

사무실 환경에서의 초광대역 통신 채널의 주파수 상관관계

최진원, 김정욱, 강준성, 성유석, 김영훈, 김성철
서울대학교
sckim@maxwell.snu.ac.kr

Frequency correlation property of Ultra Wideband Channel in Office environments

Jinwon Choi, Jeong-Wook Kim, Jun-Sung Kang, Yu-Suk Sung, Young-Hoon Kim, Seong-Cheol Kim
INMC & Seoul National University

요 약

본 논문은 사무실 환경에서 측정된 초광대역 통신채널의 주파수 응답 사이의 상관관계를 모델링하고 있다. 측정은 주파수 영역에서 회로망 분석기를 바탕으로 한 측정시스템을 통해 이루어졌으며 3 개의 서로 다른 사무실 환경의 46 개 송, 수신지점에서 총 23,000 개의 채널응답이 얻어졌다. 주파수에 따른 채널 이득사이의 상관관계를 나타내는 변수로는 상관계수 (Correlation Coefficient)가 사용되어, 주파수 이격에 따른 상관계수 값의 변화를 가시경로의 존재 유무에 따라 선형 모델로 모델링하였다. 아울러 역푸리에 변환 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)을 통해 얻어낸 시간영역의 채널응답을 바탕으로 지연함수 값을 얻어내고 그에 따른 연관대역폭 (Coherence bandwidth)을 산출하여 그 결과값을 주파수 영역에서의 결과 값과 비교하였다.

I. 서론

근거리 환경에서 좀 더 빠른 속도의 데이터 통신을 위한 차세대 통신기술로 초광대역 (Ultra-Wideband) 통신시스템이 고려되고 있다. 초광대역 통신시스템의 경우 타 통신에 비해 다중경로 환경에 강하며 송, 수신기의 구조가 간단하다는 장점을 가지고 있지만, 이와 동시에 광대역 사용으로 인한 타 통신과의 공존 및 RF 소자의 개발의 어려움 역시 단점으로 지적되고 있다. 이러한 장, 단점에 대한 고려뿐만 아니라 효율적인 초광대역 통신 시스템 운용을 위해서는 초광대역 통신 고유의 무선 채널 특성 연구 역시 시급하다고 볼 수 있다. 광대역을 기반으로 하는 시스템 특성을 고려하면 주파수 영역에서의 채널 연구가 시간 영역에서의 연구와 함께 병행되어야 하나, 기존의 논문들의 내용에서는 아직 주파수와 시간 영역에서 동시에 채널 연구를 하는 결과는 많지 않은 것으로 나타났다 [1,2].

본 논문에서는 네트워크 분석기를 통해 측정된 주파수 영역에서의 채널응답을 바탕으로 채널의 상관관계를 모델링하고 그 결과를 시간 영역에서의 결과와 비교하는 내용이 나타나있다. 측정은 일반적인 3 개의 사무실 환경에서 이루어졌으며 46 개의 송, 수신 지점을 가시경로 (Line-of-Sight, LOS)의 존재 유무에 따라 2 개의 그룹으로 나누었다. 무선 채널의 특성을 나타내는 여러 변수들 중에 주파수 톤에 따른 채널 응답 사이의 상관관계는 채널 추정, 주파수 분배와 같은 시스템 변수로 사용되는 주요한 채널 변수 값으로 광대역의 무선통신 시스템에 있어서 특히 중요하다 할 수 있다. 상관계수는 상관관계를 정의하는 값으로 널리 사용되고 있어, 수신된 23,000 개의 채널응답을 바탕으로 주파수 이격에 따른 상관계수의 변화를 모델링하였다. 주파수 이격에 따라 두 개의 기술키를 가지는 선형모델로 근사되는 상관계수의 변화는 LOS 의 유, 무에 따라 다른

