

실내 무선채널의 전파특성

오 창 현* · 조 성 준**

(*한진전자(주)연구소 · **한국항공대학 항공통신정보공학과)

■ 차 려 ■		
I. 서 론	II. 전파모델	III. 결 론

I. 서 론

최근들어 사회생활이 복잡해지고 고도화됨에 따라 병원, 공장, 공항, 사무실, 백화점 등의 실내에서 다수의 이용자들에게 고품질의 다양한 무선통신 서비스(무선 LAN, 무선 PABX)를 제공할 수 있는 실내 무선 통신 시스템(Indoor Radio Communication Systems)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 실내에서 무선으로 음성 및 데이터 통신을 행하는 것은 매우 매력적이며, 이와 같은 통신 시스템에 의해 건물내 특정 위치로 제한되던 사용자에게 진정한 의미의 이동성(Mobility)을 주게된다^{(1), (2)}.

실내에서 무선 전파를 이용하는 음성/데이터 통신 시스템 및 원격제어 시스템에 대한 관심이 증가하고 있지만 실내 무선 채널의 전파특성을 다룬 문헌은 별로 없다. 빌딩내 또는 복잡한 공장이나 병원내에서의 전파특성은 자유공간에서의 전파특성과는 다르다(그림 1). 실내에서의 무선 전파는 건물내의 벽, 천장, 가구, 및 기자재등에 의해 감쇠(Attenuation)를 받을 뿐만 아니라 신호의 성분들이 주위 물체에 의해 반사되면서 전파하기 때문에 전파 시간이 달라서 수신기에 도착하는 시각이 약간씩 차이가 나는 다중경로(Multipath) 전파현상이 나타난다. 또한 사용자는 대개 통화하면서 이동하게 되며, 또 시스템의 주위가 사물들이거나 자동 유도 차량(Autonomous Guided Ve-

hicle; AGV) 등과 같이 움직이는 것들이기 때문에 이들이 복합적으로 작용하여 시간과 공간에 따라 변동하는 페이딩 현상이 발생하고, 펄스의 퍼짐(Pulse Spread)이 생기고 이로 인해 부호간 간섭(ISI) 현상이 발생한다^{(2) (5)}. 따라서 올바른 실내 무선 통신 시스템을 설계하기 위해서는 실내 무선 채널의 전파특성에 대한 정확한 분석이 필요하다.

본 고에서는 개방형 빌딩(Open Plane Building)에서 실제로 측정된 데이터⁽⁵⁾로 부터 얻어지는 통계적 임펄스 응답 모델⁽⁶⁾을 살펴보았으며, 전파모델을 시뮬레이션하여 실제 다중경로 채널의 전력지연 프로파일을 발생시켜 이를 분석하였다.

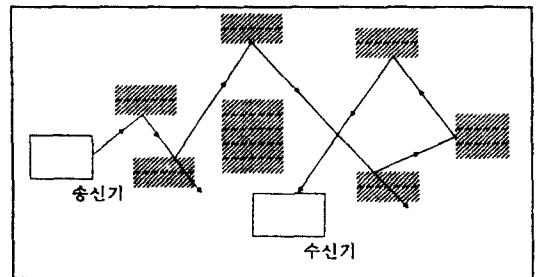


그림 1. 실내 전파환경 모델의 예

II. 전파 모델

1. 개요

다중경로 채널은 복소수의 기저대역 임펄스 응답을 갖는 선형 필터로 모델링할 수 있으며, 이와같은 모델링법은 도심 이동체 통신 채널^{(7), (8)} 및 실내 무선채널^{(1), (4)} 등의 연구에서 적합하다는 것이 증명된 바 있다. 이산 저역통과 복소수 채널의 임펄스 응답 $h_b(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$h_b(t) = \sum_k \alpha_k \exp(-j\theta_k) \delta(t - \tau_k). \quad (1)$$

식(1)에서 α_k 는 실수의 전압 감쇠 인자, θ_k 는 전파에 의한 선형 위상천이 및 산란기의 반사계수에 의한 부가적 위상천이를 표시하며, τ_k 는 첫번째 도착한 성분의 도착시간에 대한 k 번째 경로의 시간지연이다. RF 반송파의 구형펄스 $p(t)$ 를 발생하는 송신기를 이용하여 송신한후 이를 광대역 수신기로 수신하면 이때의 기저대역 출력은 무선채널의 임펄스응답 $h_b(t)$ 에 근사된다.^{(1), (4)} 자승 포락선 검파를 행하면 다음과 같은 전력 임펄스 응답의 근사치가 얻어진다.

