

# 초광대역 통신시스템의 통계학적 채널모델링

정희원 최진원\*, 강노경\*, 준희원 김정욱\*, 종신회원 김성철\*

## Statistical Characterization of UWB channel in Office Environments

Jinwon Choi\*, Noh-Gyoung Kang\* *Regular Members*,  
Jeong-Wook Kim\* *Associate Member*, Seong-Cheol Kim\* *Lifelong Member*

### 요약

본 논문에는 초광대역 통신시스템을 위한 주파수 영역의 통계학적 채널 모델을 서술하고 있다. 채널 모델링은 3개의 사무실 환경, 46개의 송, 수신 위치에서 얻어진 23,000개의 채널응답함수로 부터 얻어졌다. 측정실험을 통해 얻어진 데이터를 바탕으로 주파수 변화에 따른 경로감쇄지수 변화에 대해 서술한 후 전파환경과 가시경로의 존재여부에 따른 수신신호의 확률분포모델을 연구하였다. 마지막으로는 수신된 주파수 톤에 해당하는 수신파위의 표준편차와 같은 통계적 특성들을 고찰하였는데, 가시경로가 존재하는 경우에는 송, 수신기 사이의 거리가 멀어지면서 표준편차 값이 커지고 그에 따라 수신 주파수 톤의 파위가 평균 수신파위에서 일정한 범위 안에 들어올 확률이 떨어지는 것을 알 수 있었다.

**Key Words** : Ultra WideBand, Channel Modeling, Statistical Channel, Measurement and modeling

### I. 서론

근거리에서 높은 데이터 전송 속도로 통신을 할 수 있는 통신 시스템으로 초광대역(Ultra Wide Band, UWB) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 초광대역 통신기법은 중심주파수의 20% 이상의 주파수 대역을 이용하여 낮은 송, 수신 전력으로 통신을 하는 것을 기본 개념으로 삼고 있어 다른 통신 시스템과의 공존이 가능하기 때문에, 포화되어가는 주파수 대역에 대한 해결책으로 각광받고 있다. 특히 미 연방 통신 위원회(FCC)가 초광대역 통신을 위한 전송규정을 승인한 후에 상업적인 초광대역 시스템에 대한 논의가 매우 활발하게 이루어지고 있어 상용서비스의 시작이 가까워져 오고 있다.

하지만, 이런 초광대역 시스템의 효율적인 운용과 다른 통신 시스템과의 간섭 없는 공존을 위해서는 먼저 초광대역 통신 채널 특성을 정확히 이해하

는 것이 요구된다. 이러한 목적으로 발표된 문헌들은 IEEE 802.15에 제안된 표준 모델등에서 이미 다루고 있다<sup>2-7)</sup>. 그러나 초광대역 통신시스템의 가장 큰 특징인 광대역의 주파수 사용을 가장 잘 서술할 수 있는, 주파수 영역에서의 채널 특성화 작업은 아직 부족한 상태이다<sup>8,9)</sup>.

본 논문에는 사무실 환경에서 주파수 일소 측정 시스템(frequency sweep method)으로부터 얻은 측정 결과를 기반으로 하는 주파수 영역의 초광대역 채널을 연구결과를 담고 있다. 측정은 일정한 범위의 주파수 대역에 대하여 협대역의 주파수 신호를 이용하여 주파수 응답을 얻어내는 방식으로 진행되었으며 측정 환경으로는 많은 데이터가 빈번히 전송되고 여러 통신시스템이 공존하기 쉬운 사무실 환경을 선택하였다. 먼저 경로감쇄지수 값의 경향에 대하여 분석을 하였다. 여기에 사용된 경로감쇄지수는 로그-거리 경로감쇄 식의 주요한 매개변수 값을

※ 이 논문은 두뇌한국 21 사업과 대학 IT 연구센터 사업(ITRC)의 지원으로 수행되었다.

\* 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 전파 및 무선통신 연구실 ({caesar, peterpan, jwkim, sckim}@maxwell.snu.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-05-252, 접수일자 : 2006년 5월 31일, 최종논문접수일자 : 2006년 7월 10일

나타낸다. 측정 범위인 1.6GHz의 주파수대역에 해당하는 경로감쇄지수 값을 수신기 환경과 가지경로의 존재여부에 따라 500MHz 대역폭의 좁은 주파수 대역에 대한 경로감쇄지수 값의 변화하는 경향을 알아보았다. 그 다음으로는 각 수신기 조건에 따른 수신 신호 세기의 분포를 제시하며 마지막으로 수신된 협대역 주파수 신호의 수신 신호에 대한 통계학적 매개변수들에 대한 연구결과가 나타나있다. 연구된 통계학적 매개변수들은 수신된 협대역 주파수 신호들의 수신 파워들간의 표준편차와 수신 신호 파워가 수신 파워 평균값을 기준으로 특정한 범위에 있을 확률 그리고 수신 신호 세기 사이의 상관관계들이 나타나 있다.

