

도심지 마이크로 셀 환경에서의 단구간 페이딩 특성 분석

正會員 宋 棋 洪*, 金 鍾 昊*, 咸 泳 權*, 金 彩 英**

Analysis of Short-term Fading Characteristics in Urban Microcellular Environment

Ki Hong Song*, Jong Ho Kim*, Young Kwon Hahm*, Che Young Kim** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 도심지 마이크로 셀 환경에서의 수신신호에 대한 단구간 페이딩 분포 특성을 분석하였다. 페이딩 특성을 분석하기 위하여 거리별 페이딩 신호 분포, 전파의 도래 각에 따른 수신 전력 패턴 및 두 수신 안테나사이의 이격 거리에 따른 페이딩 신호의 공간적 상관특성을 보였다. 또한 여러 가지 경우에서의 Rician 파라미터 K를 구하여 페이딩 신호의 분포를 비교하였다.

분석 결과, 마이크로 셀에서는 송수신 거리에 따라 페이딩 발생 주기 및 변동폭이 다르게 나타났으며, 가시거리 영역에서 보다 비가시거리 영역에서 페이딩 신호의 발생 주기는 짧아지고 변동폭은 깊게 나타났다. 비교 분석에 이용된 데이터는 전파경로추적 방법(ray tracing technique)에 의한 시뮬레이션을 통하여 얻었다.

ABSTRACT

We analyze the short-term fading characteristics of received signal in urban microcellular environment. In order to analyze the fading signal, we obtain the fading distributions by distance, the received power pattern by arrival angle and the spatial correlation coefficients of fading signal by spacing distance between two antennas. In addition, we compare the distributions of simulated fading signal with the Rician parameter K in various conditions.

As the results, it can be seen that the occurring period of deep fade and fade range in microcell are different as the distance between two antennas; besides, the period of fade and fade range in OBS region occur shortly and deeply as compared with those in LOS region. The data used in analysis are obtained by the simulation program using ray tracing technique.

*한국전자통신연구원
**경북대학교 전자공학과
論文番號: 97195-0610
接受日字: 1997年 6月 10日

I. 서 론

최근 전파를 이용한 이동통신의 급격한 수요 증가는 기존의 이동통신 서비스 방식에 많은 변화를 요구한다. 특히 시스템 용량의 한계와 주파수 사용의 비효율성 때문에 매크로 셀 환경에서의 통신 서비스 방식에서 마이크로 셀 또는 피코 셀 단위로 줄어들고 있다. 이처럼 셀의 크기가 작아지고 기지국 안테나 높이가 낮아짐에 따라 송신파의 수신기 도달 경로가 변하여 수신신호의 페이딩 특성이 크게 달라진다. 즉, 경로손실 지수는 4승에서 2승으로 줄어들고, 장구간 페이딩에 영향을 주는 주변 지형, 지물 등도 달라질 뿐 아니라 다중 경로를 통한 수신신호의 위상 차에 의해 나타나는 단구간 페이딩의 발생 주기와 변동 폭에 대한 특성도 달라진다.

지금까지 많은 문헌에서 마이크로 셀에서의 전파 전파 현상에 대한 분석 결과들을 제시하고 있다^(1, 2, 3). 그러나 제시된 결과들은 대부분 경로 손실 및 표준편차 등으로서 단구간 페이딩 특성 분석은 상대적으로 부족하다. 수신 신호의 단구간 페이딩 특성에 대한 분석은 페이딩에 대한 마진(fade margin)을 결정 짓는 것 외에 적절한 다이버시티의 선택 등 시스템 설계의 기본 자료가 되므로 보다 세부적이고 다양한 페이딩 특성을 분석하여야 한다. 이러한 분석 결과는 기지국과 단말기의 출력, 위치 외에 전송 속도, 최대 채널 사용 수 등을 결정하는 요소로 작용하기 때문이다.

