



# 시가지 $I_0$ 분포 전파환경에서 전송가능 대역폭 평가척도와 새로운 누적확률지 평가차트

하 덕 호\*

## A New Cumulative Probability Estimation Chart and Transmission Bandwidth Measure Factor in Urban $I_0$ Distribution Propagation Environments

Deock-Ho Ha\*

---

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

---

### 요 약

Femto cell 전파환경과 같이 강한 직접파 성분이 존재하는 실제의 시가지 이동무선 전파모델에서 수신되는 포락선의 확률분포는 Nakagami-Rice 분포( $I_0$ 분포)를 따른다. 본 연구에서는  $I_0$ 분포모델에서 수신되는 두 개 전파의 수신 전계강도에 대한 dB값의 차의 확률분포 식을 이론적으로 해석 도출하고, 기존의 레일리 누적확률지를 대신할 수 있는 dB값의 차의 분포를 나타내는 새로운 누적확률지 평가차트를 고안하였다. 이론적인 해석 및 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 제안된 본 평가차트는 기존의 레일리 누적확률지로는 정확한 평가가 어려웠던  $I_0$  분포모델을 포함한 일반적인 시가지 전파전파 분포모델에서 전송가능 대역폭에 대한 정확한 평가를 수행할 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

In an actual urban mobile radio propagation model, the probability distribution for the received envelopes which strong direct wave components exist in Femto cell propagation environments is represented as Nakagami-Rice distribution( $I_0$  distribution). In this paper, we analysed and derived a theoretical formula of probability distribution of the difference value of decibel(dB) for the two signal strengths received in  $I_0$  distribution model. And also, we newly designed and proposed a cumulative probability estimation chart which represents the probability of the dB difference value. Therefore, the conventional Rayleigh cumulative probability estimation chart can be replaced with the developed chart one. From the simulation and theoretical analysis, it can be seen that the proposed estimation chart can correctly evaluated the practicable transmission bandwidth which can not be accurately estimated with the conventional cumulative probability chart in urban general propagation environments including  $I_0$  distribution model.

### Keywords

femto cell propagation environment,  $I_0$  distribution model, practicable transmission bandwidth, dB difference value, cumulative probability estimation chart

---

\* 부경대학교 정보통신공학과 교수  
 - ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4968-2183>

· Received: Apr. 09, 2018, Revised: Apr. 26, 2018, Accepted: Apr. 29, 2018  
 · Corresponding Author: Deock-Ho Ha  
 Dept. of Information and Communication Engineering, PuKyong National University, Daeyoen Campus, Nam-Gu, Busan City, 48513, Korea,  
 Tel.: +82-51-629-6232, Email: hadh@pknu.ac.kr

## 1. 서 론

최근의 이동무선 전파환경은 정상파(직접파 또는 직접회절파)성분의 비율이 커지는 경우가 많고, 일반적인 레일리(Rayleigh) 분포의 전파환경이라기 보다는 Nakagami-Rice 분포(I<sub>0</sub>분포)환경으로 보는 것이 타당하다[1]-[4]. 또한 I<sub>0</sub>분포환경에서는 전송가능 대역폭 평가파라미터로, 주파수가 서로 다른 2개 전파의 전계강도에 대한 상관계수보다는 dB값의 차의 표준편차 또는 dB값의 차의 절대치 값의 평균을 그 평가척도로 이용하는 것이 타당하다[5]. 따라서 I<sub>0</sub>분포환경에서는 올바른 전송가능 대역폭의 평가척도를 결정하기 위해서는 기존의 레일리 누적확률지를 대신할 수 있는 새로운 누적확률지 평가차트를 고안할 필요가 있다.