## II. 측정 과정

### 2.1 측정 시스템

초광대역 채널 측정 방법 가운데, 이 연구에서는 주파수영역 채널 측정 시스템을 사용하였다<sup>[10]</sup>. 이 측정 방법은 회로망 분석기를 이용하여 넓은 주파수 대역을 협대역의 주파수 신호로 일소하는 방법으로 전 주파수 대역의 채널 응답 함수를 얻어내는 방식이다.

구성된 측정 시스템은 그림 1과 같다. 회로망 분석기는 5GHz에서 6.6GHz를 균일하게 2MHz간격으로 나눈 801개의 연속적인 주파수 톤을 전송하는 방식으로 2MHz의 주파수 간격은 최대 초과 지연이 500 ns인 다중경로를 얻는 것을 가능하게 하며 1.6GHz의 대역폭은 0.625 nano-seconds 의 시간 해상도를 갖게 한다. 송, 수신 안테나는 2.1dBi의 이득을 갖는 전방향성 안테나이고, 1.6m 삼각대 위에 설치하였다. 측정된 채널 응답함수의 예가 그림2에 나타나있다.

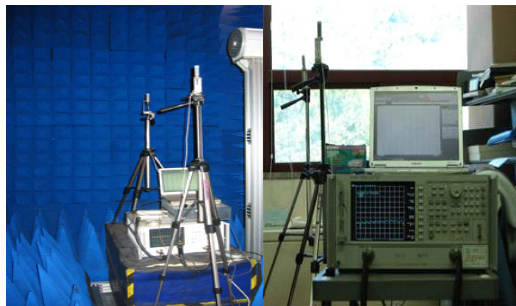


그림 1. (1) 무반향 실험실에서의 측정 시스템 (2) 실제 실험 환경에서의 측정 시스템

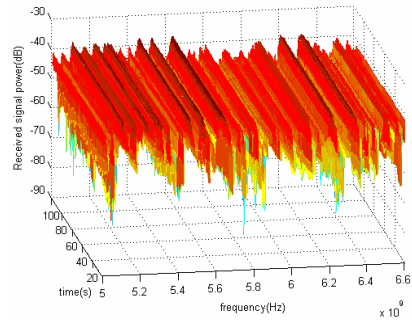
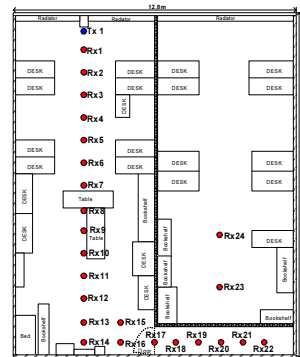


그림 2. 가지경로가 존재하는 수신 환경에서 100초 동안 측정된 채널 응답 함수

### 2.2 실험 개요

측정은 서울대학교의 서로 다른 3개의 사무실 환경에서 수행되었다. 송신 안테나와 수신 안테나의 위치와 사무실의 층과 벽 구조 및 재질은 그림 3에 나타나 있다. 사무실 1은 철근 콘크리트 건물의 5층에 위치하고, 사무실 2, 3은 다른 건물의 2층과 4층에 각각 위치한다. 사무실 1과 사무실 2의 내부에는 가운데의 금속 벽이 존재하여 사무실을 두 개의 실험실로 나누고 있으며, 사무실 3은 여러 개의 작은 사무실들과 복도로 구성되어 있다. 측정이 이루어지는 동안 측정환경의 모든 문은 열린 상태였으며, 보행자들에 의한 영향을 고려하지 않기 위하여 사람들의 통행은 제한하였다. 46개의 수신 위치 중에서 21개의 수신 위치는 송신기와 수신기 사이의 가지경로가 존재하는 경우(LOS)이고, 25개의 수신 위치는 가지경로가 존재하지 않는 경우(NLOS)였다. 각각의 수신 위치에서 5개의 부수신 지점에 대해 평균을 취했고, 각 수신 지점에서 100개의 주파수 응답을, 즉 하나의 수신 위치에서 500개의 주파수 응답을 얻었다. 연결되는 신호응답의 시간 간격은 1초로 이는 일반적으로 알려진 실내 환경에서의 최대 초과 지연 값보다 훨씬 크다<sup>[15, 16]</sup>.