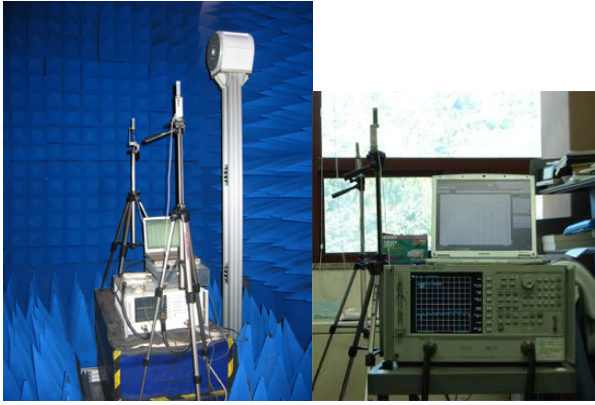
변수 값을 가지는 것으로 나타났다. 아울러 주파수 응답에서 역푸리에변환을 통해 얻어진 시간영역의 채널응답을 바탕으로 지연변수값들을 구하여 그 값들을 바탕으로 연관대역폭을 추출하여 주파수응답을 바탕으로 한 상관계수 값과 비교하는 연구도 진행되었다.

본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. 2 장에서 측정 시스템과 측정환경에 대한 서술을 한 후 3 장에서 측정 데이터를 바탕으로 한 주파수 영역에서의 상관계수 연구와 시간 영역에서의 연관대역폭 산출에 대한 논의를 한 후 4 장에서 결론을 맺는다.

II. 측정

A. 측정 시스템

초광대역 채널 측정 방법 가운데, 이 논문에서는 주파수영역 채널 측정 시스템을 사용하였다 [3]. 이 측정 방법은 회로망 분석기를 이용하여 넓은 주파수 대역을 협대역의 주파수 신호를 일소하는 방법으로 전 주파수 대역에 대한 채널 응답 함수를 얻어내는 방식이다. 구성된 측정 시스템은 그림 1 과 같다. 회로망 분석은 5GHz 에서 6.6GHz 를 균일하게 2MHz 간격으로 나눈 801 개의 연속적인 주파수 톤을 전송하는 방식으로 2MHz 의 주파수 간격은 최대 초과 지연이 500 nano-seconds 인 다중경로를 얻는 것을 가능하게 하며 1.6GHz 의 대역폭은 0.625 nano-seconds 의 시간 해상도를 갖게 한다. 송, 수신 안테나는 2.1dBi 의 이득을 갖는 전방향성 안테나이고, 1.6m 삼각대 위에 설치하였다. 측정된 채널 응답함수의 예가 그림 2 에 나타나있다.



a) b)

그림 1. a) 무반향 실험실에서의 측정 시스템
b) 실제 실험 환경에서의 측정시스템

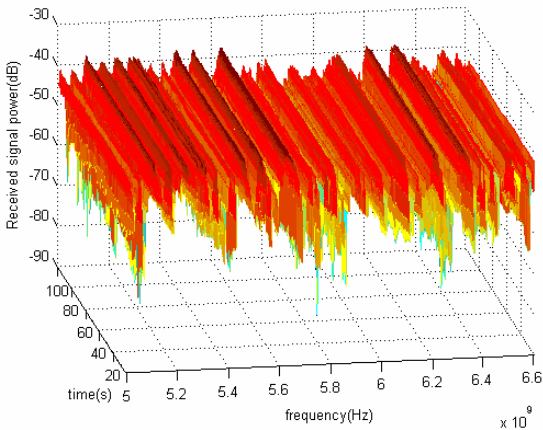
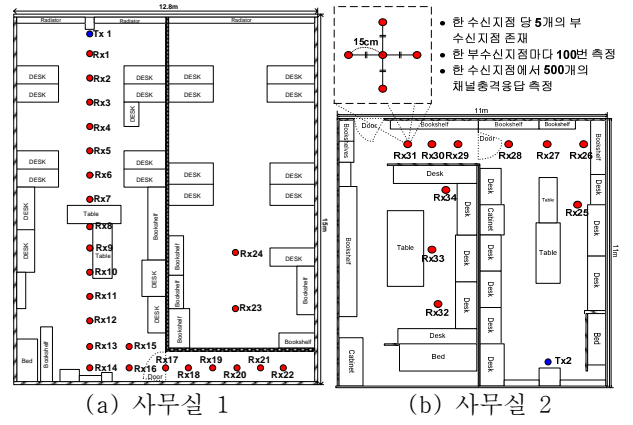