$$|h_b(t)|^2 = \sum_k \alpha_k^2 p^2(t - \tau_k). \quad (2)$$

식(2)는 $p(t)$ 의 간격에 해당하는 시간 창(Time Window)내에 최대로 1개의 다중경로 성분만이 존재하며 중첩이 없는 경우를 가정한 것으로서, 측정치인 α_k^2 값은 이산 초과지연 T_k 에서 등가의 A_k^2 을 얻기 위해 선형 스플라인(Spline)기법을 이용하여 평균이 취해진다. 따라서 식(2)는 다음과 같이 모델링된다.

$$|h_b(t)|^2 = \sum_k A_k^2 \delta(t - T_k). \quad (2-a)$$

본 모델에서 전력지연 프로파일은 각 측정위치에서 1[m] 트랙(Track)을 $\lambda/4$ 의 등간격으로 나누어 기록하기 때문에 개별 다중경로 성분의 국부영역 페이딩, 작은 범위(Small Scale) 페이딩 및 다중경로 성분 수와 도착시간의 미소 변화등을 분석할 수 있다. 따라서 본 통계적 모델은 시간 지연, 1[m] 국부 영역 내 작은 범위 송수신기 이격, 넓은 범위(Large Scale) 송수신기 이격, 지형 및 측정 위치의 함수로 주어진다. P 를, 측정된 모든 1[m] 국부 영역들의 집합, X 를,

특정 국부 영역내에서의 1[m] 트랙을 따라 등간격으로 떨어진 작은 범위 위치들의 집합이라고 하면 특정 측정 위치 P_0 은 $P_0 \in P$ 로 표시되며, P_0 에서 측정된 프로파일의 작은 범위 위치 X_j 는 $X_j \in X$ 이고 j 은 1~19 범위이다. 또한 각 국부영역 S_m 은 $S_m \in S\{S_1, S_2\}$ 로 지형을 분류할 수 있으며, 여기서 S_1 은 가시거리(Line-of-Sight; LOS) 지형을, S_2 는 가시거리외(Obstructed; OBS) 지형을 표시한다. 각각의 P_0 은 넓은 범위 송수신기 사이의 거리 D_0 을 갖는데 $D_0 \in D$ 이며, D 는 측정위치 집합 P 에 따른 송수신기 사이 거리의 집합이다. 따라서 기저대역 전력지연 프로파일은 다음과 같이 표현된다.

$$|h_b(t, X_j, S_m, D_0, P_0)|^2 = \sum_k A_k^2(T_k, X_j, S_m, D_0, P_0) \delta(t - T_k(X_j, S_m, D_0, P_0)). \quad (3)$$

2. 다중경로 채널 파라미터

광대역 다중경로 채널은 평균초과지연(Mean Excess Delay) $\bar{\tau}$ 와 RMS 지연 확산(RMS Delay Spread) σ 에 의해 그 특성이 결정된다. 평균 초과 지연은 전력지연 프로파일의 1차 모멘트로서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k \alpha_k^2 \tau_k}{\sum_k \alpha_k^2} \cong \frac{\sum_k A_k^2 T_k}{\sum_k A_k^2}. \quad (4)$$

RMS 지연확산은 전력지연 프로파일 2차 중심 모멘트의 자승근으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = \sqrt{\tau^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (5)$$

$$\text{단, } \tau^2 = \frac{\sum_k \alpha_k^2 \tau_k^2}{\sum_k \alpha_k^2} \cong \frac{\sum_k A_k^2 T_k^2}{\sum_k A_k^2}.$$

여기서 α_k^2 과 τ_k 는 수신기의 실제 측정값이며, 모델링에서는 A_k^2 , T_k 를 사용한다. 식(4)와 식(5)에서 각 프로파일의 지연은 $T_0 = 0$ 에 도착한 첫번째 신호에 대한 시간지연이다.

3. 다중경로 성분의 넓은 범위 페이딩(Large Scale Fading)

송수신기 사이의 거리가 d 미터(meter)인 지점에서

수신된 다중경로 지연프로파일의 전체 전력은 $10 \times n \times \log(d)$ 형태의, 평균 경로손실에 대한 대수 정규분포로 표현된다. 경로손실 지수인 n 값은 공장이나 칸막이 혹은 격벽이 없는 개방형 빌딩인 경우는 1.8~2.8 범위이며, 여러층의 격벽된 빌딩인 경우는 3~5 범위이다.