(1) 사무실 1

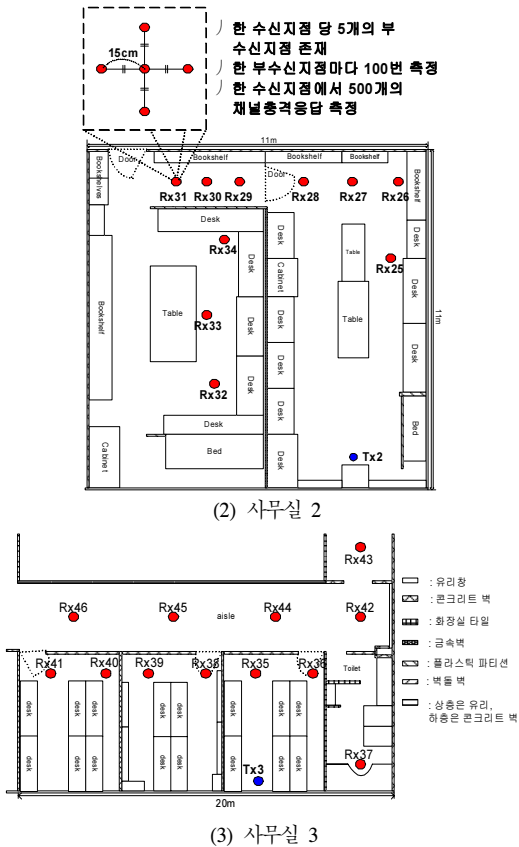


그림 3. 실험실측정이 이루어진 3 개의 사무실의 평면도 및 벽의 재질

III. 측정 결과 및 분석

3.1 경로감쇄지수변화

무선통신시스템을 설계하는데 있어서 송신신호의 전달 거리에 따른 수신 전력의 변화는 시스템의 운영범위를 계산하고 다른 시스템에 미치는 간섭 정도를 예측하는 가장 기본적인 요소이다. 로그-거리 경로감쇄 식은 이러한 수신 전력의 변화를 예측하는 데에 가장 널리 사용되는 식으로 (1)와 같이 표현된다.  $PL(d_0)$ 이 기준거리  $d_0(=1m)$ 에서의 경로감쇄,  $d$ 는 송신기와 수신기사이의 거리,  $n$ 은 경로감쇄지수,  $X_o$ 는 선택도형 팩터의 표준편차를 각각 의미한다.

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log(d/d_0) + X_o \quad (1)$$

측정된 데이터를 바탕으로, 최소 평균 제곱 오차 알고리즘(MMSE)을 이용하여 최적화된 매개 변수를 얻어내었고 표 1에 그 결과가 나타나있다.

표 1. 실험을 통해 얻어진 감쇄 매개변수 값들

|              | PL(d0) [dB] | n    | $X_o$ [dB] |
|--------------|-------------|------|------------|
| LOS (사무실 1)  | -35.596     | 1.58 | 1.063      |
| NLOS (사무실 1) | -35.596     | 2.13 | 2.656      |
| LOS (사무실 2)  | -37.913     | 1.32 | 1.101      |
| NLOS (사무실 2) | -37.913     | 2.10 | 4.546      |
| NLOS (사무실 3) | -43.786     | 2.85 | 4.441      |

n : 경로 감쇄 지수,  $X_o$  : 선택도형 팩터의 표준편차

일반적인 경우, 경로감쇄지수 값은 자유 공간에서 2이고, 도파관 효과가 나타나는 실내 가지경로 환경에서는 2보다 작게 되며 가지경로가 확보되지 못한 경우에는 2에서 3사이의 값을 가지게 된다<sup>[13]</sup>.

사무실 1과 사무실 2의 가지경로가 확보된 수신 위치의 경우, 사무실을 나누고 있는 중간의 금속 벽에 의해서 발생하는 도파관 효과로 인해 경로 손실 지수 값이 2보다 훨씬 작게 나왔다. 가지경로가 확보되지 못한 경우에도 신호가 회절현상을 통해 도달할 수 있는 경로가 확보되어 있었기 때문에 경로 감쇄지수 값이 일반 값보다는 작게 측정되었다.