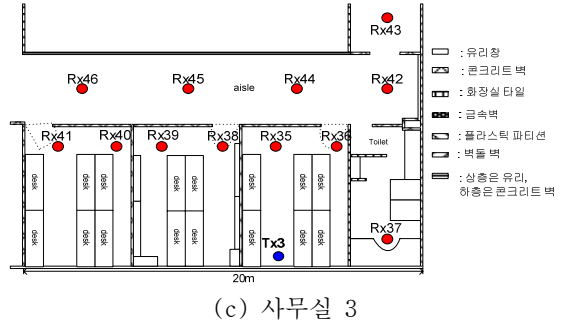
그림 2. 가시경로가 존재하는 수신 환경에서 100 초 동안 측정된 채널 응답 함수

B. 측정 환경 및 측정 지점

측정은 서울대학교의 서로 다른 3 개의 사무실 환경에서 수행되었다[3]. 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 금속벽이 존재하여 사무실을 두 개의 작은 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 가시경로가 존재하는 경우 (LOS)이고, 25개의 수신 지점은 가시경로가 존재하지 않는 경우 (NLOS)였다. 각각의 수신 위치에서 5개의 부수신 지점에 대해 평균을 취했고, 각 공간 지점에서 100개의 주파수 응답을, 즉 하나의 수신 위치에서 500개의 주파수 응답을 얻었다. 연결되는 신호응답의 시간 간격은 1 초로 이는 일반적으로 알려진 실내 환경에서의 최대 초과 지연 값보다 훨씬 크다.



(a) 사무실 1 (b) 사무실 2



(c) 사무실 3

그림 3. 측정이 이루어진 3 개의 사무실의 평면도 및 벽의 재질 그리고 송, 수신 지점의 위치

III. 분석

A. 주파수 영역에서의 분석

$$h(f) = \sum_{f_k=f_{\min}}^{f_{\max}} a(f_k) e^{j\theta(f_k)} \delta(f - f_k) \quad (1)$$

주파수 영역에서의 채널응답, $h(f)$,은 (1)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 f_{\min} , f_{\max} 는 시스템의 최저, 최대 주파수 값을 의미하고 $a(f_k)$ 는 주파수 f_k 에 해당하는 채널 이득을, $\theta(f_k)$ 는 위상 값을 각각 나타낸다. 아울러, $\delta(f)$ 는 Dirac delta 함수를 의미한다. 본 연구에서 f_{\min} 값은 5.0GHz, f_{\max} 값은 6.6GHz이다. 이를 바탕으로 주파수 이득간의 상관관계 값은 (2)와 같이 주파수 이격에 따른 함수로 나타난다 [4].

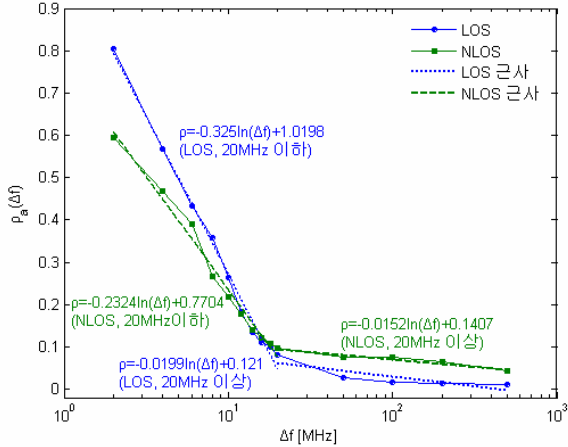
$$\rho_a(\Delta f) = \frac{C_a(f, f + \Delta f)}{\sqrt{C_a(f, f)} \sqrt{C_a(f + \Delta f, f + \Delta f)}}, \quad (2)$$

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 채널 이득

$m_a(f_1)$: $a(f_1)$ 의 평균값.



