

마이크로셀룰라 이동 무선 시스템에서 Outage 확률을 이용한 라이시안 페이딩과 로그노말 새도우잉 영향에 관한 분석

The Analysis on the Effect of Rician Fading and Lognormal Shadowing in Microcellular Mobile Radio System Using Outage Probability

안치훈* · 김 남* · 박성균**

Chy-Hun An* · Nam Kim* · Sung-Gyun Park**

요 약

마이크로셀룰라 이동 무선 시스템의 전파환경은 레일라이, 라이시안 페이딩과 경로손실, 로그노말 새도우잉 등의 영향을 받는다. 이러한 복합적 환경에서 L 개의 라이시안 간섭 사이에서 수신된 라이시안 신호와 로그노말 새도우잉의 영향을 고려하여 재사용거리와 cluster 사이즈, 신호대 간섭의 전력비, 임계비(protection ratio) R_t 등 여러 파라미터에 대한 특성을 outage 확률을 이용하여 분석하였다. 또한 본 논문에서 이용한 outage 확률로 레일라이 신호와 단일 라이시안 간섭, 라이시안 신호와 레일라이 간섭, 라이시안 신호와 라이시안 간섭 등에 대해 연구하였다. 이론 전개와 시뮬레이션 결과를 통해 로그노말 새도우드 라이시안 채널의 특성을 효과적으로 분석하였다.

Abstract

The propagation environment is effected by Rayleigh fading, Rician fading, path loss and lognormal shadowing in microcellular mobile radio system. In these surroundings we analysed the performance on received Rician signals among L Rician interferers and the characteristics of lognormal shadowing for various parameters such as reuse distance, cluster size, signal to interference power ratio and protection ratio using outage probability. We also studied various channels -Rayleigh signal and Rician interferer, Rician signal and Rayleigh interferer, Rician signal and Rician interferer and so on using outage probability. The theoretical extention and computer simulation effectively analysed the characteristic of lognormal shadowed Rician channel.

I. 서 론

마이크로셀룰라 이동 무선 시스템의 전파환경은 경로손실, 송신된 신호와 랜덤한 장애물에 의한 다중경로 신호 분포인 레일라이 페이딩, 가시경로 신

* 충북대학교 정보통신공학과(Dept. of Computer & Communication Eng., Chungbuk National Univ.)

** 공주대학교 정보통신공학과(Dept. of Computer & Communication Eng., Kongju National Univ.)

· 논문 번호 : 970927-065

· 수정완료일자 : 1997년 11월 21일

호성분인 직접파와 간접파에 비해 우세한 경우에 영향을 받는 라이시안 페이딩, 이동국 전파의 수신 시 빌딩, 언덕, 나무 등과 같은 장애물에 의한 로그노말 새도우잉의 영향 등 다양한 형태로 나타난다. 따라서 독립적인 페이딩과 로그노말 새도우잉의 영향을 혼합한 채널모델이 다양하게 연구되고 있다^{[1]~[3]}.

직접 가지거리 신호요소가 셀내 통신에서 존재하고 간섭은 동일채널 셀 사이에서 존재하지 않을 수 있다는 가정하에 신호는 라이시안 페이딩의 영향을 받는 반면 동일채널간섭은 레일라이 페이딩의 영향을 받게 모델링하여 한 개나 복수의 레일라이 간섭에서 outage 확률이 유도 및 연구되었다^[1]. 또한 가지거리 간섭요소가 존재시 라이시안 간섭과 다중경로 레일라이 신호의 경우에서 간략화된 형태의 outage 확률이 연구되었다^[2].

방사전력이 20 mW이하이고 셀 반경이 0.4~2 km인 마이크로셀이나 방사전력이 수 mW이고 셀 반경이 20~400 m인 피코셀 시스템인 경우 동일채널 셀간의 거리가 멀지 않기 때문에 간섭신호는 방사전력이 0.6~10 W이고 셀 반경이 2~20 km인 매크로셀룰라 무선시스템에서의 거리보다 짧은 거리로부터 도달한다. 그러므로 가지경로 신호는 셀내에서 또는 동일채널 셀에서 존재할 수 있다. 이때 한 개의 라이시안 신호와 복수의 라이시안 간섭을 가정한 전파채널의 연구에서 outage 확률이 삼중무한급수의 복잡한 형태로 연구되었다^[3].

레일라이 페이딩, 라이시안 페이딩, 경로손실, 느린 로그노말 새도우잉 등 각각의 영향들을 포함하는 채널에서의 outage 확률에 대해 분석되었다^[4].^[5] 신호는 로그노말 새도우드 라이시안 페이딩의 영향을 받고 반면에 간섭은 로그노말 새도우드 레일라이 페이딩의 영향을 받도록 모델링하였다. 또한 로그노말 새도우드 라이시안 채널의 outage 확률이 적어도 신호 중 하나는 레일라이 분포를 한다고 가정하였다.

본 논문은 outage 확률을 이용하여 마이크로셀룰라 환경에서 신호와 간섭이 경로손실과 느린 로

그노말 새도우잉, 빠른 라이시안 페이딩의 영향을 받을 때에 대해 시뮬레이션 하였다. 그리고 레일라이 신호와 단일 라이시안 간섭, 라이시안 신호와 레일라이 간섭, 라이시안 신호와 라이시안 간섭 등 여러 채널을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 라이시안 페이딩만이 고려된 채널과 로그노말 새도우잉의 영향이 포함된 경우를 구분하여 재사용거리 D 와 cluster size C , Rice factor K , 임계비(Protection ratio) R , 로그노말 새도우잉, 활성 간섭 수 L 등 여러 파라미터에 대한 영향을 연구하였다.

II. 라이시안 페이딩환경에서 outage 확률

최근 이동통신 시스템의 가입자수가 급속히 증가하여 주파수 자원이 점점 한계에 달하고 있어서 주파수 재사용을 위한 셀룰라 이동 무선 시스템에 관심이 고조되고 있다. 이때 적당한 신호를 수신하는데 실패할 확률인 outage 확률은 주파수 재사용 평가의 중요한 수단이 된다.