다중경로 성분의 진폭 A_k 는 T_k, X_i, S_m, D_n, P_n 의 함수이므로 19개 프로파일의 평균을 취하여 각 측정 위치 P_n 에서의 초과지연 T_k 에 대한 X_i 관계를 제거하여 평균진폭 $\bar{A}_k(T_k, S_m, D_n)$ 을 얻는다. 평균 신호 진폭 \bar{A}_k 는 다음과 같이 모델링된다.

$$\bar{A}_k(T_k, S_m, D_n) \quad (10\lambda \text{ 기준치보다 낮은 [dB] 값}) \\ = 10 \times n(T_k, S_m) \times \log\left(\frac{D_n}{2.3}\right) \quad (6)$$

여기서 $n(T_k, S_m)$ 은 경로손실 지수이며, D_n 의 단위는 미터이다. 그림 2는 가시거리 / 가시거리외 지형에 대해 초과지연 T_k 를 함수로 하여 경로손실 지수 $n(T_k, S_m)$ 을 표시한 것이다. 가시거리 지형인 경우 $n(T_0, S_1)$ 은 2(자유공간 경로손실)가 되리라고 생각할 수 있지만, 측정 데이터에 의하면 평균적으로 가시거리 신호는 자유공간일때 보다 빨리 거리에 따라 감쇠한다. 이것은 바닥이나 천장의 반사로 인해 검파가 불가능한 다중경로 성분들이 존재하기 때문이다. 가시거리외 지형인 경우 다중경로 성분들의 전력은 가시거리 경우보다 빠르게 감쇠한다. ($n(T_k, S_2) > n(T_k, S_1)$). 이것은 차폐물에 의한 그림자 효과로 인해 방해물이 없는 지형에 비해 큰 감쇠가 발생하기 때문일 것이다. 그림 2에 적합한 $n(T_k, S_m)$ 은 수학적으로 다음과 같이 모델링된다.

$$n(T_k, S_1) = \begin{cases} 2.5 + \frac{T_k}{39}, & T_k \leq 15[\text{ns}] \\ 3.0 + \frac{(T_k - 156)}{380}, & 15[\text{ns}] \leq T_k \leq 250[\text{ns}] \\ 3.6, & 250[\text{ns}] \leq T_k \leq 500[\text{ns}] \end{cases} \quad (7)$$

$$n(T_k, S_2) = \begin{cases} 3.65 + \frac{T_k}{536}, & T_k \leq 310[\text{ns}] \\ 4.23, & 310[\text{ns}] \leq T_k \leq 500[\text{ns}] \end{cases} \quad (8)$$

여기서 T_k 는 7.8[ns]의 정수배 값을 가진다.

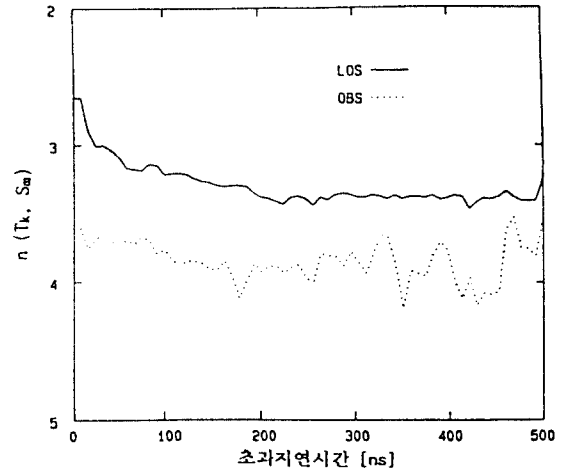


그림 2. 가시거리(LOS) 및 가시거리외(OBS) 지형에 대한 경로 손실 지수 $n(T_k, S_m)$

그림 3은 $\bar{A}_k(T_0, S_1, D_n)$ 의 실측 누적분포와 식 (6)의 평균에 대해 $\sigma_{\text{large scale}} = 5.4[\text{dB}]$ 인 대수 정규분포(점선)를 비교한 것으로서, 송수신기 사이의 거리가 먼 경우(Large Scale), 개별 다중경로 성분 전력들이 평균 경로손실에 대해 대수 정규분포한다는 것을 알 수 있다.