선택도형 팩터의 표준편차는 가지경로가 존재하는 경우에는 약 1 dB 이고, 가지경로가 존재하지 않는 경우에는 2.5dB에서 4dB의 값으로 증가하였는데 이는 기존에 제시된 값들과 비슷하였다<sup>[9]</sup>.

그러나 미 연방 통신 위원회가 제안한 초광대역 통신 규정에 따르면, 대역폭을 500MHz이상 사용하는 모든 통신시스템은 초광대역 통신이라고 정의하고 있다. 그에 따라 MB-OFDM 같은 시스템은 초광대역 통신을 위한 주파수 대역을 약 500MHz 대역폭을 가지는 여러 개의 주파수 범위로 나누어 시스템 설계에 이용할 계획이다<sup>[14]</sup>.

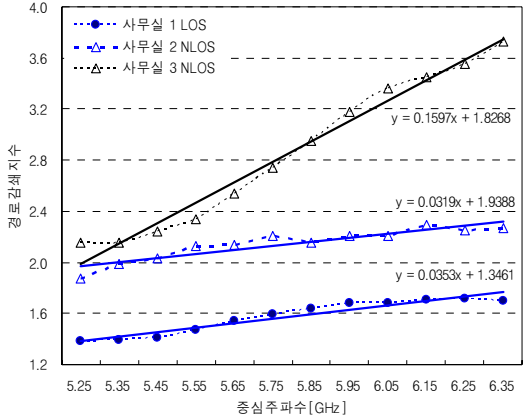


그림 4. 중심주파수 변화에 따른 경로감쇄지수의 변화 및 추세선

표 2. 경로감쇄지수의 정량적인 값

|              | n<br>(1.6GHz) | 최소값  | 최대값  | 추세선<br>기울기 |
|--------------|---------------|------|------|------------|
| LOS (사무실 1)  | 1.58          | 1.38 | 1.72 | 0.0353     |
| NLOS (사무실 1) | 2.13          | 1.87 | 2.29 | 0.0319     |
| LOS (사무실 2)  | 1.32          | 1.23 | 1.84 | 0.0587     |
| NLOS (사무실 2) | 2.10          | 1.96 | 2.35 | 0.0372     |
| NLOS (사무실 3) | 2.85          | 2.15 | 3.73 | 0.1597     |

따라서 본 실험에서는 측정 범위인 1.6GHz 대역 폭을 500MHz 대역폭을 가지는 12개의 좁은 대역으로 나누어 그 대역마다 산출되는 경로감쇄지수 값의 변화를 그림 4와 표 2에 나타내었다. 500MHz의 작은 주파수 대역은 중심주파수 기준으로 100MHz의 이산 간격으로 분할되어 있으며 그림4의 x축이 각 주파수 대역의 중심주파수를 나타내며 실선은 각 측정값들의 추세 선을 나타낸다. 그림 4와 표 2에 나타났듯이 주파수가 증가하면서 경로손실이 증가하여 그에 따른 경로상쇄지수의 값은 증가하였다. 주파수에 따른 경로상쇄지수의 변화는 가시경로가 확보되지 못한 사무실 3의 경우를 제외하고는 비슷했다. 가시경로나 회절경로가 확보되지 못한 곳에서는 초광대역 통신신호가 벽과 같은 건물구조물 투과하면서 주파수 특성을 심하게 겪는 것으로 보인다.

### 3.2 수신 신호 파워의 분포

초광대역 신호의 경로 감쇄 특성을 정확히 이해하기 위해서는, 거리에 따른 경로 손실 예측뿐 아니라 수신 신호의 분포 또한 분석되어야 한다. 그림 5는 가시경로가 있는 수신위치에서의 수신신호 누적 분포함수와 가시경로가 없는 수신위치에서의 수신신호의 누적분포함수를 비교하고 있다. 누적분포함수