마이크로셀룰라 이동 무선 시스템에서 outage 확률은 다음과 같은 네 가지의 경우에 대해 적당한 경로손실 법칙을 이용하여 표현할 수 있다.

- i) 라이시안+로그노말 새도우잉 신호와 레일라이+로그노말 새도우잉 간섭
- ii) 라이시안 신호와 레일라이+로그노말 새도우잉 간섭
- iii) 라이시안 신호와 레일라이 간섭
- iv) 신호와 간섭 모두 라이시안 페이딩

라이시안 페이딩 환경에서 outage 확률이 연구되었는데 삼중무한급수의 형태이기 때문에 매우 복잡한 형태로 표현되어 수치해석상 어려움이 있다^[3]. 따라서 이 절에서는 라이시안/라이시안 페이딩 채널에서 간결하게 표현할 수 있는 outage 확률을 얻고자 한다.

$X_k(k = 0, \dots, L)$ 를 평균값 m_k , 분산 σ_k^2 을 갖는 독립 복소가우시안 랜덤 변수의 집합이고 X_0 는 원하

는 신호를 표시하며 $\sum_{k=1}^L Y_k$ 는 L 개의 라이시안 간섭의 합이라 하자. L 개의 간섭에서 outage 확률은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^[7].

$$P(\text{outage} | L) = P_r(Y \leq 0) \quad (1)$$

이때

$$Y = Y_o - \sum_{k=1}^L Y_k \quad (2)$$

그리고 $k=1, \dots, L$, $Y_o = |X_o|^2$, $Y_k = R_k |X_k|^2$ 이고 R_k 는 신호대 간섭 임계비(protection ratio)이다. 식 (1)에서 주어진 $P(\text{outage} | L)$ 는 Y 의 확률밀도함수와 특성함수를 통해 나타낼 수 있다. $Y_k (k=0, \dots, L)$ 의 각각에 대한 특성함수는 다음과 같다.

$$F_k(w) = \frac{\exp(-\frac{wC_k}{1-w\beta_k})}{1-w\beta_k} \quad (3)$$

여기서 $k=0, \dots, L$, $C_o = |m_o|^2$, $\beta_o = \sigma_o^2$, $C_k = R_k |m_k|^2$, $\beta_k = R_k \sigma_k^2$ 이다. C_o, β_o 는 각각 라이시안 신호의 반사된 요소와 산란된 요소의 평균 전력이고 C_k, β_k 는 k 번째 간섭에 대한 반사된 요소와 산란된 요소의 임계비에 의해 곱해진 평균 전력이다. 모든 신호 X_k 는 독립적이라는 가정 하에 Y 의 특성함수 $F(w)$ 는 식 (4)와 같다.

$$F(w) = F_o(w) \prod_{k=1}^L F_k(-w) \quad (4)$$

만약 모든 간섭신호의 평균과 분산이 동일하고 즉, $m_k = m_i$, $\sigma_k^2 = \sigma_i^2$ 이고 각각에 대한 간섭신호의 Rice factor ($K_i = |m_i|^2 / \sigma_i^2$)가 같다면 특성함수는 다음과 같다.

$$F(w) = F_o(w) [F_k(-w)]^L \quad (5)$$

간섭신호의 합 $Y_i = \sum_{k=1}^L Y_k$ 의 확률밀도함수는 $[F_k(-w)]^L$ 의 역푸리에 변환으로 구할 수 있으며 그 결과는 아래와 같다^[6].

$$p_{Y_i}(Y_i) = \frac{1}{2\pi j} \int [F_k(w)]^L e^{-wY_i} dw = \begin{cases} \frac{1}{\beta_k} \left(\frac{Y_i}{LC_k}\right)^{(L-1)/2} \exp\left(-\frac{Y_i + LC_k}{\beta_k}\right) I_{L-1} \\ \left(\frac{2}{\beta_k} \sqrt{Y_i LC_k}\right), & Y_i > 0 \\ 0, & Y_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$L=1, k=0$ 일 때 원하는 신호 Y_o 의 확률밀도함수는 식 (6)에서 아래와 같이 구할 수 있다.

$$p_{Y_o}(Y_o) = \begin{cases} \frac{1}{\beta_o} \exp\left(-\frac{Y_o + C_o}{\beta_o}\right) I_0 \\ \left(\frac{2}{\beta_o} \sqrt{Y_o C_o}\right), & Y_o > 0 \\ 0, & Y_o < 0 \end{cases} \quad (7)$$

이 때 $I_m(x)$ 는 1종 m 차 근사화된 Bessel 함수이다. 식 (2)에서 정의한 Y 와 $p(Y)$ 의 확률밀도함수는 식 (6), (7)을 이용하여 구할 수 있는데 이때 outage 확률은 다음과 같다.

$$P(\text{outage} | L) = \int_{-\infty}^0 p(Y) dY = \int_{-\infty}^0 dY \int_0^{\infty} p_{Y_i}(Z) p_{Y_o}(Z+Y) dZ \quad (8)$$

식 (8)에서 $Y = \gamma - Z$ 로 치환하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(\text{outage} | L) &= \int_0^\infty \frac{1}{\beta_k} \left(\frac{Z}{LC_k} \right)^{(L-1)/2} \\
 &\exp\left(-\frac{Z+LC_k}{\beta_k}\right) I_{L-1}\left(\frac{2}{\beta_k} \sqrt{ZLC_k}\right) \\
 &\times \int_0^Z \frac{1}{\beta_o} \exp\left(-\frac{\gamma+C_o}{\beta_o}\right) \\
 &\times I_o\left(\frac{2}{\beta_o} \sqrt{\gamma C_o}\right) d\gamma dZ \quad (9)
 \end{aligned}$$

식 (10), (11)을 식 (9)에 대입하면 식 (12)와 같이 된다.

$$Z = \frac{\beta_k x^2}{2} ; \gamma = \frac{\beta_o y^2}{2} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 LC_k &= \frac{\beta_k a^2}{2} ; C_o = \frac{\beta_o b^2}{2} ; \\
 \gamma &= \sqrt{\frac{\beta_k}{\beta_o}} \quad (11)
 \end{aligned}$$

