creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266471

2018년 2월

석사학위 논문

100㎒-26㎓ 대역에서 전파환경 및 지형 재질과 안테나 높이에 따른 전파통달거리 비교 연구

조선대학교 대학원

전자공학과

최 재 원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

100㎒-26㎓ 대역에서 전파환경 및 지형 재질과 안테나 높이에 따른 전파통달거리 비교 연구

A Study on the Comparison of Propagation Distances over 100㎒-26㎓ according to the Environment, Ground Material, and Antenna Height

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

전자공학과

최 재 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

100㎒-26㎓ 대역에서 전파환경 및 지형 재질과 안테나 높이에 따른 전파통달거리 비교 연구

지도교수 오 순 수

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

전자공학과

최 재 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

최재원의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 황 석 승 (인)

위 원 조선대학교 교수 최 현 식 (인)

위 원 조선대학교 교수 오 순 수 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

도 목 차 v
표 목 차 vi
ABSTRACT vii

제1장 서 론 1

제2장 전파통달거리와 전파모델 2
2.1 전파통달거리의 정의 2
2.2 일반적인 전파 전파모델 2
2.3 결정론적 전파모델 3
2.3.1 Two-Ray 모델 4
2.3.2 Multi-Ray 모델 8
2.4 경험론적 전파모델 9
2.4.1 Okumura 모델 10
2.4.2 Hata 모델 11
2.4.3 Modified Hata 모델 13
2.4.4 COST-231 Hata 모델 14
2.4.5 COST-231 WI 모델 14
2.4.6 SUI 모델 16

제3장 100㎒-26㎓ 대역 경로손실 및 전파통달거리 ... 19

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1 전파 환경에 따른 경로손실 ····· 19
3.1.1 도심밀집지 ····· 21
3.1.2 일반도심지 ····· 22
3.1.3 개활지 ····· 24
3.2 개활지에서 지형 재질에 따른 경로손실 ····· 26
3.3 개활지에서 송신안테나 높이에 따른 경로손실 ····· 27
3.4 전파통달거리 비교 분석 ····· 30

제4장 결 론 ····· 38

참 고 문 헌 ····· 40

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도 목 차

그림 2.1 Two-Ray 반사 모형 ····· 4
그림 2.2 Two-Ray 모델의 거리에 따른 수신전력 ····· 7
그림 2.3 도심 통로에서 Multi-Ray 반사 모형 ····· 8
그림 2.4 건물 사이에서 Multi-Ray 경로 ····· 9
그림 3.1 도심밀집지역 시뮬레이션 모델 ····· 21
그림 3.2 도심밀집지역 시뮬레이션 결과 ····· 22
그림 3.3 일반도심지역 시뮬레이션 모델 ····· 23
그림 3.4 일반도심지역 시뮬레이션 결과 ····· 24
그림 3.5 개활지 시뮬레이션 환경 ····· 25
그림 3.6 개활지 시뮬레이션 결과 ····· 25
그림 3.7 개활지에서 지형 재질이 PEC인 경우 경로손실 시뮬레이션 결과 ····· 26
그림 3.8 개활지에서 송신안테나 높이가 10m인 경우의 경로손실 ····· 27
그림 3.9 개활지에서 송신안테나 높이가 15m인 경우의 경로손실 ····· 28
그림 3.10 개활지에서 송신안테나 높이가 20m인 경우의 경로손실 ····· 29
그림 3.11 도심밀집지역 시뮬레이션 결과 곡선맞춤 ····· 30
그림 3.12 일반도심지역 시뮬레이션 결과 곡선맞춤 ····· 31
그림 3.13 광주 상무지구에서 측정한 경로손실 ····· 32
그림 3.14 나주 혁신도시에서 측정한 경로손실 ····· 33

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

표 2.1 기본 다운링크 전력 레벨 ····· 2
표 2.2 다양한 전파모델의 상호비교 ····· 10
표 2.3 지형 조건에 따른 SUI 모델의 매개변수 ····· 17
표 3.1 전파환경 분류체계 ····· 20
표 3.2 환경별 시뮬레이션 결과를 통해 산출한 전파통달거리 비교표 ····· 34
표 3.3 측정 데이터를 통해 산출한 전파통달거리 비교표 ····· 35
표 3.4 송신안테나 높이에 따른 전파통달거리 비교표 ····· 36
표 3.5 지형 재질에 따른 전파통달거리 비교표 ····· 37

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on the Comparison of Propagation Distances over 100㎒-26㎓ according to the Environment, Ground Material, and Antenna Height

Choi Jae-Won
Advisor : Prof. Oh Soon-Soo, Ph.D.
Dept. of Electronic Engineering
Graduate School of Chosun University

In this thesis, a propagation model simulation was conducted to investigate the attenuation characteristics over 100㎒ to 26㎓ frequencies. Propagation models may be deterministic or empirical, depending on the analysis method. The frequency attenuation characteristics of 100 ㎒ to 26㎓ are analyzed through a propagation model simulation using a ray-tracing method that one of the deterministic model. The first simulation was performed using a 10 m omni-directional transmission antenna and a 1.5 m omni-directional receiving antenna in urban, sub-urban, and open environment. Second simulations were performed by changing several parameters, including the ground material (concrete, and PEC) and the height of the transmission antenna in open environment. Then, the results of these deterministic model simulations were compared with the empirical model that includes measurement results. The results of this study could be used as a criterion for estimating the value of frequency; however, for application to the further development of current communication technologies, more analysis is required.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장 서 론

1900년대 이후 전파자원에 대한 수요가 전 세계적으로 증가하고 있다. 주파수는 다양한 산업분야에서 중요한 자원으로 인식되었고 이를 보다 효율적으로 사용하기 위한 주파수관리정책의 필요성이 증대되었다. 우리나라의 경우 주파수를 보다 효율적으로 사용하기 위한 정책의 일환으로, 주파수 관리에 시장경제체제가 적용되면서 주파수 경매제도가 도입되었다. 따라서 여러 주파수의 경제적, 공학적 가치를 추정하는 기준이 필요하게 되었고 그 기준을 뒷받침할 주파수 특성 분석에 관련된 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.

전파 전파에 대한 연구들은 주로 2.5㎓ 이하의 대역에 초점을 맞추어 진행되어왔다. 이는 무선통신에서 사용하는 주파수 대역에 중점을 맞춘 것이다. 그러나 5세대 무선통신 서비스와 같은 차세대 무선통신 기술들의 상용화가 진행 중인 상황에서 기존의 2.5㎓ 대역에 집중되었던 연구 외에 보다 더 높은 주파수 대역에 대한 특성을 분석하고 정리하는 연구가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 이러한 주파수의 특성을 분석하기 위한 연구의 일환으로, 100㎒-26㎓ 대역의 전파통달거리를 구하고 이를 비교했다. 전파통달거리는 결정론적 전파모델 시뮬레이션과 경험론적 전파모델을 포함하여 기존에 존재하는 측정 데이터들을 통하여 얻었다. 전파모델 시뮬레이션에서 각 환경과 송신안테나 높이 및 지형의 재질에 따른 주파수별 경로손실을 확인하였고 이를 통해 전파통달거리를 계산하였다. 그 후 해당 결과를 경험론적 모델 및 기존 측정 데이터와 비교하였고 각 환경별, 주파수별 전파통달거리를 정리하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 전파통달거리와 전파모델

2.1 전파통달거리의 정의

전파통달거리에 대한 정의는 명확히 규명되지 않았다. 그러나 전파를 이용한 통신의 관점에서 수신기의 동작 및 데이터 전달의 성공 및 실패의 경계의 거리로 정의하는 것이 통상적이라고 할 수 있다.

또한 통신방식에 따라 전파통달거리의 차이가 존재한다. 디지털 통신의 관점에서 전파의 통달거리는 채널 코딩이나 변복조 등의 방식에 의하여 거리의 증가가 가능하다.

디지털 통신방식 관점에서 전파통달거리를 정의할 때 참고할 수 있는 표준은 3GPP이다. 3GPP TS 36.521-1 규격에서는 통달거리를 수신기 신호의 최소값을 -85dBm으로 정의한다. 표 2.1은 기본 다운링크 전력 레벨을 표시한다. 여기서, RS는 Reference signal을 의미하고, EPRE는 Power for one resource element(RE)를 의미한다.

표 2.1 기본 다운링크 전력 레벨

	Unit	Channel bandwidth					
		1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Number of RBs		6	15	25	50	75	100
Channel BW Power	dBm	-66	-62	-60	-57	-55	-54
RS EPRE	dBm/15kHz	-85	-85	-85	-85	-85	-85

Note 1: The channel bandwidth powers and RB allocations are informative, based on -85dBm/15kHz RS_EPRE, then scaled according to the number of RBs and rounded to the nearest integer dBm value. Full RE allocation with no boost or deboost is assumed in this calculation, but allocation may vary during setup.
Note 2: The power level is specified at each UE Rx antenna.

2.2 일반적인 전파 전파모델

무선기술의 발달 및 무선통신 서비스의 양적 팽창과 함께, 한정된 주파수들을 보다 효율적으로 분배하거나 공유하고 재배치함으로서, 상호 간섭을 경감시키는 방안

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

들이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 부족한 전파 자원의 전파 간섭을 완화시키고 효율적인 간섭분석 및 전파전파 특성 파악을 위한 전파전파 모델의 필요성 또한 증가되고 있다.

전파 전파모델은 크게 분석 방법에 따라 결정론적 모델(deterministic model)과 경험론적 모델(empirical model)로 분류할 수 있다. 결정론적 모델은 수신 전계 강도를 경로 프로파일로부터 구하는 것으로서 근본적으로는 맥스웰 방정식과 경계조건으로부터 해를 구하는 절차를 거치게 된다. 자유 공간 손실과 함께 결정론적 모델에서는 송수신기 사이의 전파 경로에 지형적인 장애물이 있는 경우에는 회절파로 인한 손실도 고려하게 된다. 따라서 결정론적 모델은 해당 분석 영역의 지형학적으로 상세한 사전 정보가 필요함을 알 수 있다. 이러한 결정론적 모델은 정확한 전계 강도 수치를 도출할 수 있으나, 매우 많은 계산 노력이 필요하며, 장소 특정적이라는 단점이 존재한다. 대표적인 결정론적 모델로는 광선 추적법(ray-tracing) 등을 들 수 있다.

이에 반하여 경험론적인 모델은 전파 경로상의 지형학적인 사전 정보가 불충분한 경우에 전계 강도를 추정한다. 본 모델은 주로 많은 횟수의 시나리오나 반복 측정을 통한 데이터를 통하여 만들어지게 되므로 통계적인 특성을 나타내게 된다. 주로 지도상의 특정한 지형에 의존하지 않는 적은 수의 파라미터를 요하는 간단한 수식으로 구성되어 있으나, 주파수가 제한되어 있거나 일정한 환경(도심지, 교외지, 개활지, 밀집지역 등)에서만 유효하다는 단점이 있다. 매우 자세한 지도상의 실제 특성이나 실사 정보는 오히려 필요 없으며, 모델 튜닝이나 보정, 외삽 등의 과정을 거쳐서 적절한 전계 강도를 추정하게 된다.

그 외에도 측정에 기반을 둔 경험론적인 모형에 근거하면서 정확한 계산과 자세한 지형 정보와 같은 결정론적 전파모델의 측면까지도 고려한 반-결정적 모델(semi-deterministic model) 등의 복합적인 방법도 또한 널리 이용되고 있다.

2.3 결정론적 전파모델

광선 추적법(ray-tracing) 은 결정론적 모델의 대표적인 방법이며 송수신 경로상의 모든 위치의 전계 강도를 이끌어낼 수 있다는 큰 이점이 있다. 광선 추적법은 송수신점 사이의 모든 광선 경로를 추적함으로서 모든 장애물들(벽 및 모서리 등)을 고려한 출력값을 구할 수 있다. 본 논문에서 진행한 시뮬레이션은 광선 추적법의 한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

종류인 Two-Ray 모델과 Multi-Ray 모델을 이용해 진행하였다. 두 모델에 대한 내용은 다음 절에 서술하였다.

2.3.1 Two-Ray 모델

UHF대역과 같은 육상 이동통신 환경에서 지면 반사로 인한 수신점에서의 전계 강도의 변화는 자유 공간의 전달 거리를 기반으로 한 Friis 전달공식으로만 추정하기에는 한계가 있다. 그림 2.1과 같은 Two-ray 반사 모형을 이용하면 이와 같은 상황을 보다 정확하게 기술할 수 있다.