본 논문에서는 마이크로 셀에서의 수신전력 분포 및 다중경로 페이딩 특성에 대한 분석을 위하여 전파 경로추적 방법(ray tracing technique)을 이용한 시뮬레이션 결과를 이용하였다. 결과의 비교 분석을 위하여 각 환경에서의 페이딩 신호의 공간적 분포 특성, 도달 각에 따른 수신 전력 패턴 및 Rician 파라미터 K를 도출하였다. 또한 측정 결과를 이용하여 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

II. 마이크로 셀 환경

마이크로 셀 환경에서의 페이딩 신호는 매크로 셀에서의 신호 특성과 매우 다른 분포 특성을 가진다. 즉, 셀 크기가 작아지고 송수신 안테나의 높이가 낮아질 뿐 아니라 송신 출력의 감소 및 주위 환경의 변

화로 인한 전파 경로의 차이로 인하여 경로 손실은 거리의 자승에 반비례할 뿐 아니라 장구간 및 단구간 페이딩 특성 또한 매크로 셀에서의 그것과 매우 큰 차이를 가진다⁽⁴⁾. 이와 같이 마이크로 셀 환경에서는 주위 반사체의 분포 형태에 따라 매우 다른 특성을 갖는다.

그림 1은 전형적인 도심지 마이크로 셀 환경으로서 도로 양쪽을 따라 빌딩들이 배열되어 협곡 구조를 이루고 있으며, 대부분의 경우 송수신기 사이의 가시거리 경로가 존재하는 구조를 나타낸다. 이 경우 수신기에서의 수신전력은 직접파 외에 주로 도로지면 및 건물에 의한 반사 파들에 의해 결정된다. 이러한 반사 파들의 크기는 반사 횟수에 반비례하므로 많은 반사를 거친 반사 파는 수신전력에 영향을 미치지 못하고 5번 이하의 반사 횟수를 가진 다중경로전파들이 수신전력에 영향을 미친다⁽³⁾. 그림 1a)는 송수신기 사이의 거리가 짧은 경우 ray의 전파 경로를 나타내고, 그림 1b)는 비교적 먼 거리에서의 전파 경로를 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 송수신기 사이의 거리에 따라 전파의 도래 각(arrival angle)이 달라지는 것을 볼 수 있다.

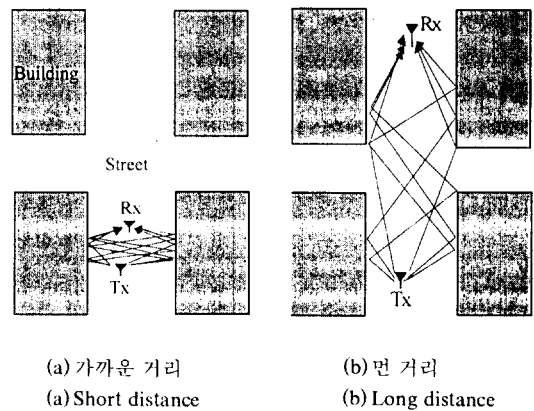


그림 1. 전형적인 마이크로 셀 환경

Fig. 1 Typical microcellular environment

그림 1에서 보는 바와 같이 이러한 구조에서 각 반사 파들은 도로 양쪽을 따라 잘 배열되어 있는 반사체들의 방향에 따라 반사되어 수신기에 도달하므로 제한된 방향으로의 도래 각을 가지고 있다. 이것은

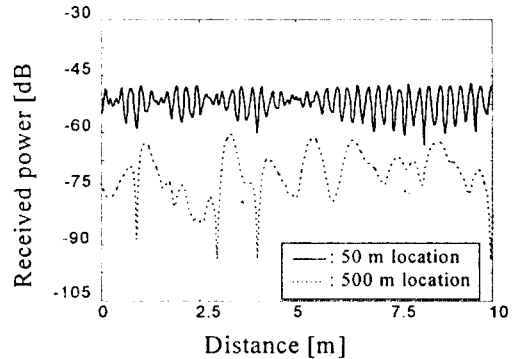
산란체가 랜덤하게 산재되어 있기 때문에 전파의 도달 방향이 모든 방향에 대해 일정하게 분포되어 있는 매크로 셀 환경과는 다른 분포 특성을 가진다⁽⁵⁾.