이 때 $a^2/2 = K_L L$, $b^2/2 = K_o$ 라 하면 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 P(\text{outage} | L) &= a^{-L+1} \int_0^\infty x^L \exp\left(-\frac{x^2+a^2}{2}\right) I_{L-1}(ax) \\
 &\times \int_0^{ax} y \exp\left(-\frac{y^2+b^2}{2}\right) I_o(by) dy dx \quad (12)
 \end{aligned}$$

이 이중적분은 라이시안/라이시안 페이딩 채널에서 식 (13)과 같이 새롭게 표현할 수 있다^[7].

$$\begin{aligned}
 P(\text{outage} | L) &= Q\left[\sqrt{\frac{2LK_L R_I}{b_1 + R_I}}, \sqrt{\frac{2K_o b_1}{b_1 + R_I}}\right] \\
 &+ \exp\left(-\frac{LK_L R_I + K_o b_1}{b_1 + R_I}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\times \sum_{m=0}^{L-1} \left(\frac{K_o R_I}{LK_L b_1}\right)^{m/2} I_m\left(\frac{\sqrt{4LK_L K_o b_1 R_I}}{b_1 + R_I}\right) \\
 &\times \left\{ \left(1 + \frac{b_1}{R_I}\right)^{-L} \sum_{k=m}^{L-1} \binom{L}{k-m} \left(\frac{b_1}{R_I}\right)^{-\delta_{mo}} \right\} \\
 & \quad m \geq 0 \quad (13)
 \end{aligned}$$

이 때 $b_1 = \sigma_o^2 / \sigma_I^2$, δ_{mo} 는 Kronecker delta이고 $m = 0$ 이면 $\delta_{mo} = 1$, $m \neq 0$ 이면 $\delta_{mo} = 0$ 이다. 그리고 Marcum의 Q 함수는 다음과 같다^[7].

$$\begin{aligned}
 Q(u, v) &= \int_v^\infty x \exp\left[-\frac{1}{2}(x^2 + u^2)\right] I_o(xu) dx \quad (14)
 \end{aligned}$$

식 (13)에서는 모든 간섭이 $k=1, \dots, L$ 일 때 동일 평균값 $m_k = m_l$ 를 갖는다고 가정했다. 모든 간섭이 서로 다른 평균 m_k 를 갖고 분산이 같다($\sigma_k^2 = \sigma_l^2$)고 가정하면, L 개 간섭의 Rice factor는 $k=1, \dots, L$ 일 때 $K_k = |m_k|^2 / \sigma_l^2$ 에 의해 서로 다른 값을 갖는다. 이러한 경우 식 (4) $F(w)$ 의 $\prod_{k=1}^L F_k(-w)$ 부분에서 $k=1, \dots, L$ 인 경우 파라미터 $C_k = R_I |m_k|^2$ 도 L 개 간섭의 각각의 평균에 관계되기 때문에 서로 다르게 됨을 알 수 있다. 결과적으로 식 (13)에서 다음과 같은 채널의 경우를 표현할 수 있다.

- i) 레일라이 신호와 단일 라이시안 간섭
 식 (13)에서 $L=1$, $K_o=0$ 이라 하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다^[2].

$$\begin{aligned}
 P(\text{outage} | L) &= 1 - \frac{b_1}{R_I + b_1} \exp\left[\left(-\frac{K_I R_I}{R_I + b_1}\right)\right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

- ii) 라이시안 신호와 상호 독립적인 L 개의 레일라이 간섭
 레일라이 간섭에서, 즉 $K_I=0$ 일 때 식 (13)은 다음과 같이 변형된다.

Ⅲ. 로그노말 새도우잉의 영향

$$P(\text{outage} | L) = \left(-\frac{K_o b_1}{b_1 + R_I} \right) \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{k=m}^{L-1} \binom{k}{k-m} \left(\frac{b_1}{R_I + b_1} \right)^k \left(\frac{R_I}{R_I + b_1} \right)^m \left(\frac{2K_o R_I}{R_I + b_1} \right)^m \left(\frac{1}{2^m \cdot m!} \right)^m \quad (16)$$

식 (16)을 다시 정리하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다^[1].

$$P(\text{outage} | L) = \exp\left(-\frac{K_o b_1}{R_I + b_1} \right) \left(\frac{R_I}{R_I + b_1} \right) \sum_{k=0}^{L-1} \left(\frac{b_1}{R_I + b_1} \right)^k \sum_{m=0}^k \binom{k}{k-m} \frac{1}{m!} \left(\frac{K_o R_I}{R_I + b_1} \right)^m \quad (17)$$

iii) 라이시안 신호와 단일 레일라이 간섭

식 (13)에서 $L=1$, $K_I=0$ 라하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다^[1].

$$P(\text{outage} | L) = \frac{R_I}{R_I + b_1} \exp\left(-\frac{K_o b_1}{R_I + b_1} \right) \quad (18)$$

iv) 라이시안 신호와 단일 라이시안 간섭

식 (13)에서 $L=1$ 이라 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P(\text{outage} | L) = Q \left[\sqrt{\frac{2K_I R_I}{R_I + b_1}}, \sqrt{\frac{2K_o b_1}{R_I + b_1}} \right] - \frac{b_1}{R_I + b_1} \exp \left[-\frac{K_I R_I + K_o b_1}{R_I + b_1} \right] I_o \left(\frac{\sqrt{4K_I K_o R_I b_1}}{R_I + b_1} \right) \quad (19)$$

수 백 m 범위 내에서 각 신호의 느리게 변화하는 국부 평균 전력 p_{lk} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$p_{lk} \begin{cases} (K_o + 1)\sigma_o^2 : \text{원하는 신호에 대해 } k=0 \text{인 경우} \\ (K_I + 1)\sigma_I^2 : L \text{개 간섭에 대해 } k=1, \dots, L \text{인 경우} \end{cases} \quad (20)$$

이러한 p_{lk} 는 로그노말 분포로 모델링될 수 있다.