본 논문에서는 전송가능 대역폭의 평가척도를 결정하기 위하여 기존의 레일리 누적확률지를 대신하는 새로운 전계강도 누적확률 평가차트를 고안한다. 우선, 레일리 분포 및 I<sub>0</sub>분포를 포함한 시가지 모든 전파전파특성을 표현할 수 있는 범용적인 m-분포 모델을 이용하여 2개의 수신전파의 전계강도로부터 구해지는 dB값의 차이에 해당하는 확률분포 식을 유도한다. 그로부터 dB값의 차의 절대치에 대한 누적확률분포 식을 구하고 새로운 누적확률 평가차트를 구한다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 제 2장에서는 m-분포모델이 시가지에서의 I<sub>0</sub>분포모델을 포함한 범용적인 분포모델임을 이론적으로 설명한다. 또한, m-분포 모델의 dB값의 차의 분포 식(확률밀도함수)을 유도하고 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 그 타당성을 설명한다. 제 3장에서 레일리 분포를 포함하는 I<sub>0</sub>분포의 dB값의 차의 절대치의 누적분포를 유도하고 전송가능 대역폭의 평가척도와 새로운 누적확률 평가 차트를 구한다. 또한 이론해석과 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 그 타당성을 검토하고 전송가능 대역폭을 가늠하는 정량적 평가척도를 기술한다. 마지막으로 제 4장에서는 결론을 기술한다.

## II. 시가지 수신전계 분포특성 해석

### 2.1 m-분포 모델

시가지 이동무선 수신신호의 전계강도변동(포락선 R)을 표현하는 분포에는, I<sub>0</sub>분포를 포함할 수 있는 분포 식으로 일반적인 m-분포가 있으며, 그 확률밀도함수는 식 (1)로 주어진대[6].

$$p(R) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^n} R^{2m-1} \exp(-m \frac{R^2}{\Omega}) \quad (1)$$

여기서,

$$\langle R^2 \rangle = \Omega, \quad m = \frac{\Omega^2}{\langle (R^2 - \Omega)^2 \rangle} \geq \frac{1}{2}$$

$\Gamma(\cdot)$ 는 감마(Gamma) 함수이며,  $\langle \cdot \rangle$ 는 앙상블(Ensemble) 평균을 나타낸다. m-분포의 전계강도 누적분포 계산 예를 그림 1에 나타낸다.

일반적으로 파라미터 m은 페이딩의 깊이를 나타내며 m이 작을수록 페이딩이 심하다는 것을 나타낸다. m=1인 경우가 다음의 식 (2)와 같이 레일리 분포 식(확률분포)과 일치하며, 1/2 ≤ m < 1인 경우가 레일리 분포보다 페이딩이 심한 경우를 나타낸다. 또한, m ≥ 1의 경우가 I<sub>0</sub>분포에 상당하며 근사적으로 I<sub>0</sub>분포를 표현한다. 그리고 m이 클수록 페이딩의 깊이가 작게 됨을 나타낸다[6].

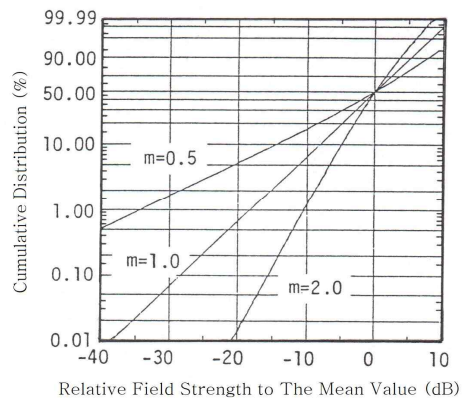


그림 1. m-분포의 전계강도 누적분포 계산 예  
Fig. 1. Calculation example of field strength cumulative distribution for the m-distribution

$$p(R) = \frac{R}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

$$F(R) = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right)$$

2.2 m-분포 모델의 dB값의 차의 분포

본 절은 m-분포의 2개의 수신전파 포락선의 dB 값의 차에 대한 분포를 고려한다. 복소상관계수 ρ를 갖는 2개의 포락선 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>의 비 V=R<sub>1</sub>/R<sub>2</sub>의 확률 밀도 p(V)는 식 (3)과 같이 주워진다[6].

$$p(V) = \frac{2(1-|\rho|^2)^m \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^m V^{2m-1}}{B(m,m) \left(V^2 + \frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^{2m}} \cdot \left\{ 1 - \frac{4|\rho|^2 \frac{\Omega_1}{\Omega_2} V^2}{\left(V^2 + \frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2} \right\}^{-(m+\frac{1}{2})} \quad (3)$$

여기서, Ω<sub>1</sub> = < R<sub>1</sub><sup>2</sup> >, Ω<sub>2</sub> = < R<sub>2</sub><sup>2</sup> >

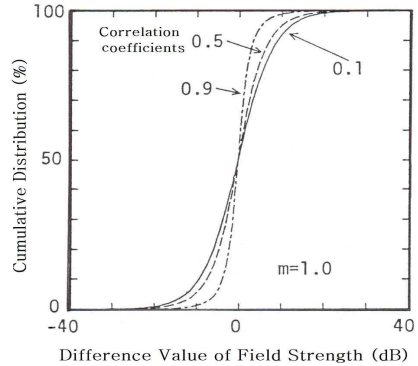
B(•, •): beta 함수,  $B(m,m) = \frac{\Gamma(m)\Gamma(m)}{\Gamma(2m)}$

단, 수식 (3)에서 |ρ|<sup>2</sup>은 전력의 상관계수와 같고, 또한 전계강도의 상관계수와 거의 일치한다[7][8].