Ⅲ. 단구간 페이딩 신호 특성

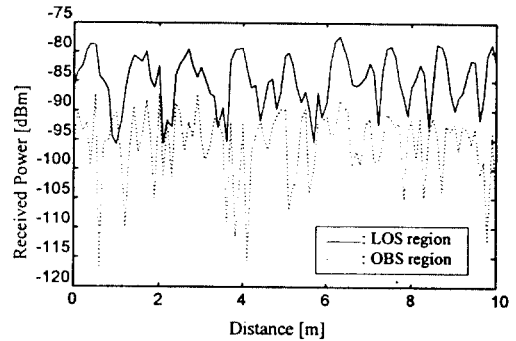
그림 2는 도로 양쪽을 따라 빌딩이 밀집한 협곡 구조에서의 페이딩 신호 특성을 보기 위하여 송수신 이격 거리가 서로 다를 때, 즉, 송신기로부터 50m와 500m 지점에서의 단구간 페이딩 신호(그림 2a)와 가시거리 및 비가시거리 영역에서의 신호 특성을 보기 위하여 송신기로부터 300m 떨어진 지점이 가시거리 및 비가시거리 영역인 경우에 대한 신호를 그림 2b에 나타낸다. 비 가시거리 영역에서의 신호는 건물 모서리에서 50m 떨어진 지점에서 얻은 결과이다. 계산에 이용된 송신 안테나 및 수신 안테나의 높이는 각각 10m, 2m이고, 사용 주파수는 1.9GHz로 설정하였다. 또한 주위 건물들의 높이는 30m로 하여 송수신안테나에 비해 매우 높게 설정하였다.

그림에서 보는 것처럼 협곡 구조에서의 페이딩 신호 분포 특성은 매크로 셀에서의 페이딩 특성과는 달리 거리에 따라 달라져 송수신기 사이의 거리가 페이딩 발생 주기 및 변동폭에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 우세파와 다중경로파의 상대적인 세기차에 반비례하는 페이딩 신호의 변동폭은 거리가 멀어지거나 비가시거리 영역에 있을 때 커지게 되며 또한 주로 송신 안테나의 높이가 주위 건물 보다 낮은 도심지 마이크로 셀 환경에서는 수신파의 도달 각이 제한을 받아 특정 방향으로 전파가 도달하므로 전파 경로에 따른 위상의 제한적 변화로 인하여 거리에 따라 신호의 변화 주기가 달라진다. 특히 송신기에서 멀리 떨어진 경우 더욱 느리게 변하는 위상 때문에 페이딩 발생 주기가 가까운 거리에 비해 느리게 나타남을 볼 수 있다. 그러나 비가시거리 영역에서는 크기가 유사한 다중 경로 반사파뿐 아니라 회절파도 신호 형태에 영향을 주어 발생주기가 짧아진다.

일반적으로 크기가 동일한 두 수신 파의 합에 의한 페이딩 신호의 크기가 같은 값을 가지기 위해서는 두 전파의 길이 차가 $n\lambda(n=1, 2, 3, \dots)$ 가 되어야 한다. 즉 그림 3에서 보는 바와 같이 도로를 따라 일직선 방향인 x 축상에 있는 송신기 Tx1으로부터 수신기 Rx



(a) 가시거리 영역내 50m 및 500m지점
(a) 500m location and 500m location in LOS region



(b)송신기로부터 300m 떨어진 가시거리 및 비가시거리 지점
(b)LOS and OBS region at 300m apart from the transmitting antenna

그림 2. 도심지 마이크로 셀 환경에서의 페이딩 신호
Fig. 2 Fading signal in urban microcellular environment

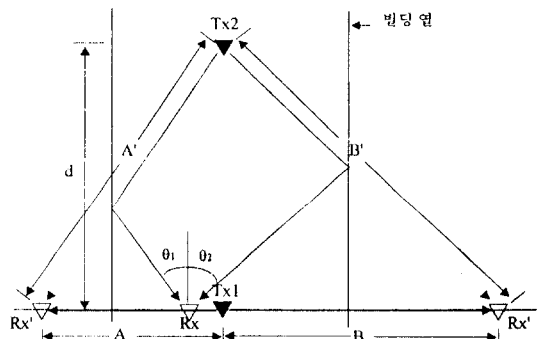


그림 3. 두 반사파의 경로 차
Fig. 3 Path difference between two reflected waves

의 영상점인 Rx'에 도달하는 두 전파경로 나타내는 A와 B에 의한 페이딩 발생 주기가 $\lambda/2$ 가 되기 위해서는 길이 차이가 λ 배가 되어야 한다.