$$L(\mu_{nk}, \sigma_{nk}^2) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{nk} p_{lk}} \exp \left[-\frac{(\ln p_{lk} - \mu_{nk})^2}{2\sigma_{nk}^2} \right], & p_{lk} > 0 \\ 0, & p_{lk} < 0, k=0, \dots, L \end{cases} \quad (21)$$

σ_{nk} 는 로그노말 분포된 p_{lk} 의 표준편차이고 $\mu_{nk} = 3 \ln p_{ak}$ 의 p_{ak} 는 k 번째 근사화된 지역 평균 power이다. 수신지역까지의 범위 r_k 에 따라 경로 손실특성에 의존하는 지역 평균 전력 p_{ak} 는 다음과 같다.

$$p_{ak} = r_k^{-\beta} \quad (22)$$

β 는 경로손실 factor이다. 또한 식 (21), (22)에서 $k=0$ 는 원하는 신호를 표시하고 반면에 $k=1, \dots, L$ 은 L 개 간섭을 표시하며 첨자 n 은 자연수를 나타낸다. 신호의 국부평균 power는 로그노말 분포 $L(\mu_{no}, \sigma_{no}^2)$ 로 가정하는데 간단하게 모든 간섭은 수신단까지 동일 거리에 있다($r_k = r_I$)고 본다. 새도우잉은 국부 효과이기 때문에 즉, 이동체 근처에서 지형의 함수이기 때문에 각 L 개 간섭의 국부 평균 power는 로그노말 분포 $L(\mu_{nl}, \sigma_{nl}^2)$ 로 분포된다고 가정하는 것이 바람직하다. 랜덤변수 S 는 아래와 같이 신호의 국부 평균 전력대 단일 간섭의 국부 평균 전력 비(local mean signal power to local

mean one interferer power ratio)로 정의한다.

$$S = \frac{p_{to}}{p_{tk}} = \frac{(1+K_o)\sigma_o^2}{(1+K_I)\sigma_I^2} = \frac{(1+K_o)}{(1+K_I)} b_1 \quad (23)$$

식 (13)에서 나타낸 것처럼 $b_1 = \sigma_o^2 / \sigma_I^2$ 이다.

$(1+K_o)\sigma_o^2$ 와 $(1+K_I)\sigma_I^2$ 이 각각 $L(\mu_{no}, \sigma_{no}^2)$ 와 $L(\mu_{ni}, \sigma_{ni}^2)$ 처럼 독립 랜덤변수이기 때문에 S 의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$L(\mu_{nT}, \sigma_{nT}^2) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{nT}S} \exp\left[-\frac{(1nS - \mu_{nT})^2}{2\sigma_{nT}^2}\right], & S > 0 \\ 0, & S < 0 \end{cases} \quad (24)$$

이 때 $\mu_{nT} = \mu_{no} - \mu_{ni} = -\ln r_o^\beta + \ln r_I^\beta$, $\sigma_{nT}^2 = \sigma_{no}^2 + \sigma_{ni}^2$ 이다.

로그노말 새도우잉을 갖는 outage 확률은 식 (13)을 이용하여 구할 수 있다. 식 (24)를 이용해서 변수 S 의 값에 따른 확률을 $P(\text{outage}|L, S)$ 로 표현한다면 로그노말 새도우드 라이시안 채널에 대한 outage 확률은 식 (25)와 같다.

$$P_I(\text{outage} | L) = \int_0^x P(\text{outage} | L, S) L(\mu_{nT}, \sigma_{nT}^2) dS \\ = \int_0^x P(\text{outage} | L, S) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{nT}S} \\ \exp\left(-\frac{\ln^2\left[S\left(\frac{\gamma_o}{\gamma_I}\right)^\beta\right]}{2\sigma_{nT}^2}\right) ds \quad (25)$$

첨자 l 은 로그노말한 경우를 나타낸다. 이 식은 대수주기 적분변수인 식 (26)을 식 (25)에 대입하여 더욱 간단히 표현할 수 있다.

$$y^2 = \frac{\ln^2\left[S\left(\frac{\gamma_o}{\gamma_I}\right)^\beta\right]}{2\sigma_{nT}^2} \quad (26)$$

이 때 간략화된 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_I(\text{outage} | L) = \int_{-x}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \\ P(\text{outage} | L, S(y, \beta)) \exp(-y^2) dS \quad (27)$$

$S(y, \beta)$ 는 식 (26)에서 표현된 것처럼 y 와 β 에 관계되는 S 를 나타낸다. 식 (27)에서 outage 확률 $P_I(\text{outage} | L, S)$ 은 또한 β 에 대해 독립이다.

IV. 로그노말 새도우드 라이시안 페이딩 채널에서 전체 outage 확률

주어진 셀 내에서 동일채널간섭이 활성적인지 아닌지에 대한 상태가 Bernoulli 확률밀도함수에 의해 표현되었다³⁾. 동일채널간섭이 통계적으로 독립적이고 이상적으로 분포되며 가장 가까운 6개의 동일채널셀을 고려한다면 L 개의 동일채널간섭이 활성적인 확률 $P(L)$ 은 이항분포에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(L) = \binom{6}{L} p^L (1-p)^{6-L}, \quad L = 0, 1, \dots, 6. \quad (28)$$

모든 셀이 동일 수의 주파수 채널 N ,와 동일 블로킹 확률 B 를 갖는다면 $p = B^{1/N}$,와 $P(L)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(L) = \binom{6}{L} B^{L/N} (1-B^{1/N})^{6-L}, \\ L = 0, 1, \dots, 6. \quad (29)$$

이 때의 L 은 랜덤변수이다. 따라서 마이크로셀룰라 시스템에서 전체 outage 확률은 다음과 같이 정의된다.⁷⁾

$$P(\text{outage}) = \sum_{L=1}^6 P(\text{outage} | L) P(L) \quad (30)$$

따라서 라이시안 페이딩만이 있는 채널의 경우에서의 전체 outage 확률은 식 (30)에 식 (13)과 식 (29)를 대입하고 로그노말 새도우잉이 포함되는 경우에서의 전체 outage 확률은 식 (30)에 식 (27)과 식 (29)를 대입하여 구할 수 있다.