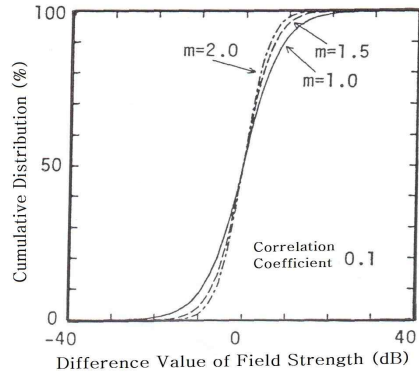
2개의 전계강도 R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>의 dB값의 차 x = 20log V의 확률밀도 p(x)는 2파의 평균전력 Ω<sub>1</sub>, Ω<sub>2</sub>가 같은 경우에는 상기의 식 (3)으로부터 다음 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$p(x) = \frac{\ln 10}{10} \cdot \frac{(1-|\rho|^2)^m 10^{\frac{mx}{10}}}{B(m,m) (10^{\frac{x}{10}} + 1)^{2m}} \cdot \left\{ 1 - \frac{4|\rho|^2 10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} \right\}^{-(m+\frac{1}{2})} \quad (4)$$

또한, 2파의 평균전력이 같은 경우에는 p(-x) = p(x) 이므로 dB값의 차의 절대치 y = |x|의 확률 밀도 p(y)는 식 (5)와 같다.



(a) Rayleigh 분포에서 상관계수를 변화시킨 경우  
(a) In case of correlation coefficient variation in Rayleigh distribution



(b) m을 변화시킨 경우  
(b) In case of m value variations

그림 2. m-분포의 dB값의 차의 분포 계산 예  
Fig. 2. Calculation example of dB difference value distribution for the m-distribution

$$p(y) = \frac{\ln 10}{5} \cdot \frac{(1-|\rho|^2)^m 10^{\frac{my}{10}}}{B(m,m) (10^{\frac{y}{10}} + 1)^{2m}} \cdot \left\{ 1 - \frac{4|\rho|^2 10^{\frac{y}{10}}}{(10^{\frac{y}{10}} + 1)^2} \right\}^{-(m+\frac{1}{2})}, \quad (y \geq 0) \quad (5)$$

식 (4)를 이용하여 계산한 dB값에 대한 차의 누적분포의 이론값을 그림 2에 나타낸다. 그림 2(a)는 m=1인 경우의 레일리 분포 시의 상관계수를 변화시킨 경우로 상관계수가 커질수록 dB값의 차는 작게 된다. 그림 2(b)는 m을 변화시킨 경우로 상관계수가 같더라도 m이 커지게 되면, 즉 정상파 성분의

비율이 커질수록 페이딩이 약해지기 때문에 dB값의 차가 작아지는 이유를 잘 나타내고 있다.

한편, m=1인 레일리 분포의 경우에서, 두 개의 전파가 독립적인 경우(즉,  $|\rho|^2 = 0$ )에는 누적분포 계산이 가능하다. dB값의 차의 확률밀도와 누적분포 식은 식 (4)로부터 다음의 식 (6)과 같이 유도할 수가 있다(부록 1).

$$p(x) = \frac{\ln 10}{10} \cdot \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} \quad (6)$$

$$F(x) = 1 - \frac{1}{10^{\frac{x}{10}} + 1}$$

그림 3(a)에 식 (6)에 대한 그래프 모두를 나타낸다. 그림 3(b)는 이때의 누적분포를 정규확률지(도수 분포곡선을 근거로 하여 그려진 누적백분율곡선)에 그려봤다. 이로부터 m=1인 경우의 레일리 분포 전파환경에서 2개의 전파가 서로 독립적인 경우의 누적분포는 정규분포와 유사함을 나타낸다. 그리고 수치계산으로부터 독립적인 레일리 분포의 dB값의 차의 표준편차는 7.88로 계산된다(부록1).

