpha + \beta\Sigma B - \Sigma A) = 0$$

$$\frac{\triangle\Sigma(A-\alpha-\beta B)}{\triangle\beta} = \Sigma 2(\alpha+\beta B-A) \quad (12)$$
$$= 2(\alpha\Sigma B + \beta\Sigma B^2 - \Sigma BA) = 0$$

$$\alpha = \frac{\Sigma B\Sigma BA - \Sigma B^2\Sigma A}{(\Sigma B)^2 - N\Sigma B^2} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\Sigma B\Sigma A - N\Sigma BA}{(\Sigma B)^2 - N\Sigma B^2} \quad (14)$$

FI 모델의 최소 SF 표준편차는 식 (13), 식 (14)의 α와 β의 값을 식 (15)에 대입하여 얻을 수 있다.

$$\sigma_{\min}^{FI} = \sqrt{\frac{\Sigma(A-\alpha-\beta B)^2}{N}} \quad (15)$$

Ⅲ. 측정 환경

길이 약 100 m, 높이 2.7 m, 너비 2.6 m의 건물 복도 그림 1에서 측정을 수행하였다.

측정에는 M5183B keysight signal generator, keysight PXI 9393A signal analyzer와 3.7, 28 GHz 측정에 사용되는 두 개의 지향성 혼 안테나를 사용하였다. 3.7 GHz와 28GHz의 주파수 대역의 안테나 이득은 각각 10 dBi, 20 dBi 이며, 안테나 사양은 표 1과 같다.

3.7 GHz와 28 GHz 주파수 대역에서 수신된 신호들의 평균값을 이용하였으며 안테나가 이동하면서 갖는 페이딩의 영향을 고려해야 하므로 Tx로부터 Rx의 이동거리를 10 m 씩 변화시켜가며 측정을 수행하였다. CI 모델, FI 모델의 파라미터를 도출해내는 과정에서 페이

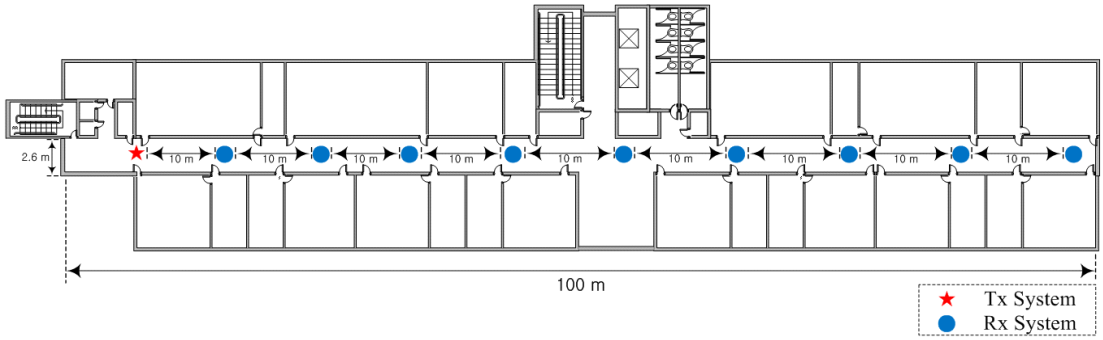

Fig. 1 Floor plan of the building hallway

딩 효과를 무시하고 거리에 의한 감쇠를 측정하기 위해 각 위치에서 얻은 수신전력과 경로손실을 수집 한 후 측정 위치의 경로손실을 선형 회귀 분석하여 경로손실 모델을 구축하였다.