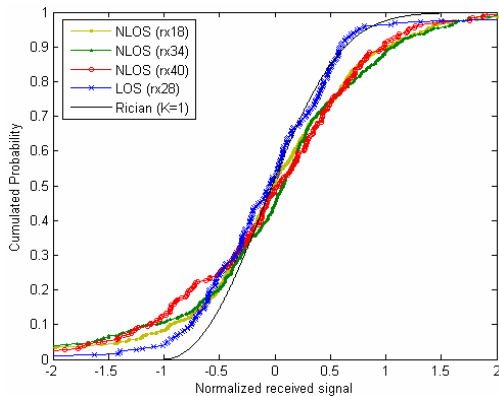


그림 5. 가시경로 환경에서 수신신호의 누적 분포 함수와 비가시경로 환경에서의 누적 분포 함수의 비교

는 각각의 수신 지점에서 얻어진 500개의 주파수 응답을 바탕으로 구해졌다. 그림5에서 x축은 정규화된 수신신호를 나타내고, y축은 누적 확률을 나타낸다. 가시경로가 있는 수신신호의 누적분포함수는  $K=1$ 인 Rician 분포와 유사하고, 가시경로가 없는 수신신호의 누적분포함수는 Rayleigh 분포와 비슷하다. 일반적으로 가시경로가 확보된 수신위치의 경우  $K$ 값이 큰 Rician 분포를 따르는 것임에도 불구하고 이번 환경에서 상대적으로 작은  $K$ 값의 Rician분포를 따르게 된 것은 사무실의 좌우 벽에 의해 반사되어 전파된 다중경로 신호가 도파관 효과를 겪으면서 전력손실 정도가 덜하였기 때문이다.

### 3.3 주파수 톤의 통계학적 분석

초광대역 통신시스템은 광대역의 신호를 전송받아 처리하기 때문에 광대역에 속하는 수신 주파수 신호들의 통계학적 관계에 대한 연구가 필요하다.

#### 3.3.1 수신 주파수 전력의 산재정도

수신 신호 주파수 톤 파워의 표준편차는 수신 주파수 톤의 신호 파워 차를 나타내고, 확률은 신호 세기 변화를 예측하는 시스템적 매개변수로 사용된다.

본 실험환경의 대표적인 가시경로 환경인 사무실 1에서는 송, 수신기 사이의 간격이 넓어짐에 따라 수신 주파수 톤의 표준편차가 증가하다가 일정거리 이상 송수신기의 간격이 벌어질 경우에는 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 결과는 그림 6에 나타났다. 그리고, 수신 주파수 톤의 전력이 평균 수신 전력에서 일정한 범위 내로 수신될 확률은 그림 7에 나타나는 것처럼 줄어들었다. 그림 7에서

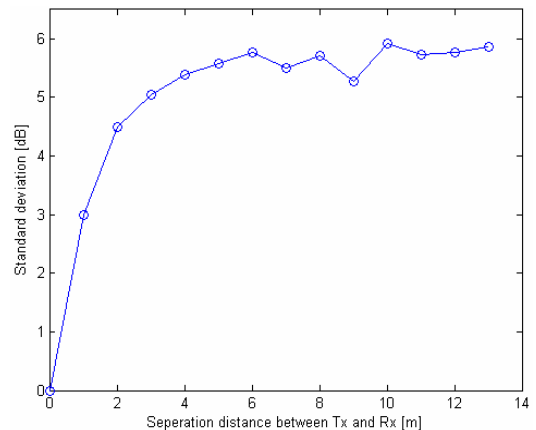


그림 6. 가시경로가 존재하는 환경에서 송신기와 수신기의 간격과 수신 주파수 톤의 표준편차

표 3. 경로가시경로 유무에 따른 표준편차, 확률값

|                    | 표준 편차 | 1dB 확률 | 3dB 확률 | 5dB 확률 | 10dB 확률 |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|---------|
| LOS                | 5.643 | 0.1529 | 0.4406 | 0.6692 | 0.9294  |
| NLOS               | 6.811 | 0.1205 | 0.3569 | 0.5602 | 0.8730  |
| $\frac{LOS}{NLOS}$ | 0.829 | 1.269  | 1.235  | 1.195  | 1.065   |