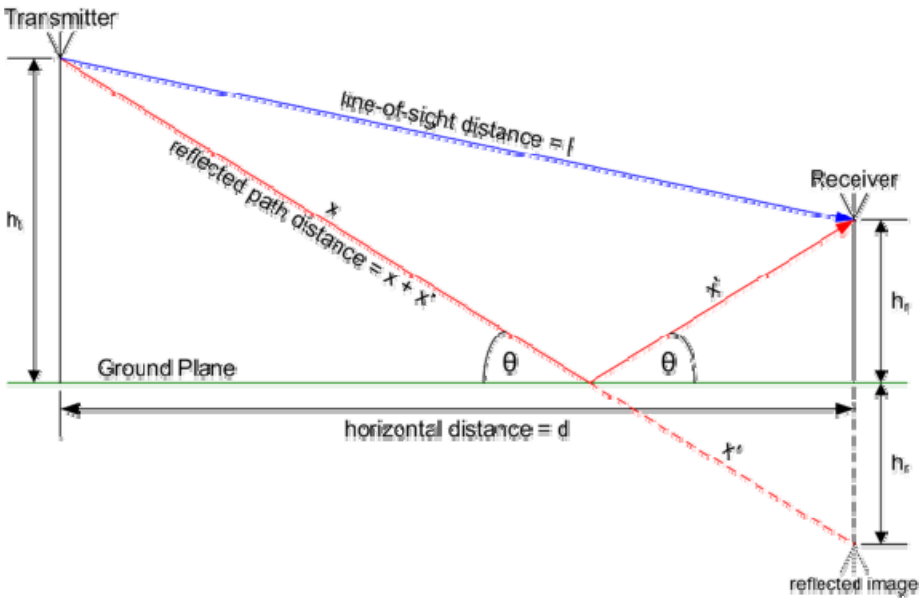

그림 2.1 Two-Ray 반사 모형

Two-Ray 반사 모형에서는 두 개의 전파 경로가 존재한다. 그림 2.1의 경로 l로 진행하는 LOS(line-of-sight)파와 $x+x'$ 경로로 전파되는 반사파가 이에 해당한다. LOS파는 다음과 같이 쓸 수 있으며

$$r_{los}(t) = Re\left\{\left[\frac{\lambda}{4\pi}s(t)\sqrt{G_{t,los}}\sqrt{G_{r,los}}\frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}l}}{l}\right]e^{j2\pi ft}\right\} \tag{2.1}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서 λ는 파장이고, $s(t)$는 송신신호, $G_{t_1 los}$와 $G_{r_1 los}$는 각각 LOS경로를 향한 송수신 안테나의 이득, f는 주파수를 나타낸다. 반사경로를 따르는 반사파는

$$r_{ref}(t) = Re\left\{\left[\frac{\lambda}{4\pi} s(t-\tau) R(\theta) \sqrt{G_{t,ref}} \sqrt{G_{r,ref}} \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(x+x')}}{x+x'}\right] e^{j2\pi ft}\right\} \tag{2.2}$$

처럼 주어진다. $G_{t,los}$와 $G_{r,los}$는 각각 반사경로를 향한 송수신 안테나의 이득이며 τ는 지연 확산(delay spread)값으로서 $\tau = \frac{(x+x'-l)}{c}$ (c는 전파속도)로 주어진다. 또한 $R(\theta)$는 지면의 프레넬(Fresnel) 반사 계수를 나타내며,

$$R(\theta) = \frac{\sin\theta - X}{\sin\theta + X} \tag{2.3}$$

$$X_{\perp} = \frac{\sqrt{\epsilon_g - \cos^2\theta}}{\epsilon_g} \tag{2.4}$$

$$X_{\parallel} = \sqrt{\epsilon_g - \cos^2\theta} \tag{2.5}$$

로 주어진다. $\perp$와 $\parallel$는 각각 수직편파와 수평편파를 나타내는 기호이며, ϵ_g는 지면의 전기적 상대유전율, θ는 입사각도(=반사각도) 이다. 수신단에서의 전체 수신신호는 사인파의 합성(sum-of-sinusoids)으로

$$r_{tot}(t) = Re\left\{\frac{\lambda}{4\pi}\left[\begin{array}{l} s(t)\sqrt{G_{t,los}}\sqrt{G_{r,los}}\dfrac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}l}}{l} \\ + s(t-\tau)R(\theta)\sqrt{G_{t,ref}}\sqrt{G_{r,ref}}\dfrac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(x+x')}}{x+x'} \end{array}\right] e^{j2\pi ft}\right\} \tag{2.6}$$

처럼 주어진다.

좁은 협대역(narrowband)의 신호를 가정할 경우($\tau \ll \frac{1}{BC}$, BC = 상관대역폭),

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$s(t) \simeq s(t-\tau)$로 근사시킬 수 있다. 이 경우 전체 수신신호의 전력 P_r은

$$\begin{aligned} P_r &= \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 |s(t)|^2 \left| \sqrt{G_{t,los}}\sqrt{G_{r,los}}\frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}l}}{l} + R(\theta)\sqrt{G_{t,ref}}\sqrt{G_{r,ref}}\frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(x+x')}}{x+x'} \right|^2 \\ &= \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 |s(t)|^2 \left| \sqrt{G_{t,los}}\sqrt{G_{r,los}}\frac{1}{l} + R(\theta)\sqrt{G_{t,ref}}\sqrt{G_{r,ref}}\frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(x+x'-l)}}{x+x'} \right|^2 \end{aligned} \tag{2.7}$$

처럼 쓸 수 있다. 그림 2.1의 Two-ray 모형으로부터

$$x + x' = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} \tag{2.8}$$

$$l = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \tag{2.9}$$

처럼 주어지는 것을 알 수 있으며, 여기서 d는 송수신기 사이의 거리, h_t와 h_r은 각각 송신기와 수신기의 높이가 된다. 따라서 LOS파와 반사경로 사이의 경로 차이 $\triangle$는

$$\Delta = x + x' - l = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \tag{2.10}$$

로 주어지며 이와 같은 경우 위상차이 $\theta_\triangle$은

$$\theta_\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi f\Delta}{c} \tag{2.11}$$

이 된다. 수신전력 P_r은

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 P_t \left| \sqrt{G_{t,los}}\sqrt{G_{r,los}}\frac{1}{l} + R(\theta)\sqrt{G_{t,ref}}\sqrt{G_{r,ref}}\frac{e^{-j\theta_\Delta}}{x+x'} \right|^2 \tag{2.12}$$

처럼 쓸 수 있으며, 여기서 P_t는 송신전력이 된다. 이 때 송수신 안테나의 지향성

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 그다지 높지 않고, 그 사이의 거리 d가 멀어서 두 안테나 간의 상호 간섭이 크지 않다면 LOS경로와 반사경로 간의 이득은 상호간에 동일하다고 근사가 가능하다. 즉, $Gt,los \simeq Gt,ref = Gt$, $Gr,los \simeq Gr,ref = Gr$이 되며 이 경우 수신전력은

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 P_t G_t G_r \left| \frac{1}{l} + R(\theta)\frac{e^{-j\theta_\Delta}}{x+x'} \right|^2 \tag{2.13}$$

처럼 단순화된다.

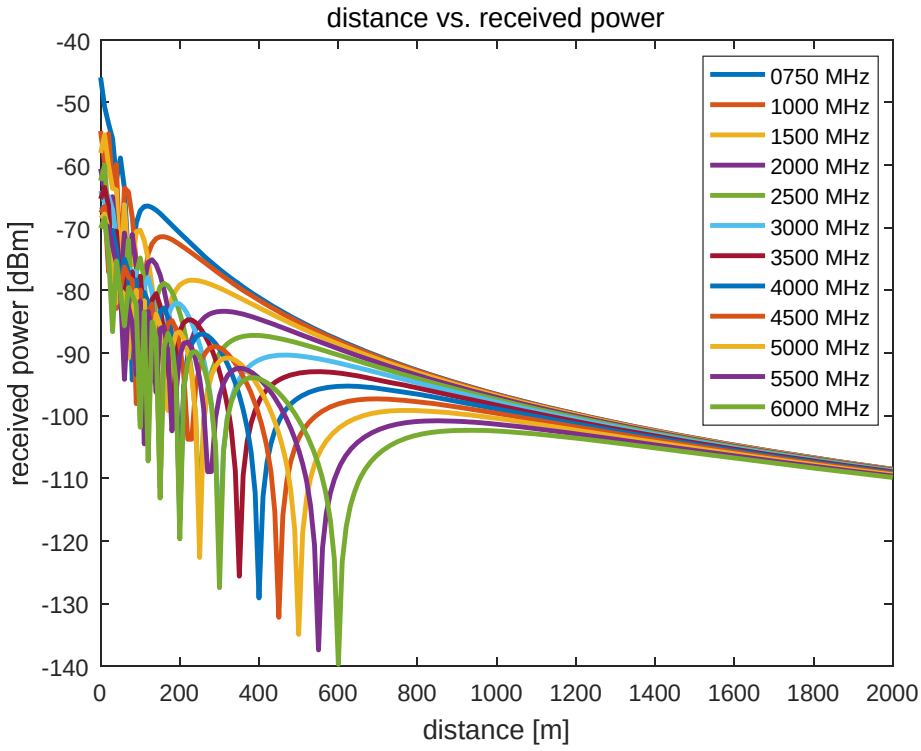

그림 2.2 Two-Ray 모델의 거리에 따른 수신전력

그림 2.2는 앞에서 살펴본 수신전력 모형을 이용하여 수신기에서의 수신전력을 측정 환경에 맞추어 거리에 따른 수신전력을 도시한 것이다. 송신안테나의 높이는 1.5m이고 수신안테나의 높이는 5m이며, 송신안테나의 이득과 수신안테나의 이득은 0dBi이다. 근접한 거리에서는 두 경로의 전파 간섭으로 인한 전력 감쇄가, 원거리에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서는 일정 비율로 감쇄하는 전력 감쇄가 나타나고 있음을 알 수 있다. 다만 본 모형에서는 송수신거리 d가 어느 정도 크다는 것을 가정하였으므로, 근거리에서는 오차가 있다는 단점이 존재한다.

2.3.2 Multi-Ray 모델

Two-Ray 반사 모형은 필요에 따라 쉽게 Multi-Ray 모형으로 확장될 수 있다. 도심의 통로에서 양측 벽면에 반사되는 전파 경로를 벽면 반사에 따른 경로를 전기영상법에 따라 가상 소스(source)로부터 방사되는 것으로 가정하고, 반사 횟수만큼 반사계수를 곱함으로서 각 경로마다 Two-Ray 반사 모형의 수식에 따라 수신점에서의 전계 강도를 추정함으로서 Multi-Ray 모형으로 확장해 나갈 수 있다. 그림 2.3은 이에 대한 개념도를 도시한 것이다. 또한 그림 2.4와 같이 실제 거주지와 같이 도로면의 건물 또는 집 사이의 간격이 있다면 일부 광선은 도로에서 빠져나가서 수신점으로 돌아오지 못하게 되고, 이 경우에는 전력 손실을 등가 시킨 단순화한 모형을 사용하게 된다.

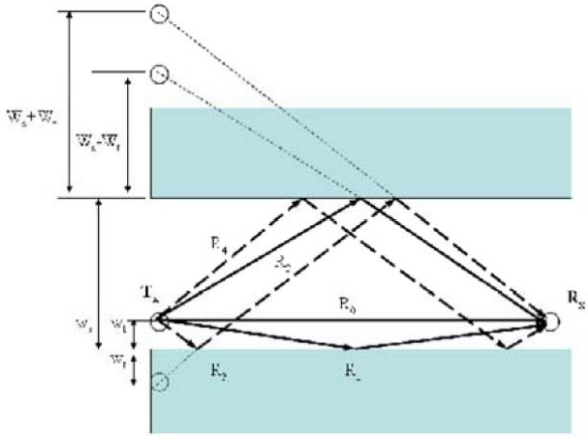

그림 2.3 도심 통로에서 Multi-Ray 반사 모형

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

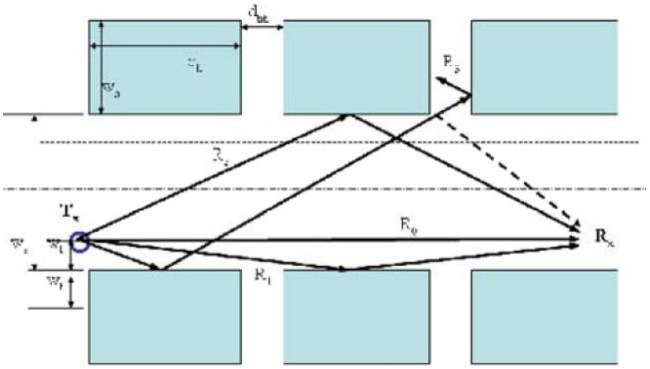

그림 2.4 건물 사이에서 Multi-Ray 경로

이 외에도 시가지(built-up area)에서 초목(vegetation)의 영향을 고려하는 전파 예측 모델 및 Foldy-Lax 방정식에서 출발한 나무로부터의 산란을 고려하는 예측 모델 및 이산 산란 이론 모델, COST-231 Walfisch-Ikegami 모델로부터 유래한 UHF대역의 이론적인 모델, 다중 평판에서의 회절을 이용한 나무 산란 모델, 옥상-거리(rooftop-to-street) 회절 성분 모델 등 다양한 Multi-Ray 모형이 존재하고 있다.

2.4 경험론적 전파모델

광선 추적법을 필두로 한 결정론적 모델은 맥스웰 방정식의 물리적인 현상에 기반하여 전파전파 현상을 시뮬레이션 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 복잡한 수식과 다양한 전파 경로간의 회절 및 간섭 현상으로 인하여 많은 계산 시간이 소요되고, 환경 조건에 따른 3차원의 상세한 지형 정보를 요하게 된다는 문제점이 존재한다. 이에 반하여 경험론적인 모델은 측정에 기반한 모형으로서, 전파 경로간의 간섭 및 장애물 등의 지형 효과를 단순한 수식으로 모형화할 수 있다는 장점이 존재한다.