V. 재사용거리와 cluster size

재사용거리 D 는 가장 가까운 동일채널셀간 중심 사이 거리 d 와 셀 반경 R 의 비로써 정의된다. 라이시안 페이딩만이 있는 환경에서 원하는 신호(= $K_o \sigma_o^2$)의 반사요소와 간섭(= $K_I \sigma_I^2$)의 반사요소의 평균 power와 관계가 있다. 따라서 재사용거리 D 는 다음과 같이 정의할 수 있다^[7].

$$D = \frac{d}{R} = 1 + \left(\frac{K_o \sigma_o^2}{K_I \sigma_I^2} \right)^{1/\beta} \\ = 1 + \left(\frac{K_o}{K_I} b_1 \right)^{1/\beta} \quad (31)$$

식 (31)을 b_1 에 대해 다시 정리하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$b_1 = \frac{K_I}{K_o} (D-1)^\beta \quad (32)$$

따라서 재사용거리 D 의 함수로써 outage 확률을 표현할 수 있다. 원하는 신호와 간섭에 대한 로그노말 새도우잉의 영향에서 재사용거리는 지역 평균 power에 기초로 하여 결정된다. 그러므로 재사용거리 D 는 식 (33)과 같이 원하는 터미널 r_o 와 간섭 터미널 r_I 의 거리에 대한 비에 관계된다.

$$D = \frac{r_I + r_o}{r_o} = 1 + \left(\frac{r_I}{r_o} \right) \quad (33)$$

중앙셀 주위로 cluster size C 를 형성하는 육각형 셀을 가정하면 C 는 재사용거리 D 에 관계가 있다.

$$C = \frac{D^2}{3} \quad (34)$$

이 때 $C = (i+j)^2 - ij$ 이고 i 와 j 는 양의 정수이다. 이 관계는 주어진 동작조건하에서 요구되는 cluster size C 를 결정하기 위해 식 (31)과 식 (33)의 결과와 더불어 이용될 수 있다.

VI. 시뮬레이션 및 결과분석

그림 1과 2는 아래와 같이 정의되는 원하는 신호 전력대 간섭 전력 비(signal to interference power ratio : SIR)에 대한 outage 확률을 나타낸 것이다.

$$SIR = \frac{(K_o + 1)\sigma_o^2}{L(K_I + 1)\sigma_I^2} = \frac{(K_o + 1)}{L(K_I + 1)} b_1 \quad (35)$$

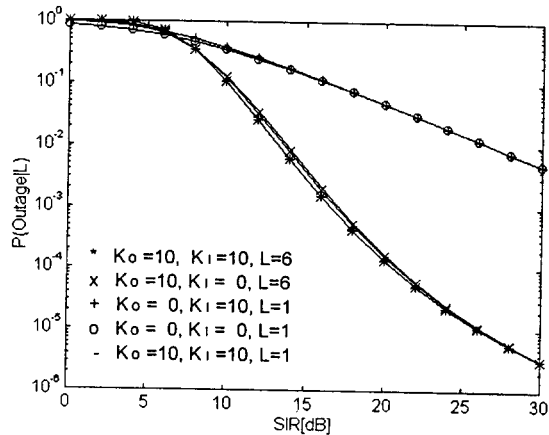


그림 1. 라이시안 페이딩 채널에서 신호대 간섭 전력의 비(SIR)에 대한 Outage 확률 ($R_I=5$)

Fig. 1. Outage probability on signal to interference power ratio SIR in Rician fading channel ($R_I=5$).

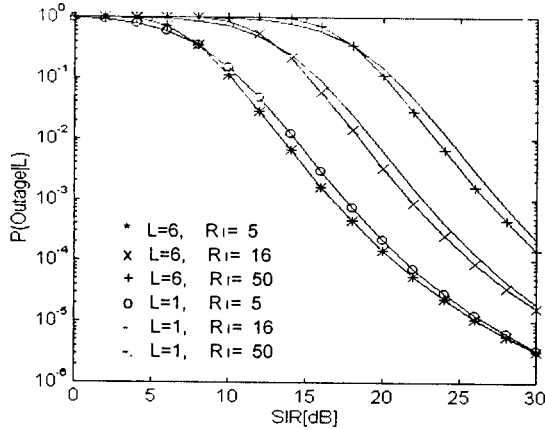


그림 2. 라이시안 페이딩 채널에서 신호대 간섭전력의 비(SIR)에 대한 Outage 확률($K_o = 10, K_I = 5$)

Fig. 2. Outage probability on signal to interference power ratio SIR in Rician fading channel ($K_o = 10, K_I = 5$).

주어진 SIR 과 K_o, σ_o^2, K_I 에 대해 단일 간섭과 복수 간섭의 그림을 비교할 때 $L\sigma_o^2$ 의 값은 고정되기 때문에 L 값이 커질수록 σ_o^2 값은 작아진다. 이것은 단일 간섭의 전력이 L 개의 간섭사이에서 분포됨을 의미한다. 그림 1에서는 $R_I = 5$ (7 dB), 여러 개의 K_o, K_I, L 값에 따른 outage 확률을 나타내었다. SIR이 8~30 dB에서 K_o, K_I 의 값은 $P(outage | L)$ 에 큰 영향을 미치지 않았음을 알 수 있으며 $K_o = K_I = 10$ 에서 $L = 1$ 과 $L = 6$ 인 경우를 비교하면 단일 간섭의 power가 L 개의 간섭 사이에서 분포될 때 더 낮은 $P(outage | L)$ 이 됨을 알 수 있다.

그림 2는 $K_o = 10, K_I = 5$ 에서 여러 R_I 와 L 의 영향에 대해 나타내었다. R_I 가 증가할수록 outage 확률이 증가되고 그림 1과 마찬가지로 L 이 커짐에 따라 단일 간섭의 전력이 L 개의 간섭사이에서 분포되어 outage 확률이 작아짐을 알 수 있다. 그러나 SIR을 식 (23)에서 정의된 S 의 함수에 따라 나타내면 L 의 증가와 함께 $P(outage | L)$ 도 증가함을 그림 3에서 볼 수 있다. 이것은 L 개 간섭이 있고 전

체 간섭 power가 L 배 크다는 것을 의미한다.