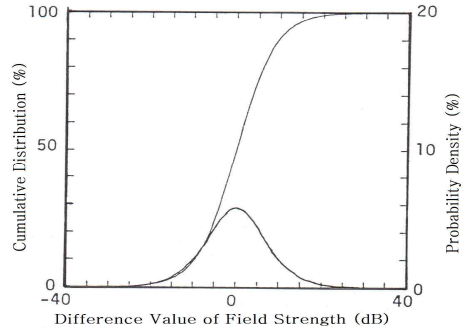
또한, 독립한 레일리 분포의 dB값의 차의 절대치의 확률밀도와 누적분포는 식 (5)로부터 다음 식 (7)과 같이 유도 된다(부록2).

$$p(y) = \frac{\ln 10}{5} \cdot \frac{10^{\frac{y}{10}}}{(10^{\frac{y}{10}} + 1)^2} \quad (y \geq 0) \quad (7)$$

$$F(y) = 1 - \frac{2}{10^{\frac{y}{10}} + 1} \quad (y \geq 0)$$

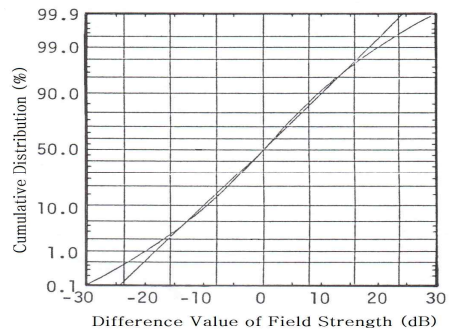
상기 식 (7)의 경우는 평균치가 6.02로 계산된다(부록2). 식 (7)의 누적분포가 직선이 되도록 표현하는 확률지(누적백분율곡선이 직선이 되도록 한 확률지)를 그림 4에 나타낸다. 그림 4에서 직선이 이론 계산치를 나타낸 것이고 x표시가 시뮬레이션 결과 값을 나타낸다. 그림 4에서 이론값과 시뮬레이션 값은 잘 일치하여 시뮬레이션의 타당성을 입증하고 있다. 이와 같이 독립적인 레일리 분포의 dB값의 차의 절대치의 분포(I<sub>0</sub>분포) 직선이 되도록 한 그림

4의 새로운 누적확률지를 이용하면 전송가능 대역폭의 평가 및 각종 전파전파특성개선 등을 검토할 수 있다.



(a) 확률분포 및 누적분포

(a) Probability and cumulative distribution



(b) 정규확률지에 그린 누적분포

(b) Cumulative distribution depicted on normal probability chart

그림 3. 독립한 Rayleigh 분포의 dB값의 차의 분포  
Fig. 3. Distribution of dB difference value for independent Rayleigh distribution

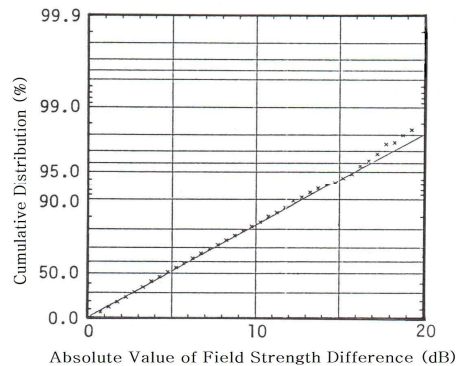


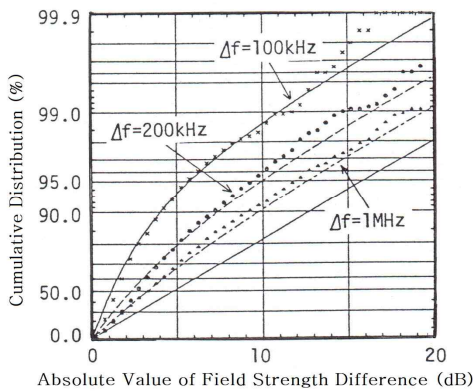
그림 4. 독립한 Rayleigh 분포의 dB값의 차의 절대치 분포  
Fig. 4. Absolute value distribution for the dB values of independent Rayleigh distribution