대표적인 경험론적인 전파전파모델은 Okumura 모델, (modified) Hata 모델, COST-231 Hata 모델, COST-231 Walfisch-Ikegami(WI) 모델, SUI(Stanford University Interim) 모델 등이 있으며, 이들 모델의 다양한 조건에 따른 상호 비교를 표 2.2에 정리하였다. 또한 본 대표적인 모델들에 대해서 부록에 상세히 기술하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 2.2 다양한 전파모델의 상호비교

모델	주파수 범위	송신안테나 높이	수신안테나 높이	전송거리	지형 조건
Okumura	3㎓ 미만	30m~1000m	10m 이하	100km 이하	도심지 위주
Hata	150~1500㎒	30m~200m	1m~10m	1km~10km	도심지 중심
Modified Hata	150~1500㎒	30m~200m	1m~10m	1km~100km	도심지 중심
COST-231 Hata	1500~2000㎒	30m~200m	1m~10m	1km~20km	도심지, 교외지, 개활지
COST-231 WI	800~2000㎒	4m~50m	1m~3m	0.02km~5km	도심지, 교외지, 개활지
SUI	1.9㎓~11㎓	15m~40m	2m~10m	10km 미만 (셀 반경)	도심밀집지, 교외지, 개활지

2.4.1 Okumura 모델

대부분의 경험론적인 전파전파모델은 Okumura 모델을 개량함으로서 파생되었다고 할 수 있다. 즉, Okumura 모델은 경험론적인 모델의 고전으로 불리며, 본 모델은 일본의 도쿄에서 측정한 수많은 데이터를 기반으로 하고 있으며, 높은 건물이 있는 밀집도시에서 더 높은 정확도를 보인다. 구체적인 유효범위 및 평균경로손실 관계식은 다음과 같다.

- 주파수 범위 : $f \leq 3000$㎒
- 송신기 안테나 높이 : $30\text{m} \leq h_b \leq 1000\text{m}$
- 수신기 안테나 높이 : $h_m \leq 10\text{m}$
- 전송거리 : $d \leq 100\text{km}$
- 평균 경로 손실 L_p (dB)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$L_p = L_f(d) + A_{mu}(f,d) - G(h_b) - G(h_m) + G_{AREA} \tag{2.14}$$

여기서

$L_f(d)$ = 자유 공간 경로 손실 = $20\log(\frac{4\pi df}{c})$

c = 자유 공간에서의 전파전파 속도

$A_{mu}(f,d)$ = 자유 공간 손실에 가해지는 평균 감쇄 인자

$G(h_b)$ = 송신측 안테나 높이에 따른 이득 인자 = $20\log(\frac{h_b}{200})$

$G(h_m)$ = 수신측 안테나 높이에 따른 이득 인자

= $10\log(\frac{h_m}{3})$ for $h_m \leq 3\text{m}$, $20\log(\frac{h_m}{3})$ for $3\text{m} < h_m < 10\text{m}$

G_{AREA} = 환경 종류에 따른 이득 인자

위에서 $G(h_b)$ 및 $G(h_m)$은 경험적인 관계식이며, $A_{mu}(f,d)$ 및 G_{AREA}는 Okumura의 그래프로부터 구할 수가 있다. Okumura 모델은 통상적으로 경로 손실 측정값과 10~14dB의 표준편차를 가지는 것이 경험적으로 알려져 있다.

2.4.2 Hata 모델

Hata 모델은 기존의 Okumura 모델에서 그래프로 도시한 경로 손실을 경험론적으로 공식화한 것으로서 주파수 범위 150㎒~1.5㎓의 유효 범위를 가지고 있으며, 도심지를 기반으로 하여 교외와 개활지에서도 수정된 공식을 가지고 있다. 구체적인 유효범위 및 평균경로손실 관계식은 다음과 같다.

- 주파수 범위 : 150㎒ $\leq f \leq$ 1500㎒
- 송신기 안테나 높이 : 30m $\leq h_b \leq$ 200m
- 수신기 안테나 높이 : 1m $\leq h_m \leq$ 10m
- 전송거리 : 1km $\leq d \leq$ 10km
- 경로 손실 L_p (dB)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 경우, 도심지의 경로손실은

$$L_p = A + B\,10\log_{10}(d) \tag{2.15}$$

이며, 교외지의 경로손실은

$$L_p = A + B\,10\log_{10}(d) - C \tag{2.16}$$

가 된다. 마지막으로 개활지의 경로손실은

$$L_p = A + B\,10\log_{10}(d) - D \tag{2.17}$$

이다. 여기서

$$A = 69.55 + 26.161\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(h_b) - a(h_m)$$
$$B = 44.9 - 6.55\log_{10}(h_b)$$
$$C = 5.4 + 2[\log_{10}(\frac{f}{28})]^2$$
$$D = 40.94 + 4.78[\log_{10}(f)]^2 - 18.33\log_{10}(f)$$

이며, 또한

$$a(h_m) = [1.1\log_{10}(f) - 0.7]\,h_m - [1.56\log_{10}(f) - 0.8]$$ <중소도시 및 소도시>

$$a(h_m) = 8.29[\log_{10}(1.54\,h_m)]^2 - 1.1$$ <대도시, $f \le 200$㎒>

$$a(h_m) = 3.2[\log_{10}(11.75\,h_m)]^2 - 4.97$$ <대도시, $f \le 400$㎒>

이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.4.3 Modified Hata 모델

Modified Hata 모델은 기존의 Hata 모델이 가지는 한계점을 극복하고 유효범위를 증가시키기 위해 수정된 것이다. 이미 언급되었듯이 경험적인 모델은 모든 환경에서 다 만족될 수 없으며, 주로 시간율 및 공간율이 50% 선에서 평균 경로 손실(median path loss)값을 추정하므로, 적용할 시 유효 조건 등에 있어 주의가 필요하다. 대표적인 Modified Hata 모델로는 ITU-R P.529-3에 나오는 모델이 있다. 구체적인 유효범위 및 평균경로손실 관계식은 다음과 같다.

$$E = 69.85 - 6.16\log(f) + 13.82\log(h_b) + a(h_m) - (44.9 - 6.55\log(h_b))(\log(d))^2 \quad (2.18)$$

여기서

$$a(h_m) = (1.1\log(f) - 0.7)\, h_m - (1.56\log(f)) - 0.8 \quad (2.19)$$

$$b = \begin{cases} 1 & \text{for } d \le 20km \\ 1 + (0.14 + 1.87*10^{-4}*f + 1.07*10^{-3}*h_b)(\log(\frac{d}{20}))^{0.8} & \text{for } d \ge 20km \end{cases} \quad (2.20)$$

$$h'_b = \frac{h_b}{(1 + 7*10^{-6}*h_b^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.21)$$

이다. 위에서 E는 전계 강도로서 경로 손실 L_p와의 관계는 1kW ERP 송신기 기준으로

$$L_p(dB) = 139.37 + 20\log f - E(dB\mu V/m) \quad (2.22)$$

로 주어진다. 이 Modified Hata모델은 다음과 같은 유효 조건을 갖는다.

- 주파수 범위 : 150㎒ $\le f \le$ 1500㎒
- 송신기 안테나 높이 : 30m $\le h_b \le$ 200m

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

- 수신기 안테나 높이 : 1m ≤ h_m ≤ 10m
- 전송거리 : 1km ≤ d ≤ 100km

2.4.4 COST-231 Hata 모델

본 모델은 Hata 모델의 주파수 범위를 2000㎒ 대역까지 확장시킴으로서, 이동통신 시스템 등의 경로 손실을 예측할 수 있도록 한 것이다. 도심지 뿐 아니라 교외지, 개활지 등의 경로 손실 추정에도 폭넓게 사용되며 유효범위는 다음과 같이 주어진다.

- 주파수 범위 : 1500㎒ ≤ f ≤ 2000㎒
- 송신기 안테나 높이 : 30m ≤ h_b ≤ 200m
- 수신기 안테나 높이 : 1m ≤ h_m ≤ 10m
- 전송거리 : 1km ≤ d ≤ 20km

구체적인 매개변수와 경로손실 관계는 다음과 같다.

$$L_p = A + B\,10\log_{10}(d) - C \tag{2.23}$$

여기서

$A = 46.3 + 33.9\log_{10}(f) - 13.28\log_{10}(h_b) - a(h_m)$

$B = 44.9 - 6.55\log_{10}(h_b)$

$C = 0$ dB <중소도시 혹은 교외지>

3 dB <밀집도시>

이다.

2.4.5 COST-231 WI 모델

본 모델은 도심지에서 수직 방향의 건물로부터의 전파 경로를 고려한 경험론적인

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

모델로서, COST-231 Hata 모델을 더 확장시킨 것이다. 도심지에서는 옥상 위쪽으로부터의 전파가 가장 영향력이 큰 편이다. 경로 손실은 스톡홀름 시에서의 측정을 기반으로 하고 있으며 송수신기 사이에 LOS환경이 존재할 경우에는 경로 손실이 다음과 같이 주어지게 된다.

$$L_p = 42.64 + 26\log(d/km) + 20\log(f) \quad \text{for } d \geq 20m \tag{2.24}$$

NLOS환경일 경우에는 경로 손실은

$$L_p = \begin{cases} L_o + L_{RTS} + L_{MSD} & \text{for } L_{RTS} + L_{MSD} > 0 \\ L_o & \text{for } L_{RTS} + L_{MSD} \leq 0 \end{cases} \tag{2.25}$$

가 된다. L_0는 자유 공간 감쇄량으로

$$L_o = 32.45 + 20\log(d) + 20\log(f) \tag{2.26}$$

로 주어진다. L_{RTS}는 다중 건물의 옥상으로부터의 회절을 통하여 거리에 있는 수신기까지의 전파 경로 손실을 나타내며

$$L_{RTS} = -16.9 - 10\log(w) + 10\log(f) + 20\log(\triangle h_m) + L_{ORI} \tag{2.27}$$

이다. 여기서 w는 거리의 폭(width)에 해당하며, $\triangle h_m$은 건물의 높이로부터 수신기의 높이 까지 차이를 나타낸다. 또한 L_{ORI}는 거리에 존재하는 수신기에 입사되는 입사파의 편향각 a (degreee)에 의한 손실로서 다음과 같이 정의된다.

$$L_{ORI} = \begin{cases} -10 + 0.354a & \text{for } 0^\circ < a < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(a-35) & \text{for } 35^\circ < a < 55^\circ \\ 4 - 0.114(a-55) & \text{for } 55^\circ < a < 90^\circ \end{cases} \tag{2.28}$$

위에서 L_{MSD}는 건물의 높이 와 그 사이의 폭 b에 의하여 생성된 다수 개의 장애물 회절이 수신기로의 직접파 경로를 따라 생기면서 발생한 전파 손실로서

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$L_{MSD} = L_{BSH} + k_A + k_D \log(d) + k_F \log(f) - 9\log(b/m) \tag{2.29}$$

로 주어지며, 여기서

$$L_{BSH} = \begin{cases} -18\log(1+\Delta h_b) & \text{for } h_b > h_{roof} \\ 0 & \text{for } h_b \le h_{roof} \end{cases} \tag{2.30}$$

$$\triangle h_b = h_b - h_{roof} \tag{2.31}$$

$$k_A = \begin{cases} 54 & \text{for } h_b > h_{roof} \\ 54 - 0.8(\Delta h_b) & \text{for } h_b \le h_{roof} \quad \text{and} \quad d \ge 0.5km \\ 54 - 0.8(\Delta h_b)\dfrac{d/km}{0.5} & \text{for } h_b \le h_{roof} \quad \text{and} \quad d < 0.5km \end{cases} \tag{2.32}$$

$$k_D = \begin{cases} 18 & \text{for } h_b > h_{roof} \\ 18 + 15\left(\dfrac{\Delta h_b}{h_{roof}}\right) & \text{for } h_b \le h_{roof} \end{cases} \tag{2.33}$$

$$k_F = -4 + \begin{cases} 0.7k\left(\dfrac{f}{925} - 1\right) & \text{for 중소도시 혹은 교외지} \\ 1.5k\left(\dfrac{f}{925} - 1\right) & \text{for 밀집도시} \end{cases} \tag{2.34}$$

가 된다. 본 모델의 유효범위는 다음과 같이 주어진다.

- 주파수 범위 : 800㎒ $\le f \le$ 2000㎒
- 송신기 안테나 높이 : 4m $\le h_b \le$ 50m
- 수신기 안테나 높이 : 1m $\le h_m \le$ 3m
- 전송거리 : 0.02km $\le d \le$ 5km

2.4.6 SUI 모델

SUI모델은 스탠포드 대학에서 IEEE 802.16을 위해 개발한 모델로서 1900㎒ 주파

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수 대역에서부터 11GHz 대역까지 폭넓게 사용된다. 이 모델에서는 3개의 각각 다른 지형 조건을 고려하는데, 이는 *A, B, C*로 분류된다. *A*는 가장 많은 경로 손실을 나타내는 도심밀집지이고 *B*는 교외지 환경을 나타내며, *C*는 가장 적은 경로 손실을 가지는 개활지를 가리키고 있다. 표 2.3에서는 이들 환경에 따라 해당 매개변수가 어떻게 달리 쓰이는지를 정리하였다.