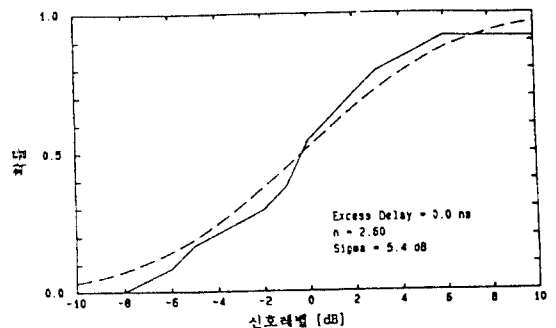


그림 3. $A_k(T_0, S_1, D_n)$ 의 누적 분포

4. 다중경로 성분의 작은 범위 페이딩(Small Scale Fading)

3.의 경우는 송수신기 사이의 거리가 비교적 먼 경우, 특정 초과지연의 다중경로 진폭들의 평균값을 예

측할 때 유용하지만, 실제로 다중경로 진폭들은 수신기가 국부영역을 따라 움직일때 심하게 변동하게 된다. 참고문헌 9와 10에 의하면 작은 범위 페이딩은 국부 평균에 대한 대수 정규분포로 나타내진다. 그림 4는 실제 19개 다중경로 신호 진폭들 $A_k(T_0, X, S_1, D_6, P_6)$ 의 누적 분포함수의 예를 나타낸 것으로서, 국부 평균 $\bar{A}_k(T_0, S_1, D_6, P_6)$ 에 대해 표준편차 $\sigma_{\text{small-scale}}(T_0, S_1, P_6) = 0.4$ 인 대수 정규분포(점선)와 비교하였다. 표준편차 $\sigma_{\text{small-scale}}(T_k, S_m, P_n)$ 은 하나의 국부영역내 평균에 대한 개별 A_k 들의 변화를 표시하며, 각 P_n 에 대해 랜덤변수로 모델링된다. 측정 데이터에 의하면 국부 평균에 대한 대수 정규 페이딩은 초과지연과 무관하다⁽⁹⁾. 즉, $T_k = 0$ 에서 다중경로 성분들은 특정 측정위치에서는 매우 적은 페이딩을 받지만 다른 위치에서는 첫번째 도착한 성분이 프로파일의 나중에 도착한 신호보다 훨씬 많은 페이딩을 받는다. 또한 어떤 위치에서는 프로파일에 나중에 도착한 신호가 페이딩을 받지 않는 반면 다른 위치에서는 큰 초과지연의 신호들이 그림자 효과 혹은 다중전파로 인해 심각한 페이딩을 받게된다. 임의의 초과지연에서 1[m] 국부영역에 대한 $\sigma_{\text{small-scale}}(T_k, S_m, P_n)$ 의 누적분포함수(C.D.F)는 다음과 같이 모델링된다.

$$C.D.F(\sigma_{\text{small-scale}}(T_k, S_m, P_n)) = 1 - \exp\left(-\frac{(\sigma_{\text{small-scale}}(T_k, S_m, P_n) - a)^2}{2}\right) \quad (9)$$

여기서 a 는 offset 변수로서 가시거리의 경우 0.25[dB], 가시거리의 지형인 경우는 0.5[dB]이며, $\sigma_{\text{small-scale}}(T_k, S_m, P_n)$ 는 [dB]값이다. $\sigma_{\text{small-scale}}(T_k, S_1)$ 의 실측 누적분포와 식(9)의 모델을 그림 5에 나타내었다. 식(6)~식(9)로부터 개별 다중경로 성분의 진폭은 다음과 같은 정규분포로 표현된다.

$$A_k(T_k, X_i, S_m, D_n, P_n) = N\left[N\left[10 \times n(T_k, S_m) \times \log\left(\frac{D_n}{2.3}\right), \sigma_{\text{large-scale}}^2(S_m) \right], \sigma_{\text{small-scale}}^2(T_k, S_m, P_n) \right] \quad (10)$$

여기서 $N[x, \sigma_x^2]$ 은 평균이 x [dB]이고 표준편차가 σ_x [dB]인 정규분포를 나타낸다. 식(10)은 개별 다중경로 성분 진폭들의 넓은 범위 및 작은 범위 페이딩 모두를 포함하는 식이다.