### III. 전송가능 대역폭 평가척도

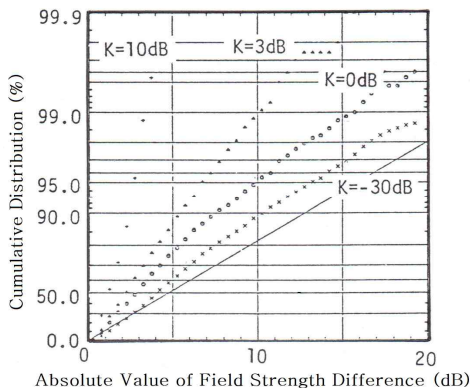
#### 3.1 dB값의 차의 절대치 누적분포

그림 5에 레일리 분포를 포함하는  $I_0$  분포의 dB값의 차의 절대치의 누적분포를 나타낸다. 그림 5(a), (b)는 시뮬레이션결과와 시뮬레이션의 전개강도로부터 계산한 상관계수를 식 (5)에 대입하여 이론 계산치를 나타냈다.

그림 5(a)는 레일리 분포의 경우로 주파수간격이 커질수록 dB값의 차의 절대치가 작게 되는 확률이 감소하여 전송가능 대역폭이 좁게 된다.



(a) 주파수간격을 변화시킨 경우  
(a) Variations of frequency interval difference



(b) 정상파 성분비율을 변화시킨 경우  
(b) Variations of ordinary wave component ratio

그림 5.  $I_0$  분포의 dB값의 차의 절대치의 분포  
Fig. 5. Absolute value distribution for the dB values of  $I_0$  distribution

예를 들면, 2파의 dB값의 차가  $\pm 5\text{dB}$  이내로 될 수 있는 비율은 주파수 간격  $\Delta f$ 가 100kHz(x표시: 시뮬레이션 값, 실선: 이론값)일 때 93%정도인 반면에,  $\Delta f$ 가 1MHz( $\Delta$ 표시: 시뮬레이션 값, 파선: 이론값)일 경우에는 67% 정도로 나타난다. 또한, 주파수 간격이 크게 되면 될수록  $I_0$  분포의 경우에 해당하는 직선 값에 가깝게 근접하게 됨을 보이고 있다.

그림 5(b)는  $I_0$  분포의 정상파 성분의 비율 K를 변화시킨 경우이며, 시뮬레이션 결과(표시: x, o,  $\Delta$ , +)만을 나타냈다. 그림 5(b)로부터, 정상파 성분 비율  $K(K^2 = \text{정상파 성분} / \text{불규칙파 성분})$ 가 클수록 dB값의 차의 절대치가 작아지는 확률이 증가하여 전송가능 대역폭이 넓게 됨을 알 수 있다. 이와 같이,  $I_0$  분포의 dB값의 차의 절대치의 누적분포로부터 dB값의 차의 절대치의 증감 여부를 인식하여 전송가능 대역폭의 척도로 기능할 수 있다.

#### 3.2 새로운 누적확률지 평가 및 고찰

그림 6(a)에 레일리 분포인 경우의, dB값의 차의 표준편차와 상관계수의 관계를 나타낸다. 그림 6(b)는 dB값의 차의 절대치 평균과 상관계수의 관계이다. 실선으로 표시한 것이 이론값이고, 점으로 표시한 것이 시뮬레이션 결과이다. 이론값은 식 (4)로부터 계산하였다. 시뮬레이션에서는 통로 차의 평균을 변화시켜서 여러 가지 상관계수를 구하였다. 그림 6(a), (b)의 두 경우 모두 상관계수와 잘 일치하여 시뮬레이션의 타당성을 입증하고 있다. 따라서 dB값의 차의 표준편차와 dB값의 차의 절대치 평균은 전송가능 대역폭의 평가척도로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

전송가능 대역폭은 디지털 전송의 오류율이 어떤 기준치에 달하는 대역폭의 값으로 결정하지만, 특성의 전파전파 모델과 오류율과의 관계는 아직까지 소수의 문헌에만 보고되어 있다[9][10]. 일반적으로는 오류율이 아니라 상관계수가 0.9 또는 0.5가 되는 주파수간격을 전송가능 대역폭으로 보고 있다 [11]. 그림 6(a), (b)에 표시한 바와 같이 상관계수 0.9는 dB값의 차의 표준편차가 3.61, dB값의 차의 절대치의 평균이 2.39이다.