표 2.3 지형 조건에 따른 SUI 모델의 매개변수

매개 변수	지형 조건 *A*	지형 조건 *B*	지형 조건 *C*
a	4.6	4	3.6
b (1/m)	0.0075	0.0065	0.005
c (m)	12.6	17.1	20

SUI 모델의 경로 손실은 다음과 같이 주어진다.

$$L_p = A + 10\gamma\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S \tag{2.35}$$

여기서 L_p는 전체 경로 손실이며, d는 송수신기 사이의 거리, d_0는 기준거리, X_f는 주파수에 따른 보정 인자, X_h는 송신기 높이에 따른 보정 인자, S는 음영(shadowing) 효과이며, γ는 경로 손실 인자가 된다.

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \tag{2.36}$$

h_b는 송신단의 높이이며, a, b, c는 각각 위 표에서 다룬 지형에 따른 매개변수를 가리킴. 또한 A는 자유 공간 손실로서

$$A = 20\log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \tag{2.37}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이며 λ는 파장을 의미한다. 경로손실에서 수정 인자 항들은 다음과 같이 주어진다.

$$X_f = 6\log\left(\frac{f}{2000}\right) \tag{2.38}$$

$$X_h = \begin{cases} -10.8\log\left(\frac{h_r}{2000}\right) & \text{for 지형 } A, B \\ -20\log\left(\frac{h_r}{2000}\right) & \text{for 지형 } C \end{cases} \tag{2.39}$$

$$S = 0.65(\log f)^2 - 1.3\log(f) + \alpha \tag{2.40}$$

여기서 개활지와 일반도심(지형 *A* 및 *B*)에서는 α = 5.2dB이며 도심지(지형 *C*)에서는 α = 6.6dB이다. 따라서 최종적으로 본 모델의 유효범위는 다음과 같이 주어진다.

- 주파수 범위 : $f \leq$ 11㎓
- 송신기 안테나 높이 : 15m $\leq h_b \leq$ 40m
- 수신기 안테나 높이 : 2m $\leq h_m \leq$ 10m
- 셀 반경 : < 10km

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 100㎒-26㎓ 대역 경로손실 및 전파통달거리

3.1 전파 환경에 따른 경로손실

본 절에서는 시뮬레이션을 통하여 전파 환경에 따른 100㎒~26㎓ 대역별 경로손실 상대 비교를 진행하였다. 시뮬레이션은 전파 전파 환경과 전파모델 해석에 유용한 Wireless Insite 툴을 이용하였고 Multi-Ray 모델을 화용한 해석 방법으로 결과를 얻었다. 본 절에서 진행한 시뮬레이션은 각각 도심밀집지와 일반도심지 및 개활지 조건으로 환경을 구성하였다. 각 환경에 대한 기준은 표 3.1의 전파환경 분류체계를 따랐다. 가장 대표적인 전파환경 분류체계로는 ITU-R P.1411이 있다.

본 절의 시뮬레이션은 송신안테나와 수신안테나의 높이를 10m와 1.5m로 고정한 채 LOS 환경에서의 수신 전력을 통해 경로손실을 확인하였는데, 사용한 송신안테나와 수신안테나는 모두 등방성 안테나이고 이득은 0dBi이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3.1 전파환경 분류체계

환경	환경 설명과 환경에 관련된 전파 장애
도심 밀집 지역	▪ 혼잡한 도심의 깊은 협곡, 도로 양편에 나란히 수십 층의 건물들이 밀집해 있고 도심의 깊은 협곡을 이룬다. ▪ 밀집된 건물들과 고층빌딩들이 서로 교차 배치되어 있고, 비가시선에서 많은 산란 전파 경로를 만든다. ▪ 큰 건물의 열(row)이 매우 긴 경로 지연을 만들 수 있다. ▪ 이 영역에서 혼잡한 교통 차량들과 높은 이동률의 방문객들이 반사파에 도플러 편이를 추가하는 반사기로 역할을 한다. ▪ 도로 양편의 나무들은 동적 음영을 만든다.
일반 도심 지역	▪ 도심 협곡, 도로 양편에 저층의 큰 건물들이 줄지어 서 있다. ▪ 큰 건물의 열(row)이 긴 경로 지연을 만들 수 있다. ▪ 이 영역에서 다수의 이동 차량들은 반사파에 도플러 편이를 추가하는 반사기로 역할을 한다.
근교 지역	▪ 전형적으로 넓은 도로가 있다. ▪ 건물의 높이는 1~2층이고, roof-top을 넘어가는 회절이 예상되는 지역이다. ▪ 이동 차량에 의한 반사와 음영이 가끔 발생할 수 있다. ▪ 주된 효과는 긴 지연과 적은 도플러 편이이다.
거주지	▪ 1~2층의 주택이 존재한다. ▪ 도로는 일반적으로 넓은 2차선이고, 도로가를 따라 차들이 주차되어 있다. ▪ 무성한 나뭇잎에서 적은 나뭇잎까지 가능 ▪ 자동차의 교통량은 대개 많지 않다.
시골 지역	▪ 큰 정원에 둘러싸인 작은 집 ▪ 지대(terrain)의 높이와 지형(topography)의 영향 ▪ 무성한 나뭇잎에서 적은 나뭇잎까지 가능 ▪ 자동차의 교통량은 적다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1.1 도심밀집지

그림 3.1은 도심밀집지역 시뮬레이션 모델이다. 본 시뮬레이션은 도심밀집지역 조건에 맞춰 실제 도심인 뮌헨을 모델링하여 진행하였다. 다른 결과들과 비교를 위해 LOS 환경만 고려를 하였고 송신안테나로부터 900m 지점까지의 수신 전력을 확인하였다. 또한 재질은 일괄적으로 콘크리트(concrete)로 설정하였다.

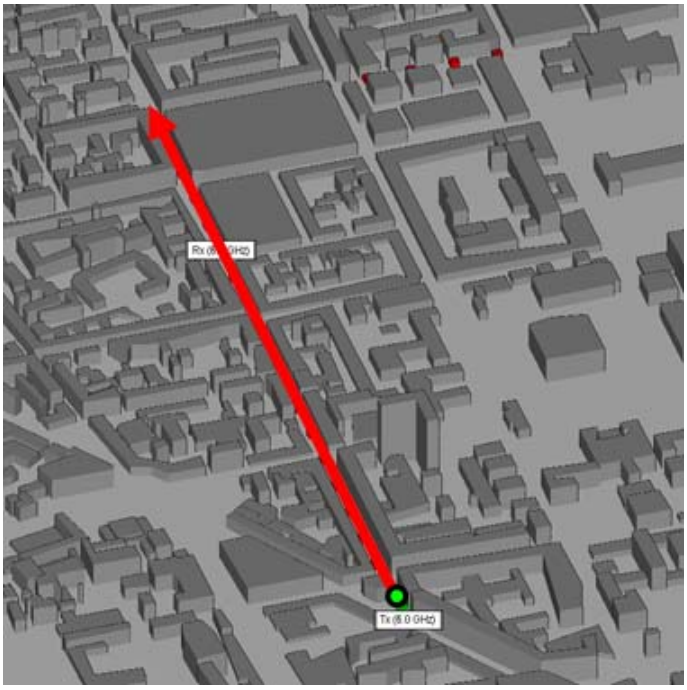

그림 3.1 도심밀집지역 시뮬레이션 모델

그림 3.1은 뮌헨을 모델로 진행한 도심밀집지역 시뮬레이션에서 송신안테나의 위치와 수신안테나의 경로를 보여준다. 송신안테나는 시작점에서 지면으로부터 10m 높이에 고정되어있고 수신안테나는 지면으로부터 1.5m의 높이에서 표시된 경로를 따라 위치한다. 송신안테나와 수신안테나는 모두 등방성 안테나를 사용하였다. 도심밀집지역 시뮬레이션 결과는 그림 3.2에 도시되어 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

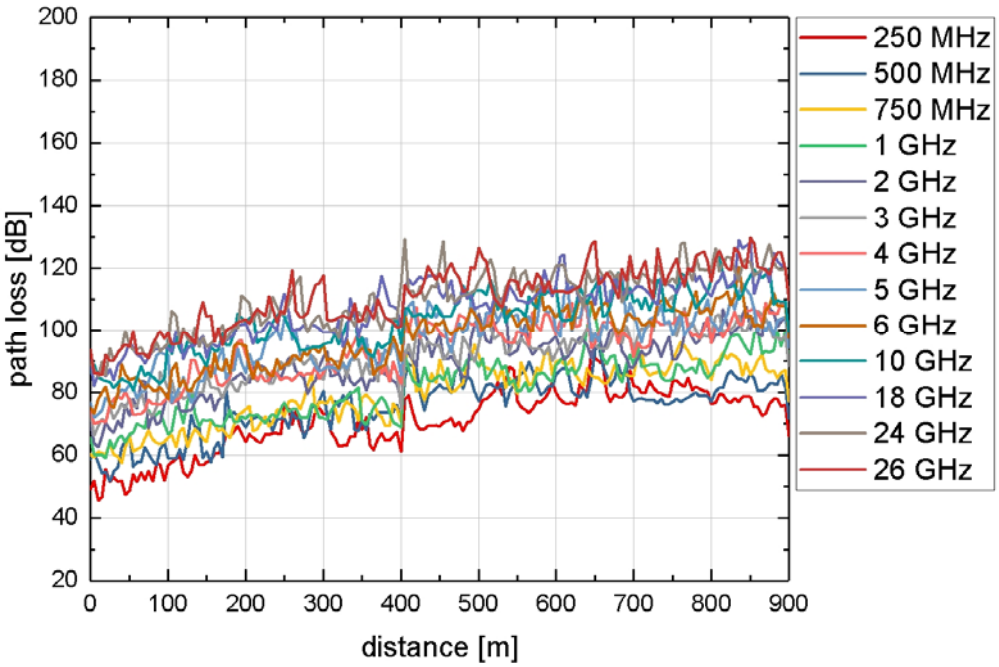

그림 3.2 도심밀집지역 시뮬레이션 결과

그림 3.2의 x축은 송신안테나와 수신안테나간의 거리를 나타내고 y축은 각 지점에서의 경로손실을 나타낸다. 주파수는 250㎒부터 26㎓까지 도시하였다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면 여러 주파수가 뒤섞여 주파수별 특성이 뚜렷하게 보이지 않는다. 하지만 전체적인 경향을 살펴보면 주파수가 높아질수록 경로손실이 더 커진다는 것을 확인할 수 있다. 해당 데이터의 직관적인 비교 및 분석을 위한 곡선맞춤(curve fitting) 작업은 3.4절에 기술하였다.

3.1.2 일반도심지

그림 3.3은 일반도심 시뮬레이션 모델이다. 도심밀집지역과 같은 뮌헨을 모델링하였지만 도심밀집지역과 떨어진 외곽지역을 기준을 대상으로 하였다. 일반도심지역의 환경은 주변 건물들의 높이가 더 낮으며 밀집도가 떨어진다. 또한 송신안테나와 수신안테나의 위치와 경로가 도심밀집지역과는 다른 곳에 위치한다. 단, 사용한 안테나의 종류와 이득은 도심밀집지 환경 시뮬레이션의 조건들과 동일하다. 송신안테나와 수신안테나 모두 등방성 안테나이며 각각 지면으로부터 10m, 1.5m 높이에 위

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

치한다. 마찬가지로 LOS 환경에서 송신안테나로부터 900m 지점까지의 수신 전력을 확인하고 경로손실을 계산했다.

