

---

# 도플러 확산 환경에서의 안테나 다이버시티 효과에 관한 연구

이종길\*

## A Study on Effects of Antenna Diversity in Doppler Spread Environments

Jong-Gil Lee\*

---

본 연구는 산업자원부, 한국산업기술평가원 지정 인천대학교 멀티미디어연구센터의 지원에 의한 것임

---

### 요 약

도플러 확산은 송수신단의 이동에 따라 발생하며 송수신단의 상대적인 위치 및 이동속도에 따라 도플러 주파수 변이 정도가 다르게 나타난다. 본 논문에서는 앞으로 폭 넓게 활용될 것으로 예상되는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 통신방식을 적용했을 경우를 가정하여 다양한 무선채널에서의 도플러 확산에 의한 성능 열화 현상을 안테나 다이버시티(diversity) 효과를 활용하여 어느 정도까지 개선할 수 있는지를 분석하였다. 이를 위하여 다양한 무선채널 모델을 설정하고 도플러 확산에 따른 SIR(Signal to interference) 값 및 SIR을 고려한 effective SNR을 계산하였다. 이러한 결과들을 바탕으로 도플러 확산 정도에 따른 다이버시티 효과를 구체적으로 분석하기 위하여 수신단에서의 BER 개선 정도를 고찰하였다.

### ABSTRACT

Doppler spread can occur due to the relative movement of transmitter and receiver. The Doppler frequency shift varies as the relative location and the velocity of transceivers change. This Doppler spread may seriously degrade the performance of OFDM system which is considered to be very efficient for multimedia wireless communication. Therefore, applying the method of receiver diversity, we analyze the degree of BER improvement in Doppler spread environments to investigate the effectiveness of the chosen methods according to various wireless channels .

### 키워드

Antenna Diversity, Doppler Spread, OFDM, Subcarrier Interference

### 1. 서 론

무선채널의 경우, 다중경로에 의한 페이딩, 이동체에 의한 도플러 효과, 지연 확산 등으로 인하여 고속 전송을 위한 무선 채널망의 구성이 매우 어렵다.

따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 다

중 접속 능력 및 페이딩에 대한 견실성을 갖는 다중 반송파를 이용한 데이터 및 음성신호를 전송하는 방식이 개발되었다. 즉, 고속 멀티미디어 데이터 전송을 위해 제시되고 있는 방식이 다중 반송파 전송 방식(Multi carrier modulation)이며 이중 직교 주파수 분할 다중 반송파 전송방식(OFDM)은 상호 직교성이 있는 부반송파를 사용함으로써 스펙트럼 효율

이 다른 다중 반송과 전송방식에 비해 우수하다는 장점을 가진다.

그러나 OFDM 방식은 여러 개의 부반송파를 사용하기 때문에 송신단과 수신단의 반송파 주파수가 일치되지 못하면 부반송파 사이의 직교성이 파괴되어 부반송파들 사이에 인접채널 간섭이 발생한다. 만약 송신단 또는 수신단이 이동중이라면 상대적인 이동 속도에 따른 도플러 주파수 변이가 발생하게 된다.

이러한 현상은 OFDM 시스템에서 도플러 확산으로 나타나며 결과적으로 반송파 간섭현상이 발생하게 된다. 이러한 문제로 인하여 고속 이동중일 경우 시스템의 성능이 심각하게 열화될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 무선채널 모델을 설정하고 도플러 확산에 따른 반송파 간섭에 의한 영향이 안테나 다이버시티 효과에 의하여 어느 정도 경감될 수 있는지를 분석하였다. 이러한 결과를 바탕으로 2개의 안테나 다이버시티를 적용할 경우 기법에 따른 성능 개선 정도를 정량적으로 분석하였다.

## II. OFDM 시스템에서의 반송파 간섭

OFDM 변조된 신호는 무선채널을 통해 수신단으로 전송되고 이때 왜곡이 없는 경우 수신된 신호는 부반송파간의 직교성이 그대로 유지되므로 FFT를 통한 OFDM 복조로서 원하는 정보를 복원해낼 수 있다. 그러나 OFDM 방식의 무선통신 시스템에서는 다중경로 페이딩채널을 통해 신호가 수신되므로 신호크기 변화, 시간지연 및 도플러 주파수 변이 등의 다양한 왜곡을 겪게 되면서 직교성이 상실되어 각 부반송파 간의 간섭이 유발된다.