따라서 반 파장의 페이딩 주기를 가지기 위해서는 $A - B = \lambda$ 가 되면 되나, 송신기가 Tx2인 경우 Rx' 도달 경로인 A' 및 B'의 경우 x축상에서 λ 만큼 차이가 나기 위해서는 $A = A' \sin \theta_1, B = B' \sin \theta_2$ 에서

$$A' \sin \theta_1 - B' \sin \theta_2 = \lambda \quad (1)$$

가 된다. 만일 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 인 경우

$$A' - B' = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (2)$$

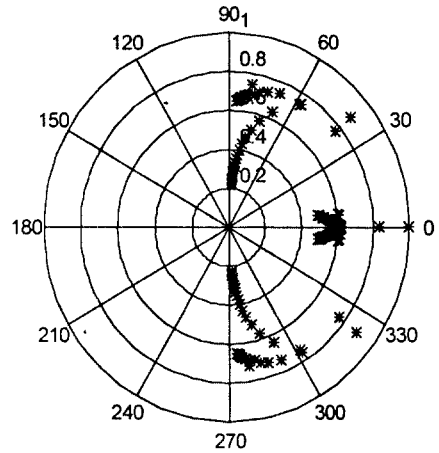
로 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 송수신 거리 d가 매우 가까운 경우 ($\theta \approx 90^\circ$) 길이 차이가 거의 λ 가 되므로 페이딩 주기가 $\lambda/2$ 가 되나 매우 멀리 떨어진 경우 ($\theta \approx 0^\circ$) 페이딩 주기가 거의 무한대로 된다. 따라서 페이딩 발생 주기가 거리에 따라 달라짐을 알 수 있다.

그림 4는 그림 1의 환경에서 도달 각에 따른 각 전파의 정규화 된 수신전력 패턴을 나타낸다. 그림 4a)는 송수신 사이의 거리가 50m인 한 지점에서 계산된 수신전력에 대한 도래 각 별 신호의 세기이고 그림 4b)는 500m 지점에서의 도래 각 별 신호세기를 나타낸다. 그림 4a)에서 보는 바와 같이 송수신 거리가 짧은 경우(50m) 상대적으로 큰 세기를 가진 전파의 도달 각이 직접파의 경로를 중심으로 -70° 와 70° 근처에 주로 분포하여 페이딩 발생 주기가 $\lambda/2$ 에 가까우나 그림 4b)에서 보는 것처럼 비교적 먼 거리(500m)에서는 -15° 에서 15° 사이에 많이 분포하여 약 2 λ 주기를 가지는 것을 그림 2에서 볼 수 있다. 또한 그림 2a)에서 큰 주기의 변동은 지면반사파에 의하여 생성된 것이다.

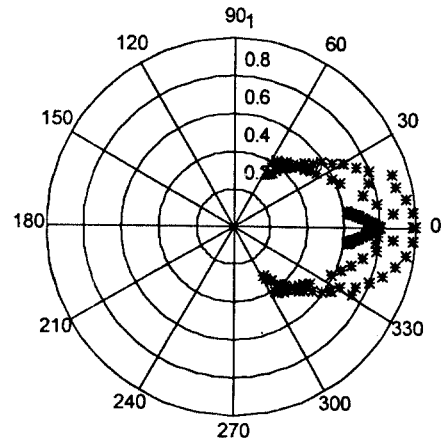
그림 2와 4에서 보는 것처럼 두 안테나 사이의 공간적 상관 특성은 일반 매크로 셀 환경과 달리 서로 독립인 신호를 얻기 위해서는 그림 5에서 보는 것처럼 상당히 큰 이격 거리가 요구됨을 알 수 있다.

그림 5는 식 (3)로 부터 구한 두 페이딩 신호 사이의 공간적 상관계수를 나타낸다.

$$\rho = \frac{\langle X_i Y_j \rangle - \langle X_i \rangle \langle Y_j \rangle}{\sqrt{\langle X_i^2 \rangle - \langle X_i \rangle^2} \cdot \sqrt{\langle Y_j^2 \rangle - \langle Y_j \rangle^2}} \quad (3)$$



(a) 50m 위치
(a) 50m location



(b) 500m 위치
(b) 500m location

그림 4. 송신 안테나로부터 50m와 500m에서의 수신전력 패턴

Fig. 4 The received power pattern at 50m and 500m location from transmitting antenna.