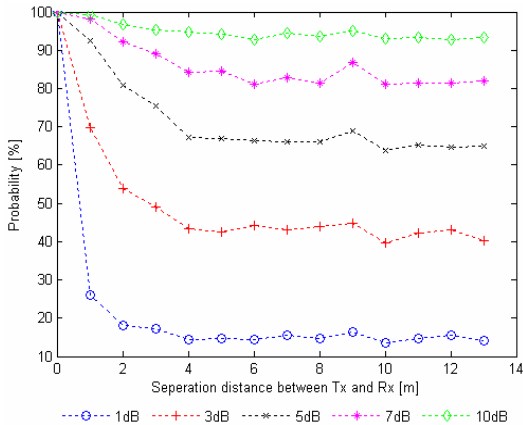


그림 7. 사무실 1에서 가시경로가 존재할 때 수신 신호 톤의 전력이 평균 수신 전력 근처의 특정한 범위에 속할 확률

1dB는 수신 주파수 톤의 전력이 [평균수신 전력-1, 평균수신 전력+1]의 범위에 위치함을 나타내며 90%의 확률은 전체 주파수 톤(801 주파수 톤\*500스냅샷) 중 90%가 일정한 범위 내에 속함을 나타낸다. 그림 6과 그림 7에서 나타나듯이 주파수에 따른 수신 전력의 세기는 거리가 멀어질수록 산재되며 이에 반비례 하여 확률 값은 떨어지는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 가시경로가 확보되지 못한 NLOS 환경에서도 비슷하게 나타났는데 표 3에 나타났듯이 표준편차 값이 큰 NLOS의 경우 확률 값도 LOS값과의 비례 정도에 반하여 줄어드는 것으로 나타났다. 다만, 가시경로가 확보되지 못했을 경우에는 표준편차 값이 송수신기 사이의 거리에 비례하는 경향은 갖지 않은 채 가까운 거리에서부터 큰 값의 표준편차를 지니며 비교적 일정한 값을 나타냈다.

3.3.2 수신 전력 사이의 상관관계

주파수에 따른 수신 전력 사이의 상관관계는 하나의 수신신호로부터 다른 주파수의 신호를 예측하여 전반적인 수신 전력 정도를 예상할 수 있게 한다.

자세한 연관계수(correlation coefficient)의 식은 (2)를 따르고 있으며 환경에 따른 연관계수 값의 변

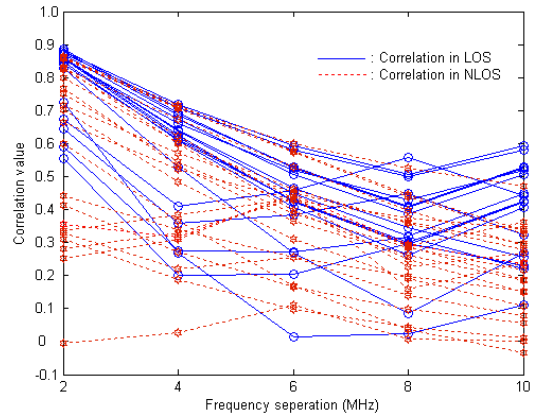


그림 8. 가시경로가 있을 때와 없을 때 주파수 이격에 따른 상관 계수값의 변화

화는 그림 8에 나타나 있다. 전반적으로 NLOS환경에서의 연관 값이 LOS 환경에서의 연관 값보다 작았으며 연관 주파수폭(coherence bandwidth)의 기준이 되는 90%와 50%를 기준으로 보면 90% 기준에서는 LOS, NLOS 환경의 경우 모두 2MHz이상의 주파수 이격이 생기면서 연관도가 떨어지는 것으로 나타났으나 50%기준에서는 LOS 환경에서는 10MHz 이상의 주파수 이격이 생겨야 주파수 연관도가 떨어지는 것으로 나타났다.

$$\rho_a(f_1, f_2) = \frac{C_a(f_1, f_2)}{\sqrt{C_a(f_1, f_1)} \sqrt{C_a(f_2, f_2)}} \quad (2)$$

where  $C_a(f_1, f_2) = E[a(f_1) - m_a(f_1)]a(f_2) - m_a(f_2)]$   
 $a(f_1)$  : 주파수  $f_1$ 에 해당하는 수신신호 크기

IV. 결론

본 논문에는 초광대역 통신시스템을 효과적으로 구축하기 위한 측정 기반의 초광대역 채널모델링 내용이 기술되어 있다. 측정 시스템은 채널 특성분석을 위해 주파수 편향 방법을 사용하였다. 세 곳의 사무실에서 측정된 결과로, 가시경로가 보장된 환경에서는 경로감쇄지수가 1.6보다 작고 비가시경로 환경에서는 2보다 큰 것을 알 수 있다. 그리고 각 주파수 영역의 경로감쇄지수는 가시경로의 상태에 영향을 받지 않고 실험환경에 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 가시경로가 있는 신호의 측정값이 Rician 분포를 나타내고, 가시경로가 없는 신호의 측정값이 Rayleigh 분포를 따름을 알 수 있다. 마지막으로, 가시경로가 존재하는 환경에서, 송신기와 수신기 사