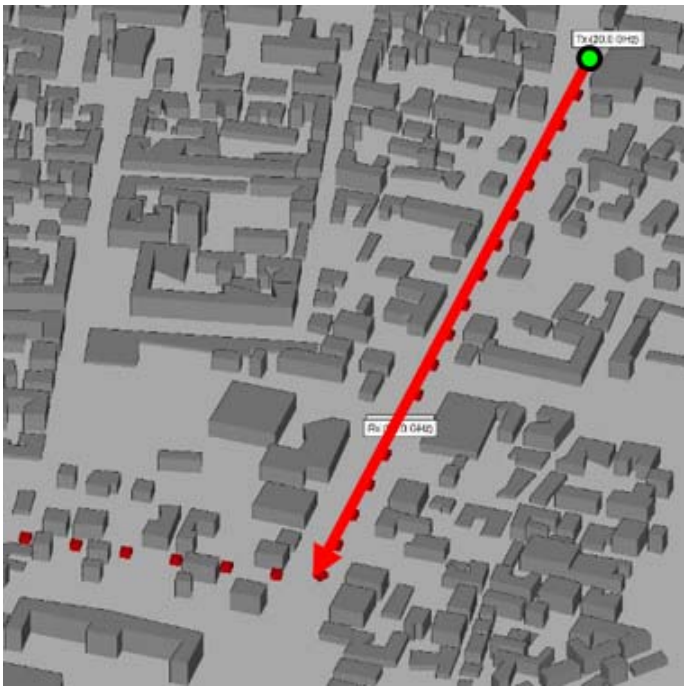

그림 3.3 일반도심지역 시뮬레이션 모델

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

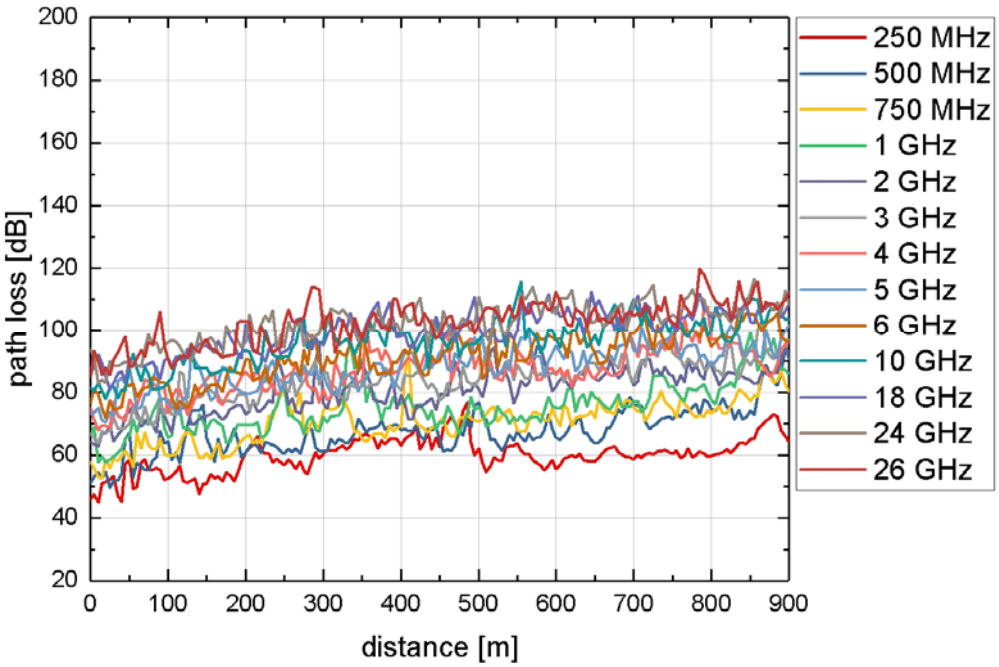

그림 3.4 일반도심지역 시뮬레이션 결과

그림 3.4는 일반도심지역의 경로손실 값이다. 일반도심 환경의 경로손실은 도심밀집지역과 비교하여 더 낮은 경로손실을 가진다. 그리고 전체적인 감쇄 비율도 낮다. 이는 일반도심이 도심밀집지역에 비해 상대적으로 주변 구조물들의 수가 적고 건물들의 높이도 낮기 때문에 그에 따른 반사나 회절, 산란으로 인한 영향들이 감소하여 발생한 현상으로 보인다.

3.1.3 개활지

개활지 환경에서의 경로손실을 확인하기 위하여 벽면 반사가 없는 큰 도로를 모델로 시뮬레이션을 진행하였다. 실제 환경과 비교하면 넓은 평지 혹은 활주로가 이와 동일한 조건일 것이다.

그림 3.5는 개활지 시뮬레이션 환경을 보여준다. 넓은 도로에 송신안테나가 고정된 상태로 위치하며 표시된 경로를 따라서 수신안테나가 존재한다. 이때의 바닥면의 재질은 콘크리트이다. 송신안테나와 수신안테나는 등방성 안테나이며 각각 10m, 1.5m의 높이에 위치한다. 송신안테나와 수신안테나 간의 최대 거리는 5km이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

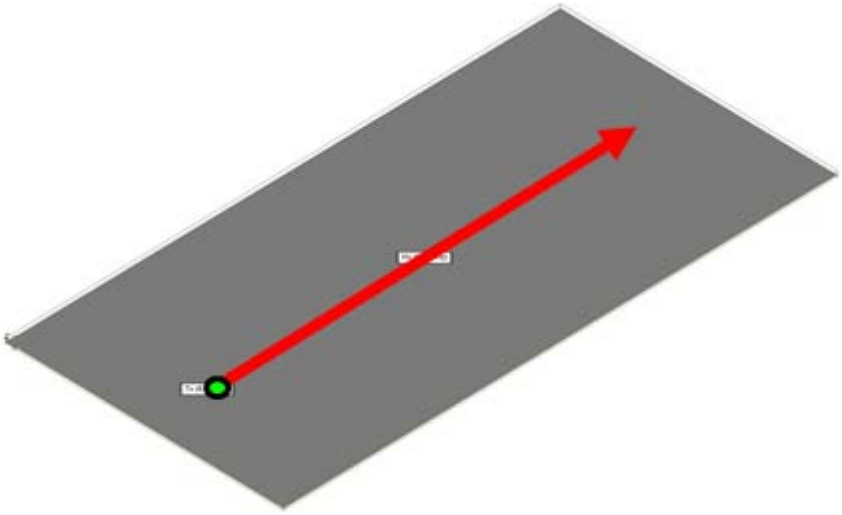

그림 3.5 개활지 시뮬레이션 환경

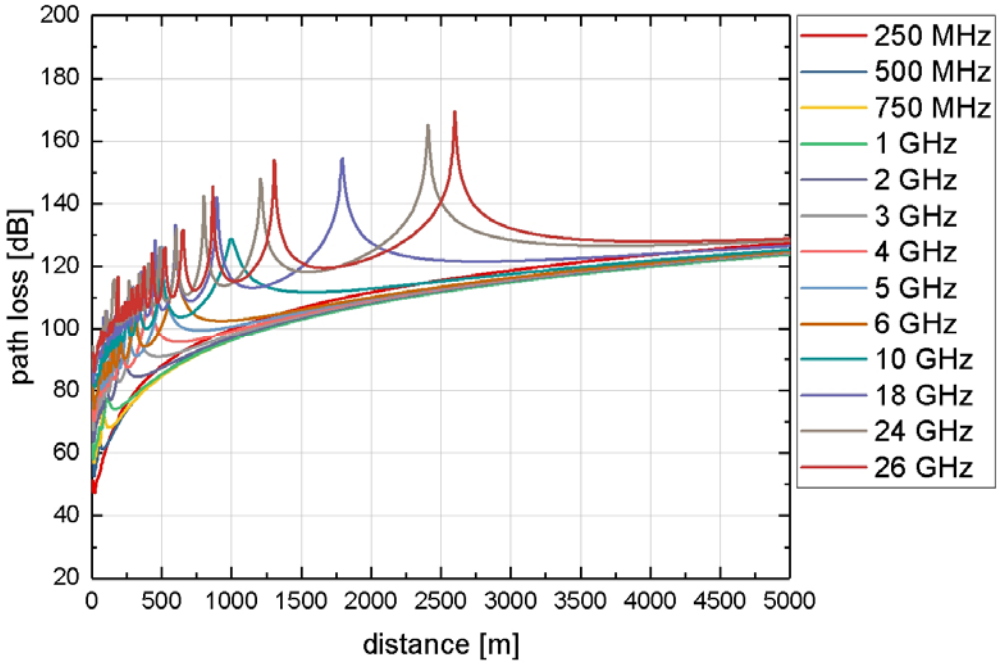

그림 3.6 개활지 시뮬레이션 결과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3.6에서 개활지 환경에서의 경로손실 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 본 시뮬레이션의 결과는 도심밀집지역이나 일반도심지역의 시뮬레이션 결과와 달리, 각 주파수별로 뚜렷한 패턴을 보여준다. 모든 주파수에서 지면 반사로 인한 리플(ripple)이 존재하고 그 패턴이 주파수별로 일정 비율로 나타난다.

3.2 개활지에서 지형 재질에 따른 경로손실

지형 구조의 차이 외에 지형의 재질에 따른 경로손실을 확인하기 위하여 개활지 환경을 기준으로 지형 재질을 변화시켜 시뮬레이션을 진행하였다. 확인한 재질은 PEC이다. 시뮬레이션은 3.1.3의 개활지 환경과 동일한 환경에서 진행되었고 지형 재질의 차이만 존재한다. 즉, 그림 3.5와 같은 시뮬레이션 구조로 바닥면의 재질을 콘크리트에서 PEC로 변경하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3.7은 본 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다.

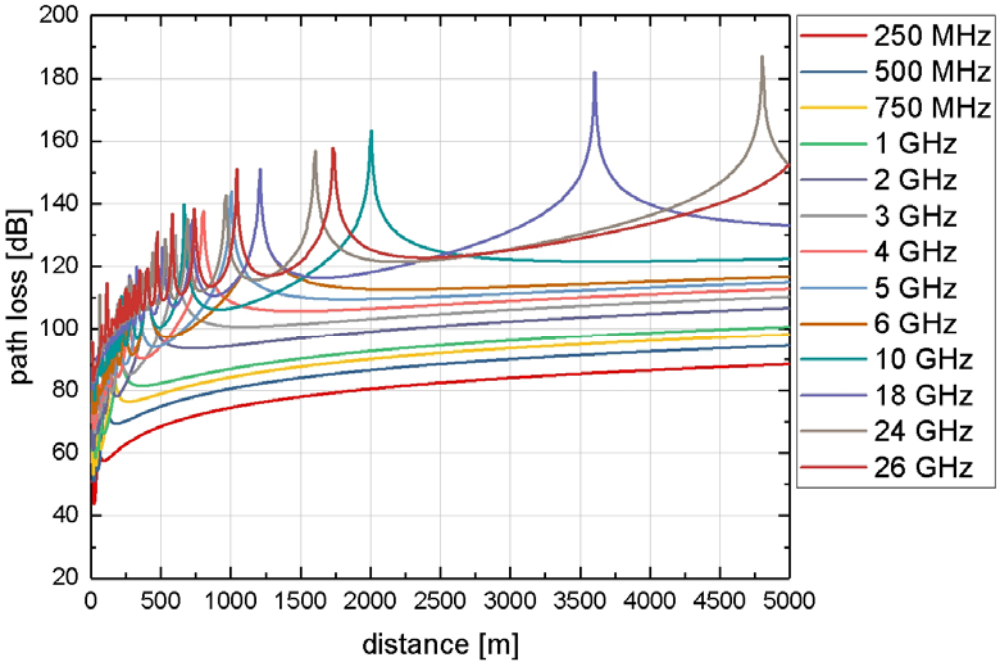

그림 3.7 개활지에서 지형 재질이 PEC인 경우 경로손실 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과를 살펴보면 각 주파수들의 경로손실 값이 거리가 멀어져도 수렴

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하지 않고 일정한 차이를 가지는 것을 알 수 있다. 일례로 250㎒와 500㎒의 경로손실 차는 1000m 지점과 5000m 지점에서 비슷한 값을 가진다. 이 현상은 다른 모든 주파수에도 해당되는 내용이다. 반면, 지형 재질이 콘크리트인 경우 5000m 지점 부근에서 주파수와 무관하게 경로손실 값이 어느 한 값에 수렴해가는 형태를 보이고 있다.

3.3 개활지에서 송신안테나 높이에 따른 경로손실

본 절에서는 송신안테나의 높이와 경로손실 간의 관계를 확인하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 이번 시뮬레이션도 개활지 환경을 기준으로 설정하였기에 그림 3.5와 같은 시뮬레이션 모델을 사용하였다. 지면은 콘크리트이며 송신안테나와 수신안테나는 모두 이득이 0dBi인 등방성 안테나이다. 해당 조건에서 송신안테나의 높이를 10m에서 15m와 20m로 변화시키며 경로손실을 확인하였다. 이때의 수신안테나는 지면으로부터 1.5m 높이에 위치한다.

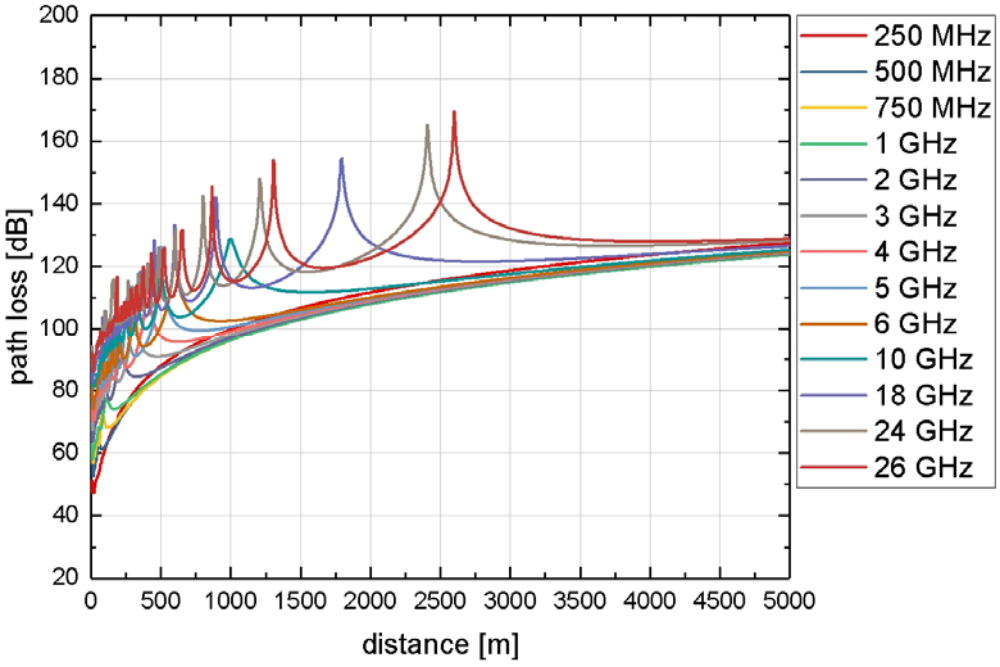

그림 3.8 개활지에서 송신안테나 높이가 10m인 경우의 경로손실

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3.8은 개활지에서 송신안테나의 높이가 10m인 경우의 경로손실을 도시한 그래프이다. 그림 3.6과 동일한 것으로 본 절의 다른 시뮬레이션 결과들과 좀 더 수월하게 비교하기 위하여 추가하였다.