여기서 X_i, Y_j 는 공간적 이격 거리를 가지고 있는 페이딩 신호이며, $\langle \cdot \rangle$ 는 샘플 평균을 의미한다⁽⁵⁾. 식에 이용된 데이터는 기지국 안테나에서 수직편파를 가진 다이폴 안테나를 사용하여 신호를 송신한 경우 송신 안테나로부터 300m 떨어진 지점에서의 두 안테

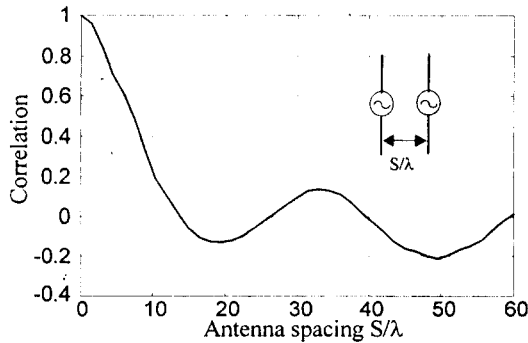


그림 5. 안테나 이격 거리에 따른 공간적 상관 계수
Fig. 5 Spatial correlation coefficient as the function of antenna spacing

나에 의한 수신전력 데이터를 이용하였다.

그림에서 보는 것처럼 두 신호 사이에 서로 독립적으로 되기 위해서는 이격 거리가 약 13λ 이상 되어야 하며, 400m 지점에서는 21λ 이상 되어야 한다. 이러한 결과는 매크로 셀 환경과는 달리 마이크로 셀 환경에서는 공간 다이버시티를 사용하기 어려움을 의미한다. 즉 매크로 셀 환경에서는 두 안테나 사이의 간격이 반 파장만 유지하면 서로 무관한 신호들을 수신할 수 있으나, 300m 떨어진 지점에서의 신호를 보면 약 2m 이상의 간격이 요구된다.

IV. 페이딩 신호의 분포 특성

가시거리 전파 경로와 같이 우세 파가 존재하는 환경에서의 단구간 페이딩의 분포 특성은 Rician 분포를 따른다. 따라서 대부분의 경우 가시거리 경로가 존재하는 마이크로셀 환경의 페이딩 신호 분포 특성은 Rician 분포를 이용하여 설명할 수 있다. 먼저 Rician 분포는 식(4)와 같이 표현되며, 누적 확률 분포는 식(5)와 같이 표현할 수 있다⁽⁶⁾.

$$f(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) & \text{for } (A \geq 0, r \geq 0) \\ 0 & \text{for } (r < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$P(R < r) = 1 - e^{-\left(\frac{A^2 + r^2}{2\sigma^2}\right)} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{A}{r}\right)^m \cdot I_m\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

여기서 A는 우세파의 크기를 뜻하고, σ 는 다중경로파의 표준편차를 나타내며 $I_0(\cdot)$ 는 변형된 제 일종 영차베셀 함수이다. 또한 Rician 파라미터 K는 식 (6)과 같이 계산하며 우세파에 대한 다중경로파의 비를 나타낸다⁽⁶⁾.

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (6)$$

식 (4)와 (6)에서 $A \rightarrow 0$ 로 되면 $K \rightarrow 0$ 로 되고 Rician 분포는 Rayleigh 분포로 되는 것을 볼 수 있다. 즉 우세파가 없이 모든 다중경로 페이딩 신호의 세기가 유사한 다중경로 전파 환경에서는 Rayleigh 분포를 따르며, K가 무한대로 되면 자유공간에서의 전파 특성을 나타내는 식이 된다.

마이크로 셀 환경에서 신호의 분포 특성을 분석하기 위하여 송신기로부터 300m 떨어져 있는 수신기가 가시거리(LOS) 영역에 있을 때 수신 페이딩 신호와 비가시거리(OBS) 영역에 있을 때의 페이딩 신호에 대한 각각의 누적분포와, 식 (5)의 A를 변화시켜 얻은 K 값 중에서 페이딩 신호의 누적 분포와 가장 유사한 분포 특성을 갖는 Rician 누적 분포를 서로 비교하여 그림 6에 나타내었다. 이때 식 (5)에 적용된 σ 는 페이딩 신호에서 우세파 성분을 제외한 나머지 다중경로 페이딩 신호에 대한 표준편차(σ)를 이용하였다.