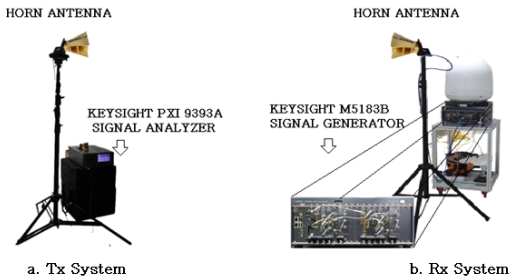

Fig. 2 Transmitter and receiver system

Table. 1 Antenna specification

Frequency	3.7 GHz	28 GHz
Bandwidth	1 MHz	1 MHz
Tx antenna	Horn	Horn
Rx antenna	Horn	Horn
LNA gain	57 dB	57 dB
System gain	40 dB	40 dB
Tx height	2 m	2 m
Rx height	1.5 m	1.5 m
Tx gain	10 dBi	20 dBi
Rx gain	10 dBi	20 dBi
Beamwidth	40～45°	18～21°
Polarization	Horizon	Horizon
Tx cable loss	2.8 dB	9.4 dB
Rx cable loss	2 dB	6.2 dB

Ⅳ. 측정 결과 및 분석

일반적인 LOS (Line of Sight) 복도 환경의 3.7 GHz 및 28 GHz 주파수 대역에서 경로손실값을 측정하였다.

3.7 GHz 와 28 GHz 대역에서 FSPL, CI 모델, FI 모델을 통하여 건물 복도에서 예측된 경로손실 예측값과 실측값은 각각 그림 3, 그림 4와 같다.

그림 3의 결과, 3.7 GHz 대역에서 최적화된 PLE값은 1.5293이며, CI 모델의 SF 표준편차는 9.1606이다. 또한 FI 모델의 α는 79.5269, β는 －0.6082, 표준편차는 5.8113이다. 3.7 GHz 대역에서 각 모델의 표준편차를 기준으로 실제 측정 데이터와 FI 모델이 유사하였다.

그림 4의 경우, 28 GHz의 대역에서 최적화된 PLE값은 1.7795이며, CI 모델의 표준편차는 8.5803이다. FI 모델의 α는 70.2012, β는 1.2517, 표준편차는 4.4810이다. 28 GHz 대역에서 각 모델의 표준편차를 기준으로 하였을 때, FI 모델이 실제 측정 데이터와 유사하였다.

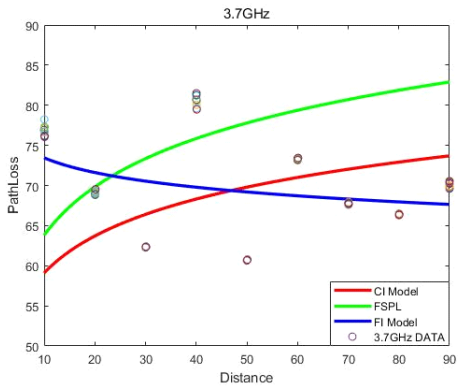

Fig. 3 3.7GHz simulation

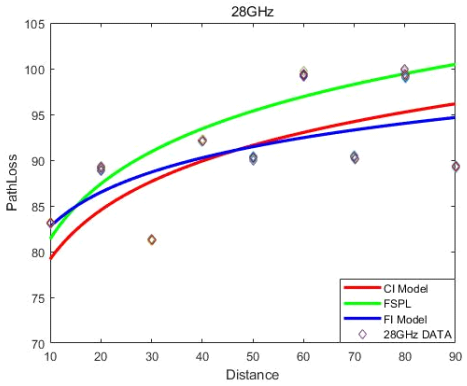

Fig. 4 28GHz simulation

그림 3 및 그림 4를 통하여 3.7 GHz, 28 GHz대역에서 경로손실 실측값과 예측 모델을 통한 예측값을 비교하였을 때, FI 모델이 CI 모델에 비해 표준편차값이 적고, 예측된 경로손실값은 실측값과 유사함을 확인하였다.

Ⅴ. 결 론

현재 도입된 5G 이동통신 시스템은 3.5 GHz 대역에서 서비스 되고 있지만, 원활하지 않는 상황이다. 그래서 일반 건물의 복도에서 무선 경로손실을 측정하여 채널 모델의 비교에 중점을 두었다. 측정 방법은 Tx로부터 Rx를 10 m 씩 거리를 두고 이동하며 데이터를 수집 하였으며, 수집된 데이터를 통하여 경로손실값을 분석·예측하였다.