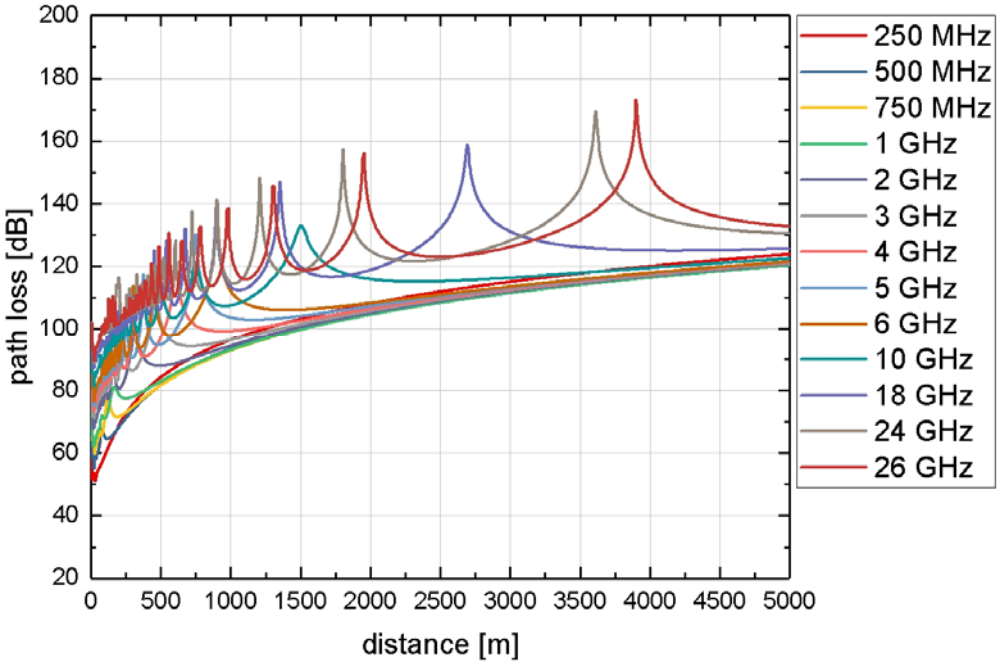

그림 3.9 개활지에서 송신안테나 높이가 15m인 경우의 경로손실

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

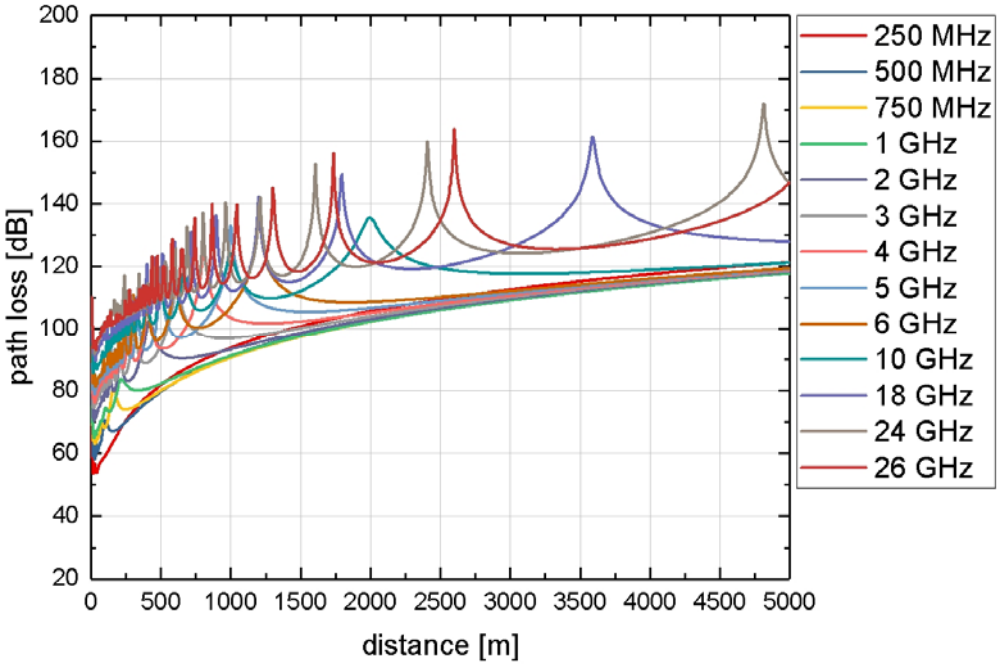

그림 3.10 개활지에서 송신안테나 높이가 20m인 경우의 경로손실

그림 3.9와 3.10은 각각 송신안테나의 높이가 15m인 경우와 20m인 경우의 경로손실 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다. 송신안테나 높이가 10m인 그림 3.8의 결과까지 모두 비교한 결과, 가장 큰 차이는 지면 반사로 인해 발생하는 리플이 어느 지점까지 존재하는가이다. 그림 3.8의 송신안테나의 높이가 10m인 조건에서 가장 높은 주파수인 26㎓의 경우 송신안테나와 수신안테나 간의 거리가 2,700m 부근 지점까지 리플이 존재한다. 반면에 그림 3.9의 송신안테나의 높이가 15m인 조건에서는 26㎓의 경우 4,000m 부근 지점에서 마지막 리플을 확인할 수 있다. 그림 3.10의 송신안테나의 높이가 20m인 조건에서는 동일한 26㎓를 기준으로 송수신 안테나 간 거리가 5,000m 이하일 때는 마지막 리플이 어느 지점에 존재하는지 확인할 수 없다.

리플이 생기는 지점 외에도 경로손실 값 자체에도 차이가 존재한다. 송신안테나가 지면으로부터 10m 위치에 위치할 때 각 주파수들의 경로손실이 100dB가 되는 지점은 1,100m 부근이다. 반면에 송신안테나가 지면으로부터 20m에 위치한 경우에는 100dB가 되는 지점이 약 1,700m 부근이라는 차이가 존재한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.4 전파통달거리 비교 분석

본 절에서는 지금까지 진행한 경로손실 시뮬레이션의 결과들을 비교표를 만들어 비교 분석했다. 결과 비교에는 시뮬레이션 외에도 경로손실 측정 데이터를 추가로 활용하였다. 해당 측정 결과는 기존에 존재하는 측정 데이터로, 2017년도에 광주 상무지구와 나주 혁신도시에서 진행한 실험을 통해 확보한 결과이다. 표 3.1의 전파환경 분류체계를 적용하여 광주 상무지구는 도심밀집지로 분류하고 나주 혁신도시는 일반도심지역으로 분류하였다.

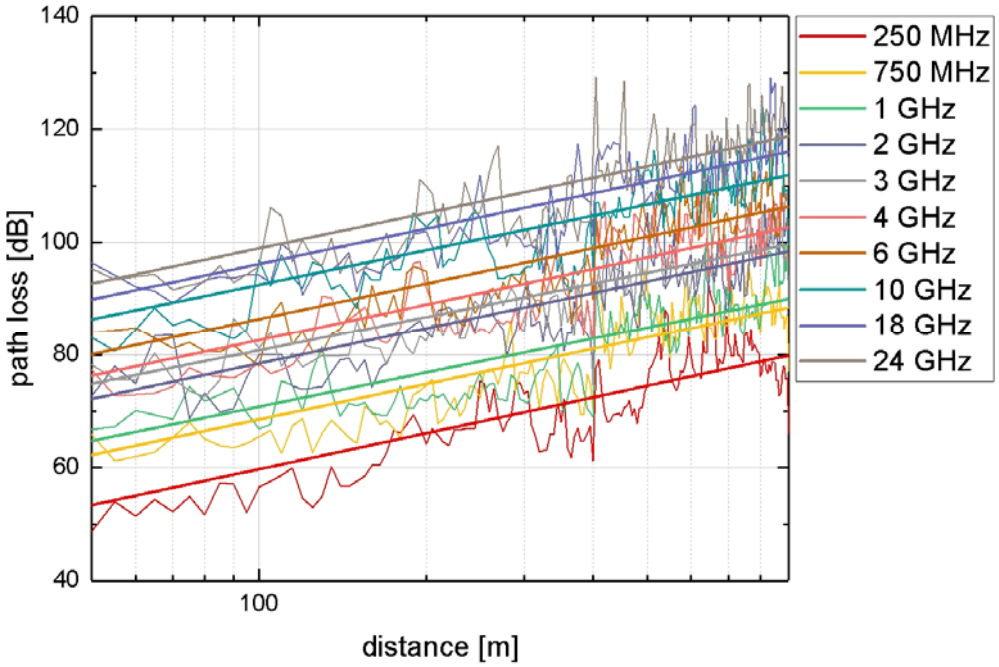

그림 3.11 도심밀집지역 시뮬레이션 결과 곡선맞춤

그림 3.11은 3.1.1의 그림 3.2 도심밀집지역 시뮬레이션 결과를 곡선맞춤을 적용한 그래프이다. 기존의 측정 데이터들과 비교를 수월하게하기 위해서 그림 3.11부터 그림 3.14까지 모든 그래프의 x축을 로그 스케일(log scale)로 조정하였고 최대 900m까지 도시하였다. y축의 경로손실 스케일도 40에서 140까지로 전부 일치시켰다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

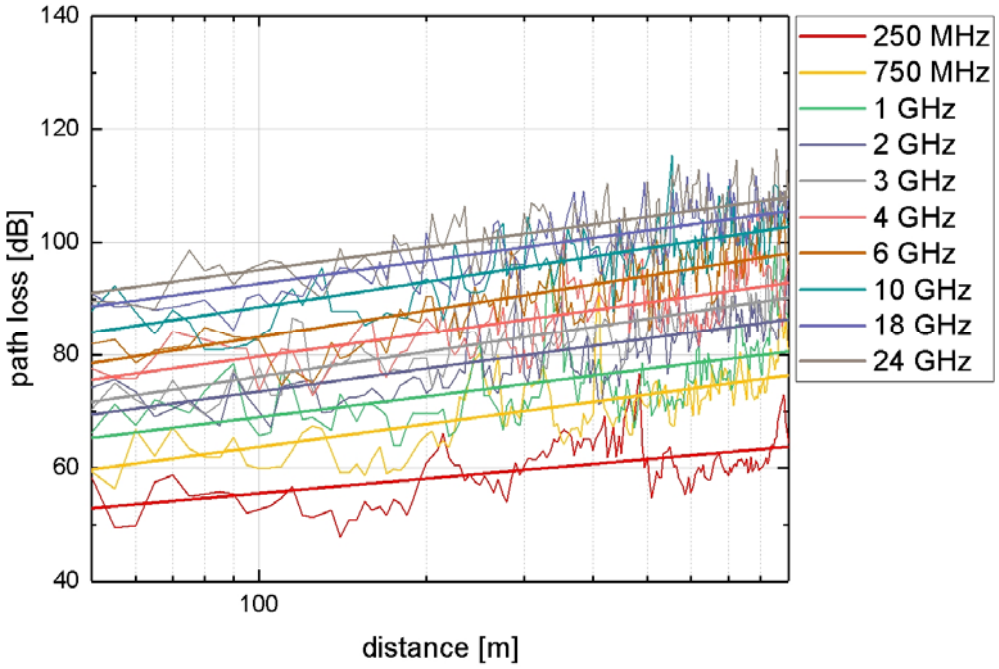

그림 3.12 일반도심지역 시뮬레이션 결과 곡선맞춤

그림 3.12는 3.1.2의 그림 3.4 일반도심지역 시뮬레이션 결과에 곡선맞춤을 적용한 그래프이다. 그림 3.11의 도심밀집지역 시뮬레이션 결과와 비교해보면 확실하게 기울기의 차이가 존재한다는 것을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