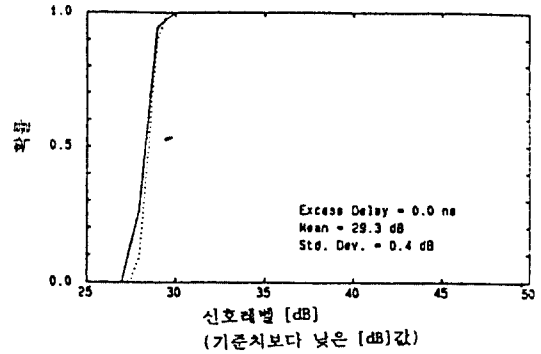


그림 4. 국부영역내 다중경로 성분 진폭들의 누적분포

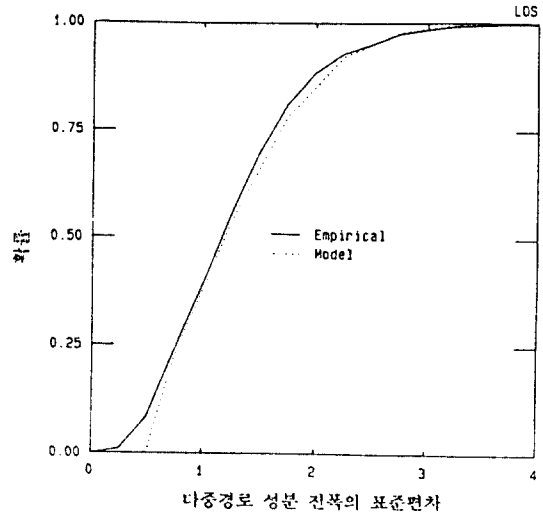


그림 5. $\sigma_{\text{small-scale}}(T_k, S_1)$ 의 실측C.D.F

III. 검 토

본 고에서는 T.S.Rappaport가 제시한 실내 무선 시스템의 통계적 전파 모델⁽⁶⁾을 설명하였으며, 전파 모델을 시뮬레이션하여 실제 다중경로 채널의 전력지연 프로파일을 발생시켜 이를 분석하였다.

칸막이나 벽이 없는 개방형(Open-Plane) 빌딩에 대한 가시거리 및 가시거리외 지형의 시뮬레이션에 의해 얻은 채널의 임펄스 응답 예를 그림 6~그림 11에 나타내었다. 그림 6은 칸막이나 벽이 없는 개방형(Open-plane) 빌딩에 대한 전력 프로파일로서 LOS

지형, 주파수 1.3[GHz], 송수신기 사이의 거리 40.0 [m], 평균 RMS 지연 확산 85.0[ns], 평균경로 손실 51.6[dB]인 경우이며, 이때의 협대역 신호의 1[m] 국부 영역내 이동에 따른 순시 진폭 변화 및 위상 변화를 그림 7에 나타내었다. 또한 그림 7로 부터 얻어지는 협대역 C.D.F를 레일리 분포, $K=6$ [dB]인 Rician 분포 및 표준편차가 8[dB]인 대수 정규분포와 비교하여 그림 8에 나타내었다. 그림 9~그림 11은 유사한 조건하에서 가지거리의 지형에 대한 채널의 응답을 나타낸 것이다. 그림 6과 그림 9로 부터 가지거리외 지형인 경우는 차폐물에 의한 전파지연으로 인해 가지거리 지형에 비해 큰 시간 지연후에도 검파 가능한 신호가 수신됨을 알 수 있으며, 송수신기 사이의 거리가 같더라도 가지거리외 지형인 경우가 가지거리 지형에 비해 더 큰 경로손실과 RMS 지연확산을 가진다는 것을 알 수 있다. 실제 시뮬레이션에 의하면 평균 RMS 지연 확산 및 경로 손실지수는 각각 가지거리

지형인 경우 87[ns], 1.9이며, 가지거리외 지형인 경우는 104[ns], 2.4로 얻어진다. 그림 7과 그림 10에서 다중경로 성분들의 진폭은 수신기가 국부 영역을 따라 움직일때 심하게 변동함을 알 수 있다. 또한 그림 8과 그림 11로 부터 1[m] 국부 영역의 다중경로 성분들의 진폭은 $10 \times n(T_r, S_m) \times \log(D_n)$ 형태의 평균 경로손실을 가지며, 하나의 국부 영역내 개별 다중경로 성분의 진폭은 국부 평균에 대해 대수 정규분포로 근사시킬 수 있다.

본 모델은 5개 빌딩으로 부터의 전파 실측 데이터를 기초로 하여 1.3[GHz]대 실내 무선 채널의 임펄스 응답을 통계적으로 모델링한 것으로서, 실측 데이터를 기초로 하였기 때문에 기의 실제에 가까운 다중경로 지연 프로파일을 만들 수 있었다. 앞으로는 본 고에서 설명한 전파모델을 이용하여 실내 무선 시스템의 성능에 대해 분석해보려고 한다.