그림 4는 파라미터로서 임계비 R_I 와 K_o, K_I 를 이

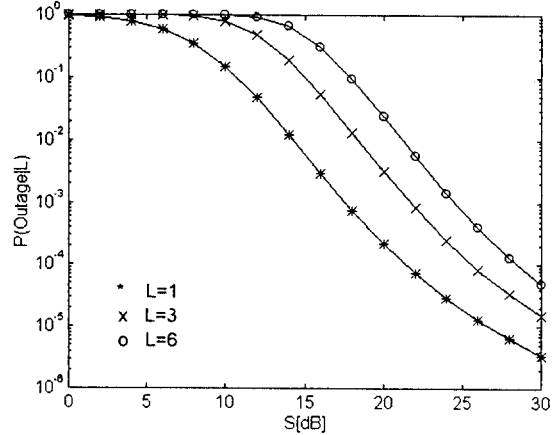


그림 3. 라이시안 페이딩 채널에서 국부 평균 신호대 국부 평균 간섭 전력의 비(S)에 대한 Outage 확률($K_o = 10, K_I = 5, R_I = 5$)

Fig. 3. Outage probability on local mean signal to local mean interference power ratio S in Rician fading channel ($K_o = 10, K_I = 5, R_I = 5$).

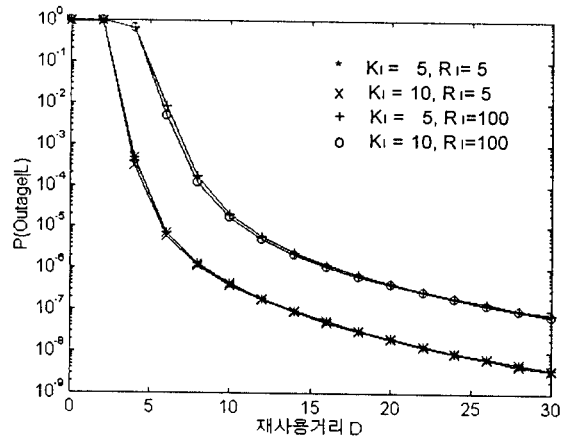


그림 4. 라이시안 페이딩 채널에서 재사용거리에 대한 outage 확률 ($K_o = 10, L = 1$)

Fig. 4. Outage probability on reuse distance in Rician fading channel ($K_o = 10, L = 1$).

용하여 셀 경계가 $r_s=R$ 인 경우 재사용거리 D 의 함수로 나타낸 것이다. $P(\text{outage} | L)$ 를 작게 하기 위해서 재사용거리를 멀리해야 함을 보이고 있고 K_I 값 7 dB와 10 dB를 비교할 때 7 dB에서 다소 $P(\text{outage} | L)$ 이 크고 임계비 R_I 가 커짐에 따라 $P(\text{outage} | L)$ 이 증가함을 볼 수 있다.

그림 5는 파라미터로써 K_o, K_I, D 주파수 채널 수 N_s , 블로킹 확률 B 를 이용하여 임계비 R_I 대한 함수로 $P(\text{outage})$ 를 나타낸 것이다. $P(\text{outage})$ 를 작게 하기 위해서는 임계비 R_I 가 작아야 함을 보이고 있다. 그리고 K_I 의 증가로 전체 outage 확률은 감소함을 알 수 있다.

그림 6은 그림 5의 결과를 파라미터로써 R_I, K_o, K_I, N_s , 블로킹 확률 B 를 이용하여 cluster size C 에 대한 $P(\text{outage})$ 확률을 나타낸 것이다. 이 결과는 식 (34)에서 처럼 C 와 D^2 의 관계에 따라 나타내었다.

4승 경로 손실 법칙의 가정하에서 outage 확률에 대한 로그노말 새도우잉의 영향을 그림 7~9에 나

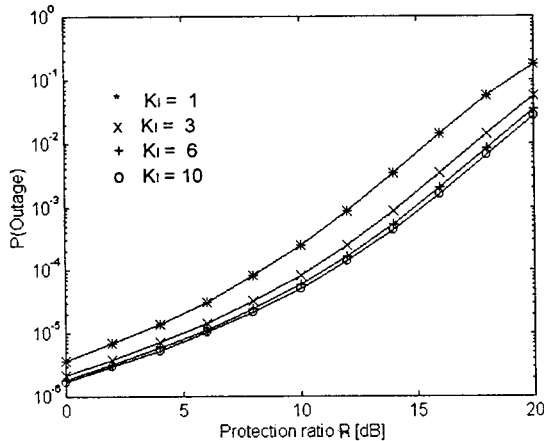


그림 5. 라이시안 페이딩 채널에서 임계비에 대한 전체 outage 확률 ($K_o=10, B=0.01, N_s=10, D=7$).

Fig. 5. Total outage probability on protection ratio in Rician fading channel ($K_o=10, B=0.01, N_s=10, D=7$).

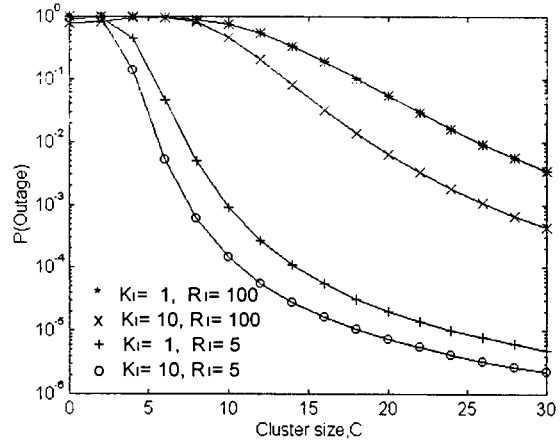


그림 6. 라이시안 페이딩 채널에서 cluster size에 대한 전체 outage 확률 ($K_o=10, B=0.01, N_s=10$).

Fig. 6. Total outage probability on cluster size in Rician fading channel ($K_o=10, B=0.01, N_s=10$).