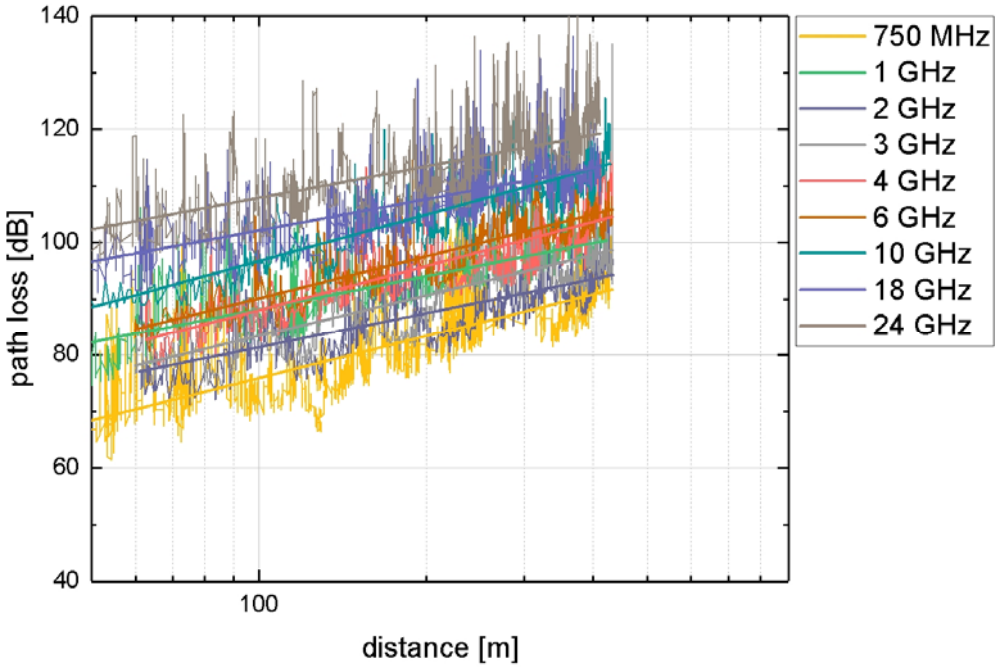

그림 3.13 광주 상무지구에서 측정한 경로손실

그림 3.13은 광주 상무지구 측정을 통해 확인한 경로손실 값이다. 측정에 사용한 안테나는 송신안테나와 수신안테나 모두 다이폴 안테나이다. 송신안테나는 차량에 마스트를 세워 지면으로부터 10m 지점에 위치하도록 고정시켰고 수신안테나는 이동형 카트에 고정하여 지면으로부터 1.5m인 지점에 위치하도록 하였다. 송신안테나가 설치된 차량을 도로에 정차시키고 이동형 카트를 움직이며 측정을 진행하였다. 수신안테나는 송신안테나와 LOS 경로를 가지며, 도로 위를 이동하며 각 지점별 수신 전력을 확인하고 이를 통해 경로손실을 계산했다. 그래프의 x축은 송신안테나와 수신안테나 간의 거리를 로그 스케일로 설정한 것이고 y축은 경로손실을 나타내고 있다. 각 주파수별 경로손실을 한눈에 확인하기는 어렵지만 곡선맞춤을 통해 기울기를 비교하면 주파수가 높을수록 경로손실이 커진다는 것을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

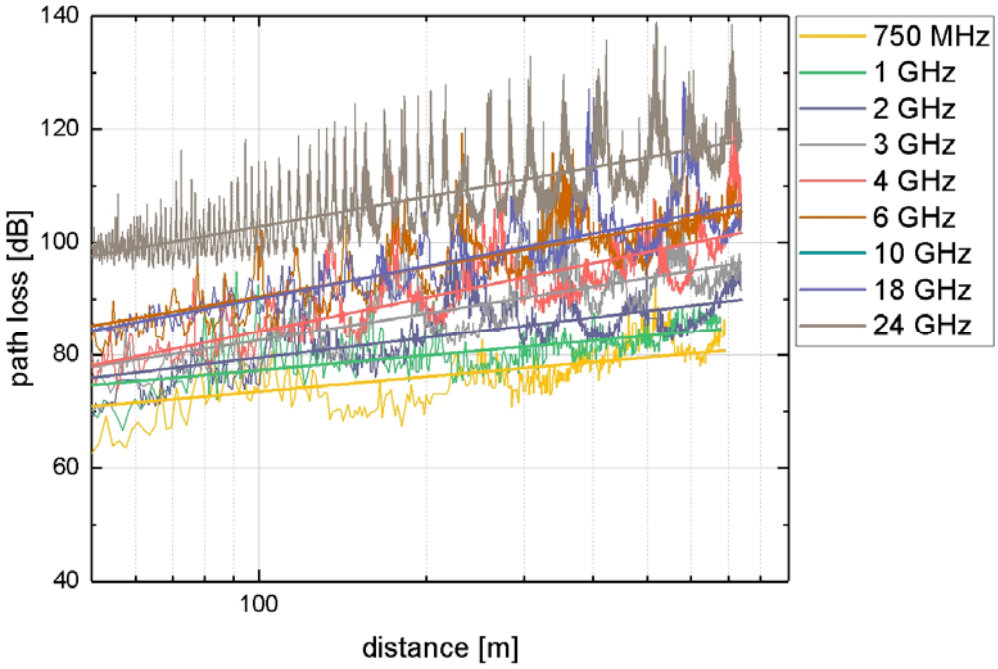

그림 3.14 나주 혁신도시에서 측정한 경로손실

그림 3.14는 나주 혁신도시 측정을 통해 확인한 경로손실 값이다. 광주 상무지구 측정과 환경만 달라졌을 뿐 그 외의 조건들은 동일하다. 측정에 사용한 안테나는 송신안테나와 수신안테나 모두 다이폴 안테나이며, 마찬가지로 송신안테나는 차량에 마스트를 세워 지면으로부터 10m 지점에 위치하도록 고정시켰고 수신안테나는 이동형 카트에 고정하여 지면으로부터 1.5m인 지점에 위치하도록 하였다. 수신안테나가 고정된 카트는 송신안테나와 LOS 경로를 가진 도로에서 이동하였으며 각 지점별 수신 전력을 확인하고 이를 통해 경로손실을 계산했다.

시뮬레이션의 경우 도심밀집지역과 일반도심지역의 시뮬레이션 결과에서 그 차이가 선명하게 나타난다. 그림 3.11에서 확인할 수 있는 도심밀집지역의 각 주파수별 경로손실 기울기는 그림 3.12의 일반도심지역 주파수별 기울기보다 값이 더 크고 가파르다. 기울기 외에 경로손실 값 자체도 도심밀집지역이 일반도심지역보다 훨씬 큰 경로손실을 가진다.

반면에 그림 3.13와 그림 3.14의 광주 상무지구와 나주 혁신도시를 비교한 결과, 각 주파수별 기울기가 유사한 부분들도 존재하지만 완전히 일치하지는 않는다. 기울기의 차이 역시 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이러한 현상은 시뮬레이션과 측정 환

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경의 차이에 의해 나타난 것으로 해석할 수 있다. 전파환경 분류체계를 활용하여 동일한 조건으로 설정했더라도 시뮬레이션의 경우에는 기존에 모델링 되어 있던 독일의 뮌헨을 대상으로 진행하였고 건물과 지면 재질 외에는 다른 지형조건을 고려하지 않았다. 하지만 기존 측정 데이터의 광주 상무지구와 나주 혁신도시는 주변에 존재하는 여러 지형 조건들의 영향을 많이 받았을 것이다. 대표적으로 가로수와 차량 및 사람들의 이동 순간을 예로 들 수 있다.

그래프에 도시된 결과들을 비교하기 위해서 시뮬레이션과 측정 결과들을 활용하여 전파통달거리를 산출할 수 있도록 비교표를 만들었다. 표 3.2와 표 3.3은 각각 환경별 시뮬레이션 결과를 통해 산출한 전파통달거리 비교표와 측정 데이터를 통해 산출한 전파통달거리 비교표이다. 전파통달거리의 기준은 2장에서 언급한 85dBm을 기준으로 설정하였다.

표 3.2 환경별 시뮬레이션 결과를 통해 산출한 전파통달거리 비교표

주파수 [㎓]	도심밀집지 [m]	비율	일반도심지 [m]	비율
0.25	1,573	3.10	25,572	12.39
0.75	614	1.21	3,054	1.48
1	506	1.00	2,063	1.00
2	255	0.50	963	0.46
3	163	0.32	548	0.26
4	129	0.25	442	0.21
6	85	0.16	280	0.13
10	42	0.08	158	0.07
18	29	0.05	76	0.04
24	21	0.04	67	0.03

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3.3 측정 데이터를 통해 산출한 전파통달거리 비교표

주파수 [㎓]	광주 상무지구 [m]	비율	나주 혁신도시 [m]	비율
0.25	-	-	-	-
0.75	1,705	1.30	4,380	1.17
1	1,315	1.00	3,755	1.00
2	840	0.64	1,920	0.51
3	495	0.38	1,250	0.33
4	290	0.22	610	0.16
6	255	0.19	360	0.10
10	165	0.13	335	0.09
18	135	0.10	170	0.05
24	50	0.04	70	0.02

전파환경 분류체계를 따라서 도심밀집지역의 전파통달거리는 광주 상무지구의 전파통달거리와 비교하고 일반도심지역의 전파통달거리는 나주 혁신도시의 전파통달거리와 비교하면 유사한 경향을 확인할 수 있다. 전파통달거리 외에 각 주파수들의 통달거리 비율을 계산하고 이를 비교해보면 환경 조건들과 관계없이 모든 주파수별 통달거리의 비율이 유사하다는 것을 알 수 있다. 이 때, 비율을 구하기 위한 기준으로 선정한 주파수는 1㎓이다. 도심밀집지역과 광주 상무지구의 전파통달거리 비율을 비교하고 일반도심지역과 나주 혁신도시의 전파통달거리 비율을 비교하면, 각 주파수들이 보여주는 통달거리의 비율이 상당히 유사하다는 점을 확인할 수 있다. 환경에 관계없이 비교하더라도 일반도심지의 250㎒를 제외하고 대부분이 일치한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3.4 송신안테나 높이에 따른 전파통달거리 비교표

주파수 [㎓]	송신안테나 높이에 따른 통달거리 [m]					
	10 m	비율	**15 m**	비율	**20 m**	비율
0.25	3,963	2.29	4,263	2.23	4,529	2.12
0.75	2,469	1.42	2,640	1.38	2,896	1.36
1	1,728	1.00	1,911	1.00	2,128	1.00
2	894	0.51	997	0.52	1,165	0.54
3	493	0.28	588	0.30	671	0.31
4	267	0.15	334	0.17	423	0.19
6	79	0.04	92	0.04	113	0.05
10	38	0.02	50	0.02	62	0.02
18	18	0.01	29	0.01	34	0.01
24	10	0.01	16	0.01	19	0.01

이번에는 송신안테나 높이에 따른 경로손실 시뮬레이션 결과와 지형 재질에 따른 경로손실 시뮬레이션 결과를 바탕으로 전파통달거리 비교표를 만들어 비교하였다. 표 3.4는 송신안테나 높이에 따른 전파통달거리 비교한 표이다. 해당 결과의 가장 특징은 송신안테나의 높이가 달라져도 주파수끼리의 통달거리 비율이 상당부분 일치한다는 점이다. 250㎒에서 아주 약간의 차이만 존재하고 다른 주파수들은 오차범위 내에서 그 값이 변한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3.5 지형 재질에 따른 전파통달거리 비교표

주파수 [GHz]	Concrete [m]	비율	PEC [m]	비율
0.25	3,963	2.29	2766	1.92
0.75	2,469	1.42	1954	1.36
1	1,728	1.00	1437	1.00
2	894	0.51	714	0.49
3	493	0.28	397	0.27
4	267	0.15	-	-
6	79	0.04	-	-
10	38	0.02	-	-
18	18	0.01	-	-
24	10	0.01	-	-

표 3.5는 지형 재질에 따른 전파통달거리 비교표이다. 개활지에서 지면의 재질이 콘크리트와 PEC인 상태에서 진행한 시뮬레이션 결과를 정리한 것으로 그림 3.7을 활용하였다. 지면 재질이 PEC인 상태에서는 곡선맞춤을 적용할 경우, 4GHz 이상 대역부터는 경로 손실이 85dBm이 되는 거리가 -로 계산된다. 따라서 다른 비교표들과 똑같은 형태로 비교할 수 없었다. 곡선맞춤을 적용하여 그래프를 확인하면 4GHz 이상의 주파수들은 시작 지점부터 경로손실이 85dBm보다 크기 때문에 이러한 현상이 발생한 것으로 추정된다. 확인할 수 있는 3GHz 이하 데이터를 비교하면 지형 재질의 변화를 주어도 비율 주파수들 간 전파통달거리 비율에는 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 결 론

본 논문에서는 안테나 높이와 지형 재질의 변화에 따른 주파수별 경로손실을 활용하여 전파통달거리를 구하고 비교했다. 그리고 전파환경 분류체계에 따른 각 환경별 경로손실 시뮬레이션을 진행한 뒤, 기존에 존재하는 측정 데이터와 비교하였다. 100㎒-26㎓ 대역에서 전파통달거리를 구하고 통달거리에 대해 절대값과 비율에 따라서 비교 및 분석하였다.

전파통달거리를 산출하기 위해 전파모델을 이용하였다. 결정론적 전파모델 시뮬레이션과 경험론적 전파모델을 포함한 측정 데이터들을 활용하였고 그 결과들을 안테나 높이와 지형 재질 그리고 환경에 따라 분류하였다.

안테나의 높이에 따른 경로손실은 개활지 환경에서 송신안테나의 높이가 지면으로부터 10m인 상태를 기준으로 15m와 20m로 변경해가며 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 지면 반사로 인해 생기는 리플이 송신안테나의 높이가 높아질수록 더 먼 지점까지 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 주파수에 상관없이 전체적인 경로손실이 증가하는 경향을 보였다.