이의 간격이 커짐에 따라 수신 주파수 톤의 파워의 표준편차가 증가하고, 그 값은 가지경로가 없는 경우의 값과 유사한 값으로 수렴됨을 알 수 있다. 그리고 수신 신호 파워가 수신 신호의 평균값을 기준으로 특정한 범위에 있을 확률은 표준편차에 반비례함을 알 수 있었으며 수신 전력의 상관도는 가지경로가 확보된 경우에는 10MHz 이상의 주파수 이격이 있을 시에 연관도가 떨어지는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

[1] Federal Communications Commission, First Order and Report, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding UWB Transmission Systems, Federal Communications Commission, FCC 02-48, Apr. 22, 2002.

[2] Cassioli, D., Win, M.Z. and Molisch, A.F., "The ultra-wide bandwidth indoor channel: from statistical model to simulations," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 20, Issue 6, pp.1247 - 1257, Aug. 2002.

[3] K. Siwiak, "A path link model for ultra wide band pulse transmissions" VTC 2001 Spring, vol. 2, pp.1173-1175, May 2001.

[4] S.S Ghassemzadeh, L.J. Greenstein, A. Kavcic, T. Sveinsson and V. Tarokh, "UWB Indoor Path Loss Model for Residential and Commercial buildings," in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC 200-Fall), vol. 5, pp.3115-3119, Oct 2003.

[5] R.A. Scholtz et al, "UWB radio deployment challenges." PIMRC 2000, vol. 1, pp.620-625, Sep. 2000.

[6] Uguen, B., Plouhinec, E., Lostanlen, Y., Chassay, G., "A deterministic ultra wideband channel modeling," IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, pp. 1-5, May 2002.

[7] Ramirez-Mireles, F., "On the capacity of UWB over multipath channels," IEEE Communications Letters, vol 9, Issue 6, pp. 523-525, Jun 2005.

[8] Chong, C.-C., Yong, S.K., "A Generic Statistical-Based UWB Channel Model for High-Rise Apartments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, Issue 8, Part 1, pp. 2389-2399, Aug. 2005.

[9] Irahauten, Z., Nikookar, H., Janssen, G.J.M., "An overview of ultra wide band indoor channel measurements and modeling," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 14, Issue 8, pp.386-388, Aug. 2004.

[10] I. Oppermann. et al, UWB Theory and Applications, Wiley, England, 2004.

[11] A. Saleh, R. A. Valenzuela, "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 5, Issue 2, pp.128 - 137, Feb 1987.

[12] Theodore S. Rappaport, Wireless communications: principles and practice 2nd edition, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.

[13] H. L. Bertoni, Radio propagation for modern wireless systems, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.

[14] <http://www.multibandofdm.org>

[15] S.C.Kim, H. L. Bertoni, M. Stern, "Pulse propagation characteristics at 2.4GHz inside buildings", IEEE Journal on Vehicular Technology, vol 45, Issue 3, pp. 579 - 592, Aug 1996.

[16] N.K.Kang, S.C.Kim, "Statistical characterization of indoor mimo channel properties at 5.8GHz in the office building", International Symposium on Antennas and Propagation 2005, Aug 2005.

최진원 (Jinwon Choi)

정회원



2002년 2월 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 학사

2005년 2월 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사수료

현재 서울대학교 전기, 컴퓨터공학부 박사과정

<관심분야> 무선통신시스템, 채널 모델링, UWB

강 노 경 (Noh-Gyoung Kang)

정회원



2000년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업  
2002년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사  
2002년 3월~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정  
<관심분야> 전파전파, 이동통신,

MIMO 시스템

김 정 욱 (Jeong-Wook Kim)

준회원



2006년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업  
2006년 2월~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정  
<관심분야> 전파전파, 이동통신, MIMO 시스템

김 성 철 (Seong-Cheol Kim)

중신회원



1984년 서울대학교 전기공학과 학사  
1987년 서울대학교 전기공학과 석사  
1995년 Polytech University 박사  
1995년~1999년 AT&T 연구소

1999년~현재 서울대학교 조교수, 부교수

<관심분야> 무선 통신, 이동 통신, 유무선 채널 모델링, MIMO-OFDM, 전력선 통신, 위성 통신, 전파전파, 전파환경