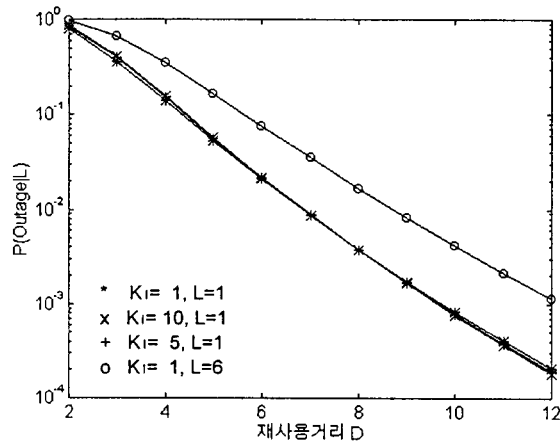


그림 7. K_I 의 변화에 따른 로그노말 새도우잉 라이시안 채널에서 재사용거리에 대한 outage 확률 ($K_o=10, R_I=10, \sigma_{no}=\sigma_{nl}=6$ dB).

Fig. 7. Outage probability on reuse distance in lognormal shadowed Rician fading channel according to various K_I ($K_o=10, R_I=10, \sigma_{no}=\sigma_{nl}=6$ dB).

타내었다. 그림 7은 로그노말 새도우드 라이시안 페이딩 채널에서의 재사용거리 D 에 대한 $P(\text{outage} | L)$ 를 나타내었다. 새도우잉이 원하는 신호와 간섭에서 6 dB($\sigma_{no} = \sigma_{ni} = 1.38$)이고 임계비 $R_t = 10$ dB로 가정하였을 때 특정한 재사용거리에서 $L = 6$ 인 경우가 $L = 1$ 인 경우보다 $P(\text{outage} | L)$ 이 크다는 것을 알 수 있다. $L = 1$ 인 경우 $P(\text{outage} | L)$ 은 재사용거리 D 가 클수록 작아짐을 볼 수 있고 $L = 6$ 인 경우에서 $P(\text{outage} | L)$ 은 K_i 의 값에 의해 영향이 적음을 알 수 있다.

그림 8은 그림 7과 마찬가지로 로그노말 새도우드 라이시안 페이딩 채널에서의 재사용거리 D 에 대한 $P(\text{outage} | L)$ 를 나타내었다. 새도우잉이 원하는 신호와 간섭에서 6 dB($\sigma_{no} = \sigma_{ni} = 1.38$)이고 $R_t = 10$ dB, $K_t = 10$ dB일 때 K_o 와 L 값의 변화에 따른 결과를 보여주고 있다. $L = 1$ 인 경우 $P(\text{outage} | L)$ 은 재사용거리 D 가 클수록 작고 $K_o = 1$ 에서 비교적 outage 확률이 큼을 보이고 있으며 $L = 6$ 인 경우 $P(\text{outage} | L)$ 은 K_o 의 값에 의해

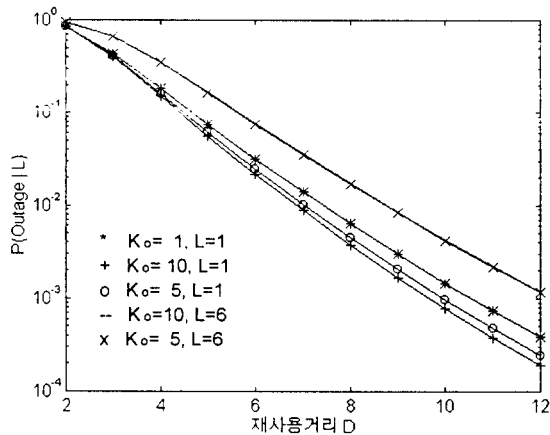


그림 8. K_o 의 변화에 따른 로그노말 새도우드 라이시안 채널에서 재사용거리에 대한 outage 확률($K_t = 10$, $R_t = 10$, $\sigma_{no} = \sigma_{ni} = 6$ dB).

Fig. 8. Outage probability on reuse distance in lognormal shadowed Rician fading channel according to various K_o ($K_t = 10$, $R_t = 10$, $\sigma_{no} = \sigma_{ni} = 6$ dB).

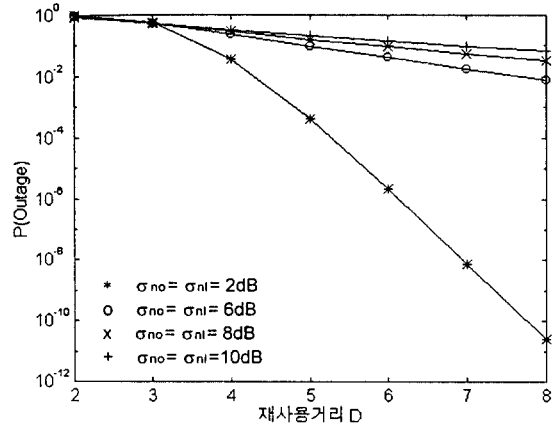


그림 9. 새도우잉 확산 변화에 따른 로그노말 새도우드 라이시안 채널에서 재사용거리에 대한 전체 outage 확률 ($K_o = 10$, $K_t = 5$, $R_t = 5$, $B = 0.1$, $N_s = 10$).

Fig. 9. Total outage probability on reuse distance in lognormal shadowed Rician fading channel according to various shadowing spread ($K_o = 10$, $K_t = 5$, $R_t = 5$, $B = 0.01$, $N_s = 10$).

영향이 적음을 나타내고 있다.

그림 9는 $R_t = 7$ dB, $K_o = 10$ dB, $K_t = 7$ dB, $N_s = 10$, 블로킹 확률 $B = 0.01$ 일 때 $P(\text{outage})$ 에 대해서 새도우잉 확산($\sigma_{no} = \sigma_{ni}$ 인 경우)의 영향을 비교하였다. 새도우잉 확산의 값이 증가하면 특정한 재사용거리 D 에서 $P(\text{outage})$ 역시 증가함을 볼 수 있는데 이 결과로 outage 확률에 새도우잉 확산의 값이 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 본 논문에서는 β 가 4인 가정 하에 outage 확률을 나타내었다. 하지만 최근 연구동향을 보면 β 의 값은 거리에 따른 조건하에서 다양하다.