### IV. 결 론

본 논문에서는 시가지 전파전파모델을 I<sub>0</sub>분포모델로 가정하고 전송가능 대역폭의 평가척도와 새로운 누적확률지 평가 차트를 구하였다. 이론해석과 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 dB값의 차의 표준편차와 상관계수와의 관계, 그리고 dB값의 차의 절대치 평균과 상관계수와의 관계부터 새로이 고안한 누적확률지 평가차트가 전송가능 대역폭의 평가척도로 사용할 수가 있음을 확인하였다. 결론적으로 시가지 I<sub>0</sub>분포 전파환경에서는 dB값의 차의 표준편차가 3~7dB, 그리고 dB값의 차의 절대치 평균이 2~5dB가 되는 주파수간격이 전송가능 대역폭으로 평가되었다. 그 평가척도로 I<sub>0</sub>분포의 dB값의 차의 절대치의 누적분포를 나타내는 누적확률지 평가차트를 사용함이 타당한 방법이라 생각된다.

**(부록 1)** 레일리 분포의 dB값의 차의 분포식 유도 (전압 또는 전력의 비의 dB값의 분포)

I<sub>0</sub>분포 식에서 정상파(직접파)의 크기 K의 값이 K=0인 경우 레일리 분포를 한다. 레일리 분포하는 독립적인 2개의 전파의 포락선의 비를 V라고 하면, 포락선의 비 V의 분포 식은 본문의 식 (3)으로부터 다음 식 (1-1)과 같이 간략화 된다[6].

$$p(V) = \frac{1}{(V+1)^2} \quad (V \geq 0), \tag{1-1}$$

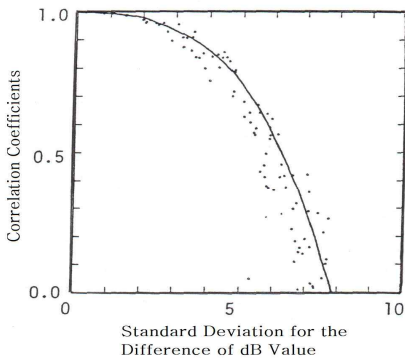
$$p(V) = 0 \quad (V \leq 0)$$

따라서 dB값의 분포는  $x = 10 \log V$ 의 분포를 구하면 된다.

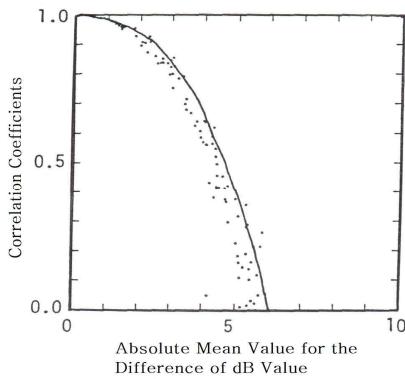
$$V = 10^{\frac{x}{10}}, \quad dV = \frac{\ln 10}{10} 10^{\frac{x}{10}} dx \tag{1-2}$$

이므로 (1-1)식에 (1-2)식을 대입하여 x의 확률밀도 함수 p(x)를 구하면 다음 식 (1-3)과 같다.

$$p(x) = \frac{1}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} \frac{\ln 10}{10} 10^{\frac{x}{10}} \tag{1-3}$$



(a) dB값의 차의 표준편차와 상관계수 관계  
(a) Standard deviation for the difference of dB value vs correlation coefficients



(b) dB값의 차의 절대치 평균과 상관계수 관계  
(b) Absolute mean value for the difference of dB value vs correlation coefficients

그림 6. Rayleigh 분포의 dB값의 차와 상관계수 관계  
Fig. 6. Relations between correlation coefficient and dB value difference in Rayleigh distribution

또한 상관계수 0.5는 표준편차가 6.33, 절대치 평균이 4.65에 대응한다. 따라서 dB값의 차의 표준편차가 3~7dB, 그리고 dB값의 차의 절대치 평균이 2~5dB가 되는 주파수간격이 전송가능 대역폭으로 가늠할 수 있다고 생각된다. 결과적으로, 상관계수는 레일리 분포의 경우에만 전송가능 대역폭의 평가 방법이 될 수 있지만, dB값의 차는 I<sub>0</sub>분포도 포함하며 오류율에도 대응하는 것으로 예상되어 통상적인 전송가능 대역폭의 평가 방법이 될 수 있다. 그 평가 척도로서 I<sub>0</sub>분포의 dB값의 차의 절대치의 누적분포를 나타내는 확률지 차트를 사용함이 올바른 방법이라 생각한다.