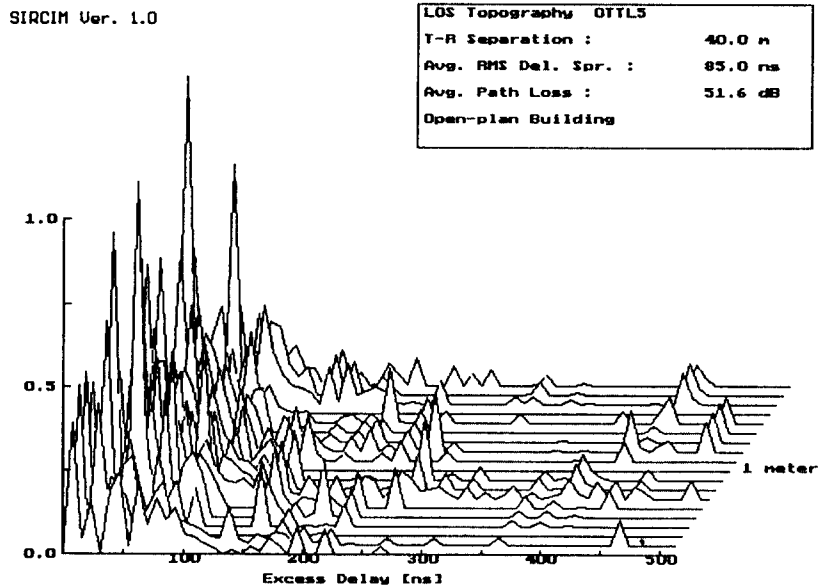


그림 6. 칸막이나 벽이 없는 개방형(Open-plane) 빌딩에 대한 전력 프로파일(LOS 지형, 주파수:1.3[GHz], 송수신기 사이의 거리:40.0[m], 평균 RMS 지연 확산:85.0[ns], 평균경로 손실:51.6[dB]인 경우)