로그노말 새도우드 라이시안 채널에서의 outage 확률은 식 (13)과 식 (27)에 의해 계산할 수 있고 전체 outage 확률은 식 (13)과 식 (27), 식 (30)에 의해 구할 수 있다. 그리고 로그노말 새도우드 라이

시안 채널에서 모든 라이시안 간섭의 Rice factor가 이상적이고 그들의 국부 평균 power가 이상적인 로그노말 특성을 갖으며 L 개의 간섭은 수신단으로부터 동일거리에 있다는 가정 하에서 결과를 얻었다. 일반적으로 이러한 가정이 이상적이지는 않지만 상대적으로 셀 반경이 동일채널셀 사이의 거리와 비교하여 작을 때 이 가정은 타당하다고 할 수 있다.

Ⅶ. 결 론

본 논문은 마이크로셀룰라 이동 무선 시스템에서 라이시안 페이딩만이 있는 채널과 로그노말 새도우드 라이시안 채널에서 outage 확률을 이용하여 재사용거리와 cluster 사이즈, 신호대 간섭의 전력비, 임계비 R_t 등 여러 파라미터들의 영향에 대해 연구 분석하였다. 라이시안 페이딩 채널에서 임계비 $R_t = 7$ dB인 경우 신호대 간섭 전력의 비 SIR이 6 dB이상에서 outage 확률이 작아졌고 임계비 R_t 값이 7 dB, 20 dB일 때 재사용거리 D 가 3이상에서 outage 확률이 현저히 작아졌다. 따라서 SIR을 크게하고 재사용거리 D 를 멀리 할수록 간섭이 적음을 알 수 있다. 하지만 지나치게 재사용거리를 멀리하면 cluster 당 셀 수가 많아져서 주파수 재사용 효율을 저하시킨다. 따라서 재사용거리와 효율 사이에 trade-off가 있어야 한다. 또한 cluster size C 가 작으며 임계비가 클 때 outage 확률이 증가함을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있다.

로그노말 새도우드 라이시안 채널에서 $\sigma_{no} = \sigma_{ni} = 1.38$ (6 dB)인 경우 K_s 와 K_o 의 변화에는 outage 확률이 크게 변화하지 않았지만 재사용거리 D 가 3이상에서 새도우딩 확산의 값이 커짐에 따라 outage 확률이 매우 증가함을 알 수 있다. 따라서 로그노말 새도우드 라이시안 채널에서는 새도우딩 확산이 outage 확률에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

연구에서 이용한 outage 확률로 레일라이 신호와 단일 라이시안 간섭, 라이시안 신호와 레일라이

간섭, 라이시안 신호와 라이시안 간섭 등의 채널과 특히 로그노말 새도우드 라이시안 채널의 특성을 효과적으로 분석할 수 있음을 계산과 시뮬레이션을 통해 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] Y. D. Yao and A. U. G. Sheika, "Outage probability analysis for microcell mobile radio systems with co-channel interferers in Rician /Rayleigh fading environment," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 13, pp. 864-866, June 1990.
- [2] J. R. Haug and D. R. Ucci, "Outage probability of microcellular radio systems in a Rayleigh /Rician fading environment," *Conf. Rec. Int. Conf. Comm., ICC '92*, pp. 312. 4. 1-312. 4. 5., 1992.
- [3] R. Muammar, "Co-channel interference in microcellular mobile radio system," *IEEE Veh. Tech. Conf.* pp. 198-203., 1991.
- [4] R. Prasad and A. Kegel, "Effects of Rician faded and lognormal shadowed signals on spectrum efficiency in microcellular radio," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 42, pp. 274-281, Aug. 1993.
- [5] M. D. Austin and G. L. Stuber, "Exact cochannel interference analysis for lognormal shadowed Rician fading channels," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 748-749, May 1994.
- [6] G. A. Campbell and R. M. Foster, *Fourier integrals for practical applications*, New York:Van Nostrand, 1957.
- [7] T. T. Tjhung, C. C. Chai, and X. Dong, "Outage probability for lognormal shadowed Rician channels," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 46, no. 2, pp. 400-407, May

1997.

- [8] R. C. French, "The effect of fading and shadowing on channel reuse in mobile radio," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 28, pp. 171-181, Aug. 1979.
- [9] M. D. Yacoub, *Foundations of mobile radio engineering*, CRC Press, 1993.
- [10] 강창언, 강민구, 김남, 조형래 공저, *셀룰라 이*

동통신 공학, 복두출판사, 1997.

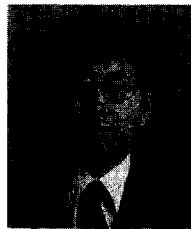
- [11] 정만영 외 편저, *셀룰러 이동통신 방식 설계*, 시그마 프레스, 1996.
- [12] M. Zorzi, "Power control and diversity in mobile radio cellular systems in the presence of Rician fading and lognormal shadowing," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 45, no. 2, pp. 373-382, May 1996.

안 치 훈



1996년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과(공학사)
 1997년~현재 : 충북대학교 정보통신공학과 대학원 석사과정
 [주관심분야] 디지털 이동통신, 위성통신, 무선통신 시스템

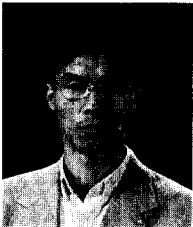
김 남



1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1983년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1988년 8월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1992년 8월 ~ 1993년 8월 : 미 Stanford대학 방문교수
 1989년 2월 ~현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수
 [주관심분야] 전자파 해석, 전파전파, 적용배열 안테나, EMI/EMC

박 성 균



1981년~1985년 : 연세대학교 전자공학과 (공학과)
 1985년~1987년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1987년~1989년 : 삼성전자 정보통신연구소 연구원

1989년~1994년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1993년 12월~1994년 8월 : 한국전자통신연구소 위촉연구원
 1994년 9월~현재 : 공주대학교 정보통신공학과 조교수
 [주관심분야] 마이크로파 소자설계, 이동통신 시스템 설계, 전파전파, fiber-optic link