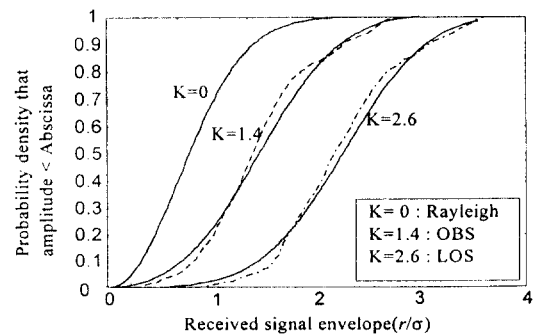


그림 6. LOS와 OBS지역에서의 페이딩 신호와 Rician 파라미터 K의 비교

Fig. 6 Comparison of Rician parameter K with distribution of fading signal in LOS and OBS region

그림에서 보는 바와 같이 가시거리 영역에서의 페이딩 신호의 분포는 $K=2.6$ 의 Rician 분포를 따르며, 비가시거리 영역에서의 신호 분포는 $K=1.4$ 의 분포를 따르는 것을 볼 수 있다. 이것은 수신기가 가시거리 영역에서 비가시거리 영역으로 이동함에 따라 직접 파와 같은 우세 파가 사라지게 되어 페이딩 신호의 분포는 Rician 분포에서 Rayleigh 분포로 접근하기 때문이다. 그러나 이러한 경우에 있어서도 $K=0$ 인 Rayleigh 분포를 따르는 매크로 셀 환경과는 달리 Rician 분포로 나타남을 알 수 있다. 또한 거리의 변화에 따른 K 의 변화를 비교하기 위하여 122m, 300m 및 1000m 지점에서 구한 K 를 그림 7에 나타내었다. 이 경우 직접파의 효과를 정확하게 분석하기 위하여 직접파와 지면 반사파의 합이 최대가 되는 각 지점을 선택하였다⁽³⁾.

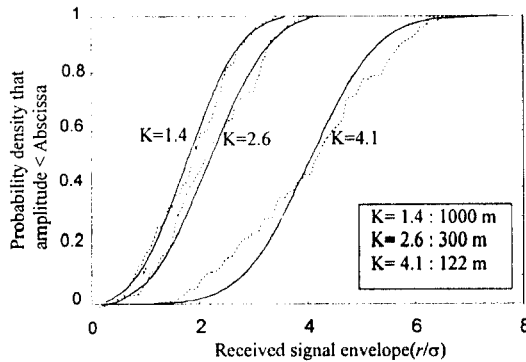


그림 7. 122m 지점, 300m 지점과 1000m 지점에서의 페이딩 신호와 Rician 파라미터 K 의 비교
Fig. 7 Comparison of Rician parameter K with distribution of fading signal at 122m, 300m and 1000m location

그림 7에서 보는 것처럼 K 는 거리가 멀어질수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 거리가 멀어질수록 직접파와 반사파사이의 경로 차가 줄어들어 K 가 작아지게 된다.

그림 8은 가시거리 및 비가시거리 영역에서 단구간 페이딩 신호의 변동 폭을 비교하기 위하여 레벨 교차율에 대한 누적분포를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 직접파가 존재하는 경우 신호의 변동 폭은 직접 파의 영향 때문에 직접 파가 없는 경우의 변동 폭보다 더욱 작게 된다.

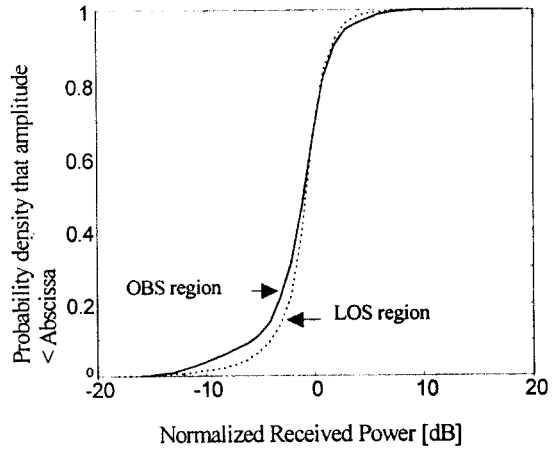


그림 8. LOS 및 OBS 지역에서의 단구간 페이딩의 레벨 교차율에 대한 누적확률분포 비교
Fig. 8 Comparison of CPD to level crossing rate of fading signal in LOS and OBS region

따라서 시스템 설계를 위한 페이드 마진(fade margin) 선택시 비가시거리 영역에서의 마진을 가시거리 영역에서의 마진에 비해 크게 설정하여야 함을 알 수 있다.