$$= \frac{\ln 10}{10} \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2}$$

평균값  $\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx$ 를 구하면

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln 10}{10} x \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} dx \\ &= \int_0^{\infty} \frac{\ln 10}{10} \frac{10}{\ln 10} \cdot \\ &\quad \ln V \frac{V}{(V+1)^2} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{V} dV \\ &= \frac{10}{\ln 10} \left[ -\frac{\ln V}{V+1} - \ln \left| \frac{V+1}{V} \right| \right]_0^{\infty} \end{aligned}$$

여기서  $\lim_{V \rightarrow \infty} \frac{\ln V}{V+1} = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} = 0$ 가 되므로

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{10}{\ln 10} \left\{ \lim_{V \rightarrow 0} \left( \frac{\ln V}{V+1} \right) + \lim_{V \rightarrow 0} \left( \ln \left| \frac{V+1}{V} \right| \right) \right\} \\ &= \frac{10}{\ln 10} \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1/V}{1/V^2} = \frac{10}{\ln 10} \lim_{V \rightarrow 0} V = 0 \end{aligned}$$

와 같이  $\bar{x} = 0$ 가 된다. 한편 표준편차  $\sigma_x$ 를 구해보면,

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln 10}{10} x^2 \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} dx \\ &= \int_0^{\infty} \frac{\ln 10}{10} \left( \frac{10}{\ln 10} \ln V \right)^2 \frac{V}{(V+1)^2} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{V} dV \\ &= \left( \frac{10}{\ln 10} \right)^2 \int_1^{\infty} \left( \frac{\ln V}{V+1} \right)^2 dV \\ &= \left( \frac{10}{\ln 10} \right)^2 \left[ -\frac{\ln Z}{Z+1} - \ln \left| \frac{Z+1}{Z} \right| \right]_1^{\infty} \\ &= \left( \frac{10}{\ln 10} \right)^2 \ln 2 \end{aligned}$$

와 같이 된다.  $\sigma_x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$ 으로부터 수치적분으로  $\sigma_x = 7.88$ 이 된다.

따라서 식 (1-3)으로부터 누적분포를 구하면

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_{-\infty}^x p(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^x \frac{\ln 10}{10} \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} dx \\ &= \int_0^{10^{\frac{x}{10}}} \frac{\ln 10}{10} \frac{V}{(V+1)^2} \frac{\ln 10}{10} \frac{1}{V} dV \\ &= \left[ -\frac{1}{V+1} \right]_0^{10^{\frac{x}{10}}} = 1 - \frac{1}{10^{\frac{x}{10}} + 1} \end{aligned}$$

(부록 2) 레일리 분포의 dB차의 절대치의 분포

dB차의 분포

$$p(x) = \frac{\ln 10}{10} \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} \quad (-\infty < x < \infty)$$

로부터

$$\begin{aligned} p(-x) &= \frac{\ln 10}{10} \frac{10^{\frac{-x}{10}}}{(10^{\frac{-x}{10}} + 1)^2} \\ &= \frac{\ln 10}{10} \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} = p(x) \end{aligned}$$

또한, dB차의 절대치의 분포는

$$p(x) = \frac{\ln 10}{5} \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} \quad (x \geq 0)$$

누적분포는

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_0^x p(x) dx \\ &= \frac{\ln 10}{5} \int_0^x \frac{10^{\frac{x}{10}}}{(10^{\frac{x}{10}} + 1)^2} dx \end{aligned}$$

상기 식에서  $Z = 10^{\frac{x}{10}}$   $dZ = \frac{\ln 10}{10} 10^{\frac{x}{10}} dx$  로 변  
수변환하면,

$$\begin{aligned} F(x) &= \frac{\ln 10}{5} \int_1^{10^{\frac{x}{10}}} \frac{Z}{(Z+1)^2} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{Z} dZ \\ &= 2 \int_1^{10^{\frac{x}{10}}} \frac{1}{(Z+1)^2} dZ \\ &= 2 \left[ -\frac{1}{Z+1} \right] = 1 - \frac{2}{Z+1} \\ &= 1 - \frac{2}{10^{\frac{x}{10}} + 1} \end{aligned}$$

상기 누적분포식이 직선이 되도록 확률지에 그리  
기위해서  $y = 1 - \frac{2}{10^{\frac{x}{10}} + 1}$  에서  $x = 10 \log \frac{1+y}{1-y}$

로 역변환해서 그리면 된다.