LOS: 가시경로, NLOS: 비가시경로 (non-LOS)

그림 4. LOS의 존재 유무에 따른 상관계수 값의 근사 모델

그림 4에 LOS의 존재 유무에 따른 주파수 영역에서의 채널이득 사이의 상관계수 값이 나타나 있다. 상관계수 값은 주파수 이격에 따라 2개의 기울기를 갖는 선형 모델로 근사화되었으며 근사된 수식은 주파수 이격 정도에 따라 아래와 같이 나타나 있다.

$$\rho_{a,LOS}(\Delta f) = \begin{cases} -0.325 \ln(\Delta f) + 1.0198, & \Delta f \leq 20\text{MHz} & (a) \\ -0.0199 \ln(\Delta f) + 0.121, & \Delta f > 20\text{MHz} & (b) \end{cases}$$

$$\rho_{a,NLOS}(\Delta f) = \begin{cases} -0.2324 \ln(\Delta f) + 0.7704, & \Delta f \leq 20\text{MHz} & (a) \\ -0.0152 \ln(\Delta f) + 0.1407, & \Delta f > 20\text{MHz} & (b) \end{cases}$$

주파수 이격 정도가 20MHz보다 작은 경우에는 LOS가 확보되어 있을 때의 상관 정도가 NLOS에 비하여 크게 나타났으나 주파수 이격 값이 20MHz보다 큰 경우에는 거꾸로 NLOS 경우가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 주파수 이격이 작은 경우 NLOS의 전파특성은 가로막고 있는 장애물에 의해 상관 정도가 떨어지는 것을 의미하며 주파수 이격이 큰 경우에는 유사한 장애물을 통과함으로 전파특성이 LOS에 비하여 유사하게 나타난 것으로 보인다.

B. 시간 영역에서의 분석

측정된 주파수 영역에서의 채널응답(Channel Transfer Function, CTF)은 역푸리에변환을 통해 시간영역의 채널응답(Channel Impulse Response, CIR)으로 변환될 수 있다 [5]. 그림 5에 NLOS 환경의 대표적인 CIR이 나타나 있다. 이 수신지점에서는 복도를 이루고 있는 금속 벽에 의해 주기적인 다중경로의 존재가 나타나 있다. 이와 같이 얻어진 시간영역의 CIR들로부터 무선채널의 지연특성을 나타내는 변수 값들을 얻을 수 있다. 대표적인 시간 지연 변수 값들은 평균초과지연 (Mean Excess Delay), RMS 지연분산 (Root-Mean-Square Delay Spread, RMS Delay Spread), 최대초과지연 (Maximum Excess Delay) 등이 있으며 본 실험에서 얻어진 초광대역 채널의 시간지연변수 값들이 표 1에 나타나 있다. 결과 값은 가시경로의 존재 유, 무에 따라 LOS와 NLOS로 정리 되어 있다.

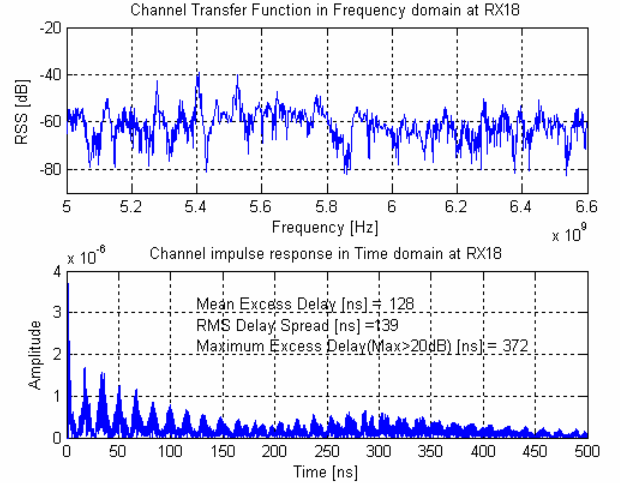


그림 5. 주파수 영역에서의 채널응답 (Channel Transfer Function, CTF)에서 역푸리에변환을 통해 얻어진 시간영역에서의 채널 응답 (Channel Impulse Response, CIR)