V. 결 론

마이크로 셀 환경에서의 통신 시스템에 큰 영향을 미치는 단구간 페이딩 분포 특성을 분석하였다. 페이딩 특성을 분석하기 위하여 거리별 페이딩 신호 분포, 전파의 도달 각에 따른 수신전력 패턴 등을 도출하였으며, 페이딩 신호의 상관 특성을 분석하기 위하여 두 수신 안테나 사이의 이적 거리에 따른 공간적 상관 특성을 얻었다. 또한 페이딩 신호의 분포 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 각 환경에 대한 Rician 파라미터 K 를 구하여 비교하였다.

분석 결과 마이크로 셀 환경에서 페이딩 신호의 발생 주기 및 변동폭은 송수신기 간 거리가 멀어짐에 따라 느리게 나타났으며, 가시거리 영역내에서 보다는 비가시거리 영역에 있을 때 발생주기는 짧아지고 변동폭은 크게 되어 매크로 셀에서의 신호 특성과 유사하였다. 또한 진파 도달각의 제한으로 인하여 매크로 셀에 비해 공간적 상관 특성이 매우 크게 나타나 공

간 다이버시티 이용이 곤란함을 알 수 있었다. 수신 신호의 분포 특성은 비가시거리 영역에서도 Rayleigh 분포를 따르지 않고 Rician분포를 따르는 것을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

1. S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, "A Ray Tracing Method for Predicting Path Loss and Delay Spread In Microcellular Environment," Proc. 42nd IEEE Veh. Tech. Conf., pp. 932-935, May 10-13, 1992.
2. Michael C. Lawton and J. P. McGeehan, "The Application of a Deterministic Ray Launching Algorithm for the Prediction of Radio Channel Characteristics in Small-Cell Environments," IEEE Trans. VT., Vol.-45, No. 4, Nov, 1994.
3. Howard H. Xia, Henry L. Berton, Leandro R. Maciel, Andrew Lindsay-Stewart, Robert Rowe, and Limond Grindstaff, "Radio Propagation Measurement and Modeling for Line-of-Sight Microcellular Systems," Proc. 42nd IEEE Veh. Tech. Conf., pp. 349-354, May 10-13, 1992.
4. Constantine A. Balanis., Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons. Inc., 1989.
5. William C. Jakes, Jr., Microwave Mobile Communication, John Wiley & Sons, Inc., 1974.
6. Raymond Steele, Mobile Radio Communications, IEEE Press New York, 1992.



宋 棋 洪(Ki Hong Song) 정회원
 1962년 10월 9일생
 1988년 2월:경북대 전자공학과(공학사)
 1990년 2월:경북대 대학원 전자공학과(공학석사)
 1995년 3월~현재: 경북대 대학원 전자공학과 박사과정
 1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 전파신호처리 연구실 선임연구원
 ※주관심분야: 이동통신, 무선통신



金 鍾 昊(Jong Ho Kim) 정회원
 1963년 8월 22일생
 1986년 2월:충남대 전자공학과 학사
 1988년 2월:충남대 전자공학과 석사
 1989년 2월~현재: 한국전자통신연구원 전파신호처리 연구실 선임연구원
 ※주관심분야: 이동전파전파, 이동통신용 안테나

咸 泳 權(Young Kwon Hahm) 정회원
 1958년 6월 12일생
 1980년 2월:연세대학교 전자공학과(공학사)
 1982년 2월:연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1996년 8월:연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1984년 3월~현재: 한국전자통신연구원 전파신호처리 연구실 선임연구원
 ※주관심분야: 디지털 이동통신, 무선통신

金 彩 英(Che Young Kim) 정회원
 1953년 3월 10일생
 1976년 2월:경북대학교 전자공학과(공학사)
 1978년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)
 1979년~현재: 경북대학교 전자공학과 교수