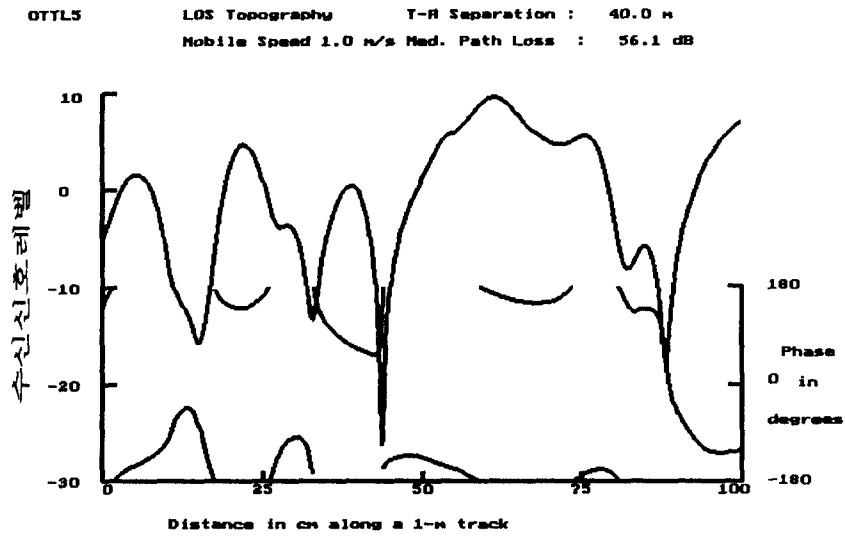


그림 7. 그림 6 경우의 광대역 모델에 근거한 CW 페이딩

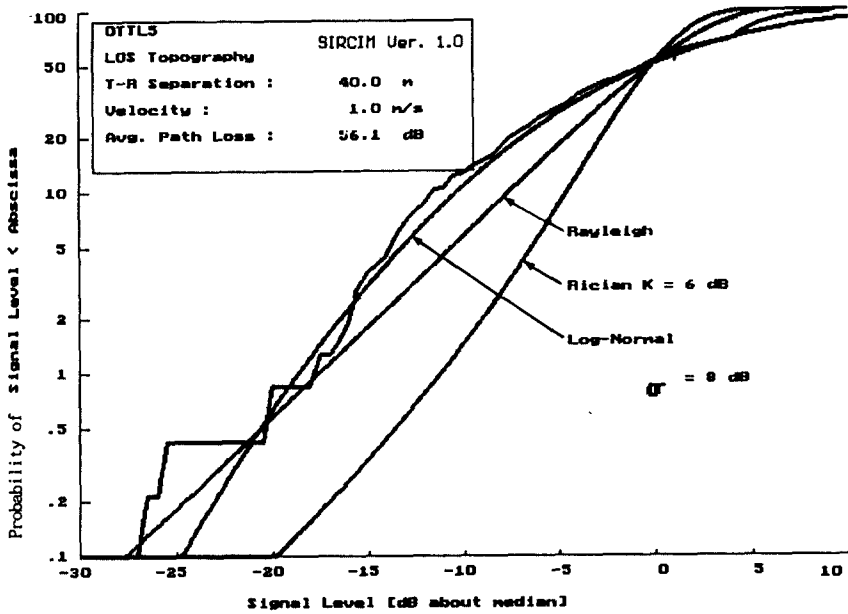


그림 8. 그림 6 경우의 국부 평균에 대한 좁은 범위 협대역 C.D.F

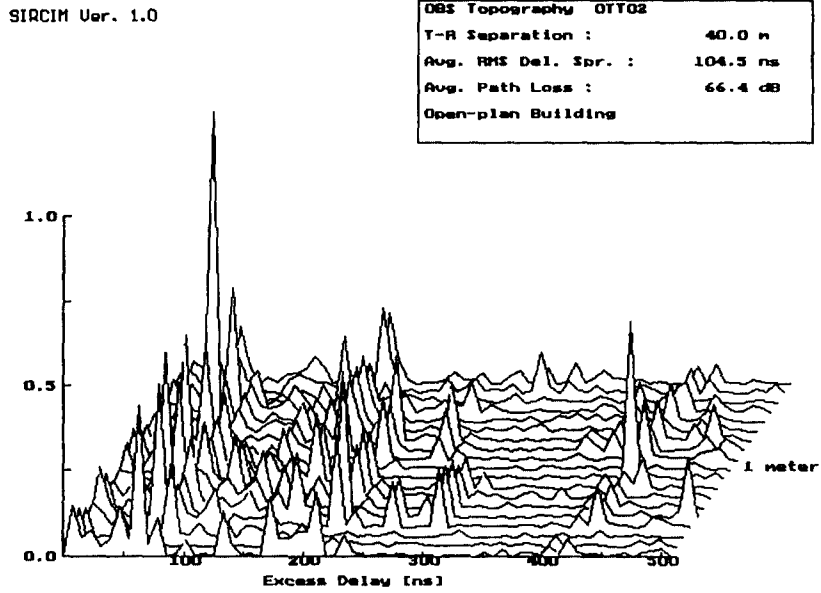


그림 9. 칸막이 나 벽이 없는 개방형(Open-plane) 빌딩에 대한 전력 프로파일(OBS 지형, 주파수:1.3[GHz], 송수신기 사이의 거리:40.0[m], 평균 RMS 지연 확산:104.5[ns], 평균 경로 손실:66.4[dB]인 경우)