또한 (부록 1)에서와 같은 방법으로 평균치  $m$   
을 구하면,

$$\begin{aligned} m &= \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &= \frac{20}{\ln 10} \ln 2 = 20 \log 2 \approx 6.02 \end{aligned}$$

마찬가지로 표준편차 값은  $\sigma_x^2 = \langle x^2 \rangle - m^2$  으  
로부터 수치적분으로 구하면  $\sigma_x = 5.08$ 을 얻게 된다.

### References

[1] S. Geng, J. Kivinen, X. Zhao, and P. Vainikainen, "Millimeter-Wave Propagation Channel Characterization for Short-Range Wireless Communications", IEEE, Trans. on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 1, pp. 3-13, Jan. 2009.

[2] D. M. Rose, T. Jansen, and T. Kürner, "Indoor to Outdoor Propagation-Measuring and Modelling of Femto Cells in LTE Networks at 800 and 2600

MHz", in Proc. IEEE GLOBECOM Workshop (GC Workshops 2011), Houston, Texas, pp. 203-207, Dec. 2011.

[3] L. Cheng, B. E. Henty, D. D. Stancil, F. Bai, and P. Mudalige, "Mobile Vehicle-to-Vehicle Narrow-Band Channel Measurement and Characterization of the 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication (DSRC) Frequency Band", IEEE, Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 25, No. 8, pp. 1501-1516, Oct. 2007.

[4] Deock-Ho Ha, "Radio Channel Model Suitable for The Next Generation Wireless Access Vehicular Environment Technology", The Journal of KIIT, Vol. 12, No. 4, pp. 43-50, Apr. 2014.

[5] Deock-Ho Ha, "A Study on Estimation Method of Practicable Transmission Bandwidth in Femto Cell Propagation Environments", The Journal of KIIT, Vol. 15, No. 4, pp. 55-62, Apr. 2017.

[6] M. Nakagami, "The m-Distribution - A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading", in Statistical Methods of Radio Wave Propagation (ed. W. C. Hoffman), Pergamon Press 1960.

[7] R. H. Clarke, "A Statistical Theory of Mobile-Radio Reception", The Bell System Technical Journal, Vol. 47, No. 6, pp. 957-1000, Aug. 1968.

[8] J. N. Pierce and S. Stein, "Multiple Diversity with Nonindependent Fading", Proc. IRE, pp. 89-104, Jan. 1960.

[9] W. C. Jakes, Jr. (editor), "Microwave Mobile Communications", John Wiley & Sons, 1974.

[10] D. R. Hummels and F. W. Ratcliff, "Calculation of Error Probability for MSK and OQPSK Systems Operating in a Fading Multipath Environment", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 30, No. 3, pp. 112-120, Sep. 1981.

[11] D. C. Cox and R. P. Leck, "Correlation



Bandwidth and Delay Spread Multipath Propagation Statistics for 910 MHz Urban Mobile Radio Channels", IEEE Trans. Vol. Com-23, No. 11, pp. 1271-1280, Nov. 1975.

## 저자소개

하 덕 호 (Deock-Ho Ha)



1972년 3월 ~ 1979년 2월 :

한양대학교 전자공학과(공학사)

1978년 11월 ~ 1981년 1월 :

(주)금성사 중앙연구소 연구원

1982년 4월 ~ 1984년 3월 : 일본

Kyoto대학 전자공학과(공학석사)

1984년 4월 ~ 1987년 3월 : 일본

Kyoto대학 전자공학과(공학박사)

1986년 12월 ~ 1987년 8월 : 일본 마쯔시타전기(주)

무선연구소 연구원

1990년 8월 ~ 1991년 8월 : 캘리포니아대학(U.C. Davis)

방문연구교수

2000년 2월 ~ 2001년 2월 : 미국 콜로라도주립대학(CSU,

Ft. Collins) 방문연구교수

1987년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 정보통신공학과 정교수

관심분야 : 실내외 전파특성 모델링, 다이버시티 시스템,

OFDM, UWB, USN/RFID 등