표 1. 가시경로의 존재유, 무에 따른 시간지연변수값과 그에 따른 연관대역폭

	Mean Excess Delay [ns]	RMS Delay Spread [ns]	Maximum Excess Delay [ns]	$f_0(\text{RMS})$ [MHz]	$f_0(\rho(\Delta f))$ [MHz]
LOS	23.361	43.663	60.108	4.581	4.950
NLOS	50.197	76.062	161.068	2.629	3.201

모든 시간 지연 함수 값이 가시경로가 차단됨에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. [6]에 따르면 50%의 연관도를 가지는 연관대역폭은 RMS 지연분산으로부터 얻을 수 있는데 이는 다음과 같이 주어진다.

$$f_0(\text{RMS}) = \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (4)$$

또 앞에서 구한 상관계수 근사모델에서도 얻을 수 있는데 이는 수식적으로 다음과 같이 나타난다.

$$f_0(\rho(\Delta f)) = \arg\{\rho_a(\Delta f) = 0.5\} \quad (5)$$

표 1에 나타난 가시경로의 존재에 따른 $f_0(\text{RMS})$ 와 $f_0(\rho(\Delta f))$ 를 비교해보면 LOS의 경우 두 값이 5MHz로 비슷하게 나타났고 NLOS의 경우는 3MHz 내외로 나타났다. NLOS에서 다중경로에 의해 RMS 분산값이 커지면서 시간영역에서의 값이 조금 작게 나타난 것으로 보인다.

IV. 결론

본 논문에는 사무실 환경에서의 초광대역 채널의 상관관계에 대한 주파수 영역과 시간영역에서의 분석이 나타나있다. 분석은 회로망 분석기를 이용한 측정시스템에서 얻어진 주파수 영역의 채널 응답을 바탕으로 이루어졌으며 분석은 가시경로의 존재 유, 무에 따라 나누어 진행되었다. 상관관계를 나타내는 변수 값으로 사용된 상관계수는 주파수의 이격에 따라 두 개의 기울기를 가지는 선형모델로 근사화 되었으며 20MHz 를 기준으로 작은 주파수 이격에서는 가시경로가 있을 때 채널의 상관관계가 크고 큰 주파수 이격에서는 반대인 것으로 나타났다. 역푸리에변환을 통해서 진행된 시간영역의 분석에서는 RMS 지연분산을 통해 연관대역폭을 구해내어 주파수영역에서의 결과값과 비교하였다. 50%의 연관도를 지닌 주파수 이격은 가시경로가 확보되어 있을 경우 약 5MHz 그렇지 않은 경우에는 약 3MHz 로 나타났다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 BK 21 Project 와 서울시 산학연 협력사업 (10544)의 지원으로 작성되었습니다.

참고문헌

- [1] A.F.Molisch, J.R.Foerster, and M.Pendergrass, "Channel models for ultrawideband personal area networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 10, pp. 14-21, Dec., 2003.
- [2] A.F.Molisch *et al.*, IEEE 802.15.4a channel Model-Final report Tech. Rep. Doc. IEEE 802.15-04-0662-02-004a, 2005.
- [3] Jinwon Choi *et al.*, "Empirical Ultra Wide Band Path loss model in Office Environments," in *Proc. of IEEE VTC 2006 Spring*, vol. 4, pp. 1956-1960, May, 2006.
- [4] Alberto Leon-Garcia, "Random Processes." in *Probability and random processes for electrical engineering*, 2nd ed., Addison Wesley, 1994.
- [5] B. Denis, J. Keignart, "Post-processing framework for enhanced UWB channel modeling from band-limited measurements," in *Proc. of IEEE conference on UWB systems and Technologies*, pp.260-264, Nov., 2003.
- [6] Sklar B., "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization," in *IEEE communication magazine*, vol. 35, issue 9, pp. 136-146, Sept., 1997.