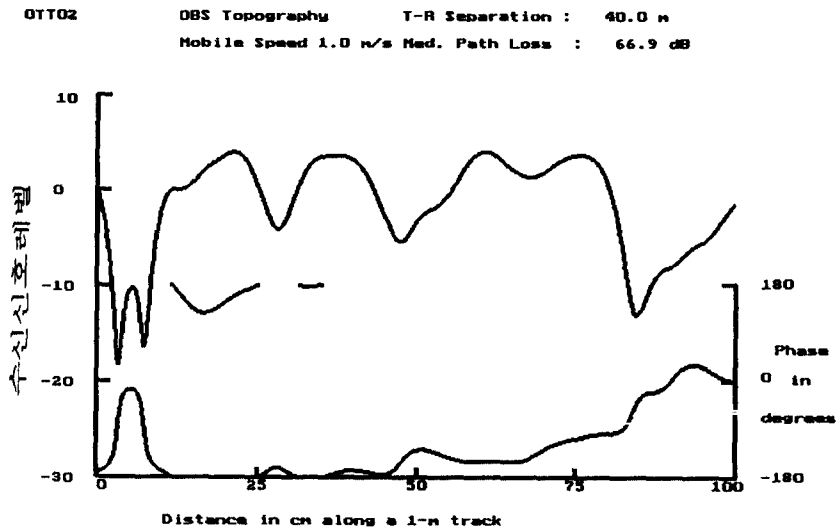


그림 10. 그림 9 경우의 광대역 모델에 근거한 CW 레이팅

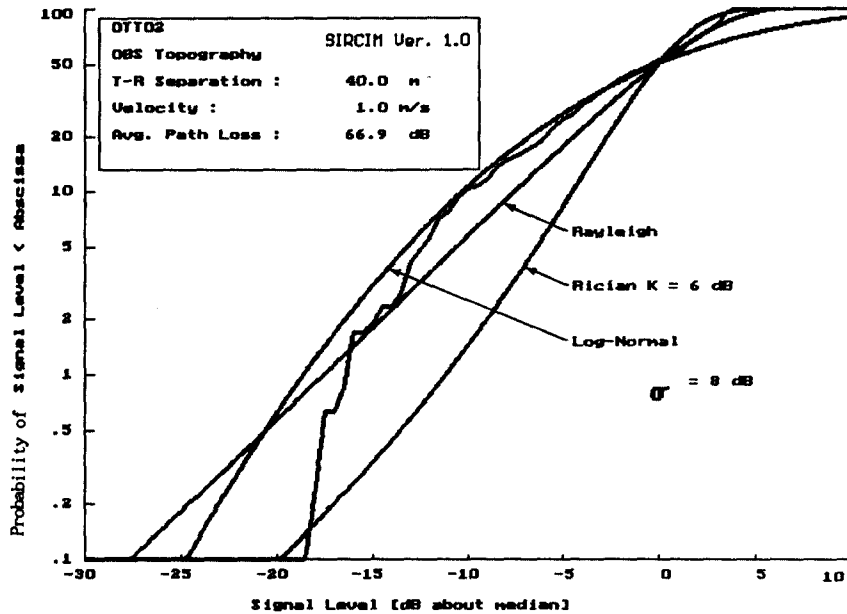


그림 11. 그림 9 경우의 국부 평균에 대한 좁은 범위 협대역 C.D.F

참 고 문 헌

1. A.A.M.Saleh and R.A.Valenzuela, "A statistical mode for indoor multipath propagation," IEEE J.Select Areas Commun., vol.SAC-5 pp.128-137, Feb. 1987.
2. A.S.Acampora, J.H.Winters, "A wireless network for wide-band indoor communications," IEEE J.Select Areas Commun., vol. SAC-5, pp.796-805, June.1987.
3. T.S.Rappaport, "Indoor radio communications for factories of the future," IEEE Commun. Mag., vol.25, pp.15-24, May. 1989.
4. D.M.J.Devasirvatham, "Multipath time delay spread in the digital portable radio environment," IEEE Commun. Mag., vol.25, pp.13-21, June 1987.
5. T.S.Rappaport, "Characterization of UHF multipath radio propagation inside factory buildings," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.37, pp.1058-1069, Aug. 1989.
6. T.S Rappaport, S.Y.Seidel and K.Takamizawa, "Statistical channel impulse response models for factory and open plan building radio communication system design," IEEE Trans. Commun., vol.39, pp. 794-807, May.1991.
7. W.C.Y.Lee, Mobile communications engineering, New York:McGraw-Hill, 1982.
8. G.L.Turin, F.D.Clapp, T.L.Johnson, S.B.Fine, and D. Lavry, "A statistical model for urban multipath propagation," IEEE Trans. Vehic. Technol., vol. VT-28, pp.1-9, Feb. 1972.
9. S.Y.Seidel, "UHF indoor radio channel models for manufacturing environments," Masters thesis in electrical engineering, Virginia Polytech. Inst. State Univ., Blacksbug VA, Aug. 1989.
10. T.S.Rappaport, "Radio channel modeling in manufacturing environments, Part 2 and 3," Intermediate Rep. Res. Comupt. Intergrated Design, Manufact., and Automat. Cent., Purdue Univ., Feb. 1989.



오창현

- 1988년 : 한국항공대학(공학사)
- 1990년 : 한국항공대학 대학원(공학석사)
- 1990년~현재 : 한진전자(주) 연구소
- 1991년~현재 : 한국항공대학 대학원
항공전자공학과 박사과정



조성준

- 1969년 : 한국항공대학(공학사)
- 1975년 : 한양대 대학원(공학석사)
- 1981년 : 오사카대 대학원(공학박사)
- 1969~1972년 : 해군기술장교
- 1972~현재 : 한국항공대학 교수