3.7 GHz 대역에서는 FI 모델의 경로손실 예측값과 실측값이 유사한 반면, FSPL과 CI 모델은 차이가 있음을 알 수 있었다. 28 GHz의 경우에는, CI 모델과·FI 모델을 통한 예측값과 실측값이 많은 차이를 보이지 않았기에 향후 연구에서는 본 연구에서 측정한 복도의 길이보다 길이가 긴 환경에서 전파 경로손실을 측정하여 분석하고자 한다.

References

[1] F. D. Diba, M. A. Samad, and D. -Y. Choi, “Centimeter and Millimeter-Wave Propagation Characteristics for Indoor Corridor: Result From Measurements and Models,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158726-158737, Nov. 2021.

[2] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Wireless communications and applications above 100 ghz: Opportunities and challenges for 6g and beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729-78757, Jun. 2019.

[3] O. Kanhere and T. S. Rappaport, “Position location for futuristiccellular communications: 5g and beyond,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 70-75, Jan. 2021.

[4] K. Haneda, J. Zhang, L. Tan, G. Liu, Y. Zheng, H. Asplund, J. Li, Y. Wang, D. Steer, C. Li, T. Balercia, S. Lee, Y. S. Kim, A. Ghosh, T. Thomas, T. Nakamura, Y. Kakishima, T. Imai, H. Papadopoulos, T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, S. Sun, O. Koymen, S. Hur, J. Park, C. Zhang, E. Mellios, A. F. Molisch, and S. S. Ghassamzadeh, “5g 3gpp-like channel models for outdoor urban microcellular and macrocellular environments,” in *2016 IEEE 83rd vehicular technology conference (VTC spring). IEEE*, Nanjing, China, vol. 83, pp. 1-7, May. 2016.

[5] H. K. Rath, S. Timmadasari, B. Panigrahi, and A. Simha, “Realistic indoor path loss modeling for regular wifi operations in india,” in *2017 Twenty-third National Conference on Communications (NCC). IEEE*, Chennai, India, pp. 1-6. Mar. 2017.

[6] H. -S. Jo, D. -Y. Kim, and J. -G. Yook, “Path Loss characteristics in subway Tunnel at 2.65GHz,” *The journal of Korea Information and Communications Society*, vol. 31, no. 10A, pp. 1014-1017, Dec. 2006.

[7] M. A. Samad and D. -Y. Choi, “Analysis and Modeling of Propation in Tunnel at 3.7 and 28 GHz,” *CMC-COMPUTERS MATERIALS & CONTINUA*, vol. 71, no. 2, pp. 3127-3143, Dec. 2021.

[8] S. Sun, T. S. Rappaport, T. A. Thomas, A. Ghosh, H. C. Nguyen, I. Z. Kovács, I. Rodriquez, O. Koymen, and A. Partyka, “Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 2843-2860, May. 2016.

[9] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, “Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 9, pp. 3029-3056, Sep. 2015.

[10] G. R. MacCartney, J. Zhang, S. Nie, and T. S. Rappaport,

"Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells," in *2013 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM)*, Atlanta, GA, pp. 3948-3953, Dec. 2013.

김형중 (Hyeong Jung Kim)

2021년 조선대학교 정보통신공학과 학사 졸업
2021년 ~ 현재 조선대학교 정보통신공학과 석사 재학중
※관심분야 : 통신 및 전파전파, 5G 시스템

최동유 (Dong You Choi)

1999년 조선대학교 전자공학과 학사 졸업
2001년 조선대학교 전자공학과 석사 졸업
2004년 조선대학교 전자공학과 박사 졸업
2007년 ~ 현재 조선대학교 정보통신공학과 교수
※관심분야 : 통신 및 전파전파, 안테나 설계 및 제작, 마이크로파 강우감쇠