지형의 재질에 따른 경로손실도 마찬가지로 개활지 환경에서 진행한 경로손실 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 개활지 환경에서 진행한 시뮬레이션은 모두 지형 재질을 콘크리트로 설정하여 진행했었지만 재질에 따른 변화를 확인하기 위해서 지형 재질을 PEC로 변경하여 시뮬레이션을 진행하였다. 개활지의 지면이 콘크리트와 PEC인 경우의 가장 큰 차이점은 콘크리트인 경우 거리가 멀어질수록 경로손실 값이 어느 한 지점에 수렴하는 형태를 보이는 반면, 지면이 PEC인 경우는 각 주파수들의 경로손실 값이 거리가 멀어져도 수렴하지 않고 일정한 차이를 유지한다는 점이다. 이 현상은 다른 모든 주파수에 해당되는 내용이다.

전파환경 분류체계를 통해 도심밀집지, 일반도심지, 개활지로 분류하여 진행한 시뮬레이션은 측정 데이터와 함께 비교하여 분석했다. 시뮬레이션과 측정 결과들로 알 수 있는 점은 주변 지형 환경에 의한 반사나 회절로 인해서 특징을 한 번에 확인하기 힘들지만, 곡선맞춤을 통해 얻은 기울기를 비교해보면 결과가 비슷하다는 점이다. 일례로 도심밀집지역과 일반도심지역의 시뮬레이션 결과에서 경로손실의 기울기는 일정한 주파수별로 일정한 비율을 가지고 있으며 도심밀집지역의 경로손실 기울기가 일반도심지역의 경로손실 기울기보다 더 가파르고 크다는 것을 확인할

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수 있다. 측정 결과에서는 차이가 조금 줄어들지만 이는 측정 당시의 환경이나 변수로 인한 수준이다.

마지막으로 결정론적 전파모델을 통한 시뮬레이션과 경험론적 전파모델을 전파통달거리라는 기준으로 환경과 주파수별로 비교하였다. 결과적으로 어느 모델을 적용하더라도 각 주파수별로 가지고 있는 고유한 특성은 동일하다는 것과 파라미터들의 변화와 측정 환경의 차이에도 그 특성은 유지된다는 것을 알 수 있었다. 향후 이 논문의 결과와 더불어 더 높은 주파수에 대한 특성 분석이 이루어진다면 주파수의 공학적인 가치를 산정하거나 평가하는 기준에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 단, 측정을 통해 여러 지형 및 환경별 데이터를 확보하는 연구와 병행되어야 할 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

[1] Ofcom, “Spectrum Pricing: A consultation on proposals for setting wireless Telegraphy act licence fees,” 29. Sep. 2004.

[2] Ofcom, “Spectrum Pricing: A statement on proposals for setting Wireless Telegraphy Act licence fees,” 23. Feb. 2004

[3] Ofcom, “Fixed Service Unit-Fixed Link Licence Fee Algorithm in Force from 2nd June 2005,” Apr. 2005.

[4] 이윤경, 안형택, 김문성, 김준규, “전파관리제도 및 주파수 가치산정에 관한 연구,” 방송위원회, Dec. 2006.

[5] 이일규, 심용섭, 조인경, 이찬희, “국내 전파관리제도 개선방안 연구,” 국립전파연구원, Nov. 2011.

[6] 김태한, 장재혁, “전파이용 고도화에 따른 전파관리비용 개선방안 연구,” 한국전자통신연구원, Dec. 2014.

[7] 박상혁, “무인항공기의 무선통신 체계 연구,” 학위논문, 인하대학교

[8] B. Sklar, and D. S. Domain, “Rayleigh Fading Channels.” Mobile Communications Handbook (Ed. SS Suthersan). CRC Press, 1999.

[9] A. J. Lopez-Barrantes, O. Gutierrez, F. Saez, and R. Kronberger, “Comparison of Empirical Models and Deterministic Models for the Analysis of Interference in Indoor Environments,” 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 509-512, 2012.

[10] D. A. McNamara, C. W. I. Pistotius, and J. A. G. Malherbe, “Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction,” Artech House Microwave Library, 1990.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[11] Recommendation ITU-R P.1546-5, "Method for Point-to-Area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz".

[12] A. F. Molisch, "Wireless Communications," John Wiley & Sons, 2011.

[13] L. Subrt, and P. Pechac, "Semi-Deterministic Propagation Model for Subterranean Galleries and Tunnels," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 11, pp. 3701-3706, Nov. 2010.

[14] A. Goldsmith, "Wireless Communications," Cambride University Press, 2005.

[15] Colorado University Class Notes for TLEN-5510, "Wireless & Cellular Communications," Thomas Schwengler, Fall, 2006.

[16] Wireless Insite 2.8.0 Reference Manual.

[17] H. Ling, R. C. Chou, and S. W. Lee, "Shooting and Bouncing Rays: Calculating the RCS of an Arbitrarily Shaped Cavity," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 37, no. 2, pp. 194-205, Feb. 1989.

[18] 정현규, "IMT-Advanced 이동통신 무선채널," TTA Journal, no. 119, pp. 119-126, Oct. 2008.

[19] COST Action 231, "Digital Mobile Radio towards Future Generation Systems," Final report, European Commission, EUR 18957, 1999.

[20] D. S. Baum, J. Hansen, and J. Salo, "An Interim Channel Model for Beyond-3G Systems - Extending the 3GPP Spatial Channel Model (SCM)," IEEE Vehicular Technology Conference 2005, pp. 3132-3136, 2005.

[21] M. Narandzic, "Comparison of SCM, SCME, and WINNER Channel Models," IEEE Vehicular Technology Conference 2007, pp. 413-417, 2007.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[22] ITU-R P.1411, “Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz”.

[23] ITU-R P.1058, “Digital topogaraphic databases for propagation studies”.

[24] 박덕규, “주파수 이용현황 및 활용방안연구,” 연구보고서, 국립전파연구원, 2011.

[25] ITU-R F.1096, “METHOD OF CALCULATING LINE-OF-SIGHT INTERFERENCE INTO RADIO RELAY SYSTEMS TO ACCOUNT FOR TERRAIN SCATTERING”.

[26] ITU-R P.833, “Attenuation in vegetation”.

[27] A. K. Shukla, A. Seville, D. Ndzi, J. Ritcher, and D. Eden, “Description of a Generic Vegetation Attenuation Model for 1-60 GHz,” COST Action 280, 1st International Workshop, Jul. 2002.

[28] J. D. Parsons, “The Mobile Radio Propagation Channel,” 2nd ed., John Wiley & Sons, 2000.

[29] C. Akkash, “Methods for Path loss prediction,” Vaxjo University, 2009.

[30] 김유미, 이일근, 배석희, “ITU-R 전파전파 알고리즘 재분석을 통한 국내 환경에 적합한 전파관리시스템 기능 개선 연구,” 한국전자파학회 논문지, 제14권, 제1호, pp. 33-40, Jan. 2013.

[31] J. D. Jackson, “Classical Electrodynamics,” 3rd ed., John Wiley & Sons, 1999.

[32] H. Zhao, “28 GHz Millimeter Wave Cellular Communication Measurements for Reflection and Penetration Loss in and around Buildings in New York City,” 2013 IEEE International Conference on Communications(ICC), pp. 5163-5167, 2013.

[33] O. Landron, M. J. Feuerstein, and T. S. Rappaport, “A Comparison of Theoretical and Empirical Reflection Coefficients for Typical Exterior Wall

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Surfaces in a Mobile Radio Environment," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, no. 3, pp. 194-205, Mar. 1996.

[34] C. Jansen, R. Piesiewicz, D. Mittleman, T. Kurner, and M. Koch, "The Impact of Reflections From Stratified Building Materials on the Wave Propagation in Future Indoor Terahertz Communication Systems," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 5, pp. 1413-1419, May 2008.

[35] D. M. Pozar, "Microwave Engineering," 3rd ed., John Wiley & Sons, 2005.

[36] M. H. Hashim and S. Stavrou, "Measurements and modelling of wind influence on radiowave propagation through vegetation," IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005.

[37] COST 231, "DIGITAL MOBILE RADIO TOWARDS FUTURE GENERATION SYSTEMS".

[38] Y. P. Zhang, and Y. Hwang, "Miasurements of the Characteristics of Indoor Penetration Loss," IEEE Vehicular Technology Conference, 1994.

[39] COST 255, Part 4, "Terrain and Clutter Effects. Mobile Modelling".

[40] ITU-R P.527, "ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF THE EARTH".

[41] ITU-R P.1238, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz".

[42] J. Lu, D. Steinbach, P. Cabrol, P. Pietraski, and R. V. Pragada, "Determination of propagation mechanisms using wideband measurement techniques," Progress In Electromagnetics Research 20, 1998.

[43] J. Lu, D. Steinbach, P. Cabrol, P. Pietraski, and R. V. Pragada, "Propagation

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

characterization of an office building in the 60 GHz band," The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), 2014.

[44] I. Rodriguez, H. C. Nguyen, T. B. Sorensen, J. Elling, J. A. Holm, P. Mogensen, and B. Vejlgaard, "Analysis of 38 GHz mmWave Propagation Characteristics of Urban Scenarios." 21th European Wireless Conference, 2015.

[45] M. Jacob, S. Priebe, R. Dickhoff, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader, and T. Kurner, "Diraction in mm and Sub-mm Wave Indoor Propagation Channels," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 3, 2012.

[46] D. B. Faria, "Modeling signal attenuation in ieee 802.11 wireless lans-vol. 1," Computer Science Department, Stanford University, 2005.

[47] T. S. Rappaport, and S. Deng, "73 GHz Wideband Millimeter-Wave Foliage and Ground Reflection Measurements and Models," 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop(ICCW), pp. 1238-1243, 2015.

[48] R. J. Weiler, M. Peter, W. Keusgen, A. Kortke, and M. Wisotzki, "Millimeter-Wave Channel Sounding of Outdoor Ground Reflections," 2015 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), pp. 95-97, 2015.

[49] Y. Singh, "Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength," International Journal of Computer Applications, vol. 59, no.11, pp. 37-41, Dec. 2012.

[50] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services," IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-29, pp. 317-325, Aug. 1980.

[51] H. Fielitz, K. A. Remley, C. L. Holloway, Q. Zhang, Q. Wu, and D. W. Matolak, "Reverberation-Chamber Test Environment for Outdoor Urban Wireless Propagation Studies," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 9, pp. 52-56, 2010.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[52] E. Plouhinec, and B. Uguen, "Validity of Geometrical Optics Multiple Reflections inside Materials with Far-Receiver and Rays Infinity Assumptions," 2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), pp. 561-564, 2010.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

연 구 실 적

International journal

[1] Soon-Soo Oh, Jae-Won Choi, and Woo-Ki Park, "Low-cost feeding antenna using a shorted patch and rectangular waveguide," Electronics Letters, vol. 52, no. 16, pp. 1362-1364, Aug. 2016.

[2] Jae-Won Choi, and Soon-Soo Oh, "Design of a circular array antenna for generating waves with orbital angular momentum," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 59, no. 9, pp. 2246-2249, Sep. 2017.

International conference

[1] Jae-Won Choi, Dong-Woo Kim, Ju Yeon Hong, Wangjoo Lee, Woo-Jin Byun, Myung-Sun Song, and Soon-Soo Oh, "Design of Circular Array Antenna Generating Orbital Angular Momentum," 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Jun. 2016.

[2] Jae-Won Choi, Wook-Ki Park, Joy Moon, Jingeun Kim, and Soon-Soo Oh, "Design the X-band feeding antenna using a patch and rectangular waveguide," 2016 International Conference on Signal and Image Processing, Aug. 2016.

[3] Jae-Won Choi, Hwa Choon Lee, Young Chul Lee, Donggeun Choi, Sung Won Park, and Soon-Soo Oh, "Parameter analysis of propagation attenuation characteristics for 1-6㎓ in the open environment," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Jul. 2017.

Domestic conference

[1] 최재원, 고준희, 박욱기, 박종철, 오순수, "패치와 직사각형 도파관을 활용한 X-Band 피딩 안테나 설계 및 제작," 2015 한국전자파학회 하계종합학술대회, Aug. 2015.

[2] 최재원, 김영준, 정계택, 오순수, "정전용량 방식의 기저귀 알람 장치 연구," 2016 한국통신학회 동계종합학술발표회, Jan. 2016.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[3] **최재원**, 홍주연, 이왕주, 변우진, 송명선, 오순수, “배열 안테나를 활용한 OAM(Orbital Angular Momentum) 안테나 설계,” 2016 한국전자파학회 하계종합학술대회, Jun. 2016.

[4] **최재원**, 이화춘, 이영철, 최동근, 박성원, 오순수, “개활지 환경에서 1~6㎓ 대역 전파감쇠 특성의 파라미터 분석 연구,” 2016 한국전자파학회 종합학술대회, Dec. 2016.

[5] **최재원**, 이화춘, 최동근, 박금필, 박성원, 오순수, “6, 10, 18㎓ 대역의 도심 협곡 환경 전파모델 시뮬레이션,” 2017 한국전자파학회 하계종합학술대회, Aug. 2017.

Collection @ chosun