여기서 단일 OFDM 심볼이 전송되어 수신단에서 완벽하게 보호구간 부분을 제거하여 intersymbol interference(ISI)는 일어나지 않으며 심볼 타이밍 동기화 및 sampling rate는  $1/T_s$ 로 완벽하게 이루어졌다고 가정하면, 다중경로를 통해 수신되어 FFT 과정을 거친 신호는 원하는 신호부분  $\eta_i$ 와 반송파 간섭부분  $\eta_{ScI}$  그리고 잡음부분으로 다음과 같이 정리할 수 있다[1].

$$Y_i = \frac{X_i}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_{n,i}^e + \sum_{\substack{k \in K \\ k \neq i}} \frac{X_k}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_{n,k}^e e^{j2\pi(k-i)n/N} + W_i \quad (1)$$

여기서  $H_{n,k}^e$ 는  $t = nT_s$ ,  $f = k/T$ 에서의 채널

전달함수를 나타낸다.  $X_k$ 는 부반송파에 실리는 데이터 심볼이고  $K$ 는 반송파 인덱스 집합을 나타낸다. 본 논문에서는 64point FFT 시스템을 가정하여  $K = [-32, 31]$ 로 설정하는 한편, 심볼  $|X_k| = 1$ 이고 심볼간 비상관이며 평균은 0으로(uncorrelated zero mean) 변조되었다고 가정한다. 그러므로 FFT 길이와 사용되는 반송파의 수가 같다고 하면 반송파의 signal-to-subcarrier interference ratio (SIR)을 나타내는  $\gamma_{SIR}(i)$ 와 평균 SIR을 나타내는  $\bar{\gamma}_{SIR}$ 을 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$\gamma_{SIR}(i) \approx \frac{E[|\eta_i|^2]}{E[|\eta_{ScI}|^2]} \quad (2)$$

$$\bar{\gamma}_{SIR} = \frac{1}{N} \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} \gamma_{SIR}(i) \quad (3)$$

또한 신호대 잡음비에 반송파 간섭까지 고려한 effective SNR  $\gamma_e(i)$ 와 평균 effective SNR  $\bar{\gamma}_e$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\gamma_e(i) \approx \frac{E[|\eta_i|^2]}{E[|\eta_{ScI}|^2] + E[|W_i|^2]} \quad (4)$$

$$\bar{\gamma}_e = \frac{1}{N} \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} \gamma_e(i) \quad (5)$$

## III. 도플러 확산에 의한 영향

이동 무선시스템의 기저대역 모델[2]에서 송신단 impulse shaping filter는 시간 도메인에서 서로 매칭되어 있고 rectangular form이라고 가정한다. 송신단에서 필터를 통과한 변조된 심볼은 직교하는 각 부반송파에 실려 송신된다. 송신신호는 각각의 도플러 주파수, 크기왜곡, 시간지연을 갖고 있는 다중경로를 거쳐 수신된다.

여기서 다중경로를 거쳐 수신된 신호의 반송파 간섭의 영향을 간단하게 계산하기 위해 경로는 단일 경로  $k$ 만 존재하며  $i$  번째 부반송파와 이 부반송파에 영향을 주는 방해 부반송파  $j$ 만 존재한다고 가정한다. 이때 경로  $k$ 로 수신되어 수신단에서 matched filter로 입력되는 신호  $Y_i^{(k)}$ 의 전력 스펙트럼은 주파수,  $f = f_i - f_j + f_d^{(k)}$ 에서의 크기가  $1/T \cdot a^{(k)}$ 인 dirac delta pulse로 볼 수 있고 필터의 전력밀도 스펙트럼(power density spectrum)은  $T^2 \cdot sinc^2(fT)$ 이므로 필터의 출력은 다음과 같

이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{y_i^{(k)}} &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{T} \cdot a^{(k)}\right)^2 \delta(f - (f_i - f_j + f_d^{(k)})) \\ &\quad \cdot T^2 \cdot \text{sinc}^2(fT) df \\ &= (a^{(k)})^2 \text{sinc}^2((f_i - f_j + f_d^{(k)})T) \end{aligned} \quad (6)$$

즉, 식 (6)은  $f_i \neq f_j$  일 때  $i$  번째 부반송파에 작용하는  $j$  번째 부반송파의 간섭을 나타낸다.

다시 일반적인 다중경로를 거친  $N$ 개의 부반송파를 가지는 신호에서 반송파 간섭을 계산하기 위해 경로 수  $P$  개를 갖는 채널모델에서 도플러 주파수가 같게 나타나는 경로들을 묶어 인덱스  $k'$  으로 나타내면 식 (6)으로부터 원하는 신호부분(desired term)을 다음과 같이 계산할 수 있다[3].

$$\begin{aligned} \eta_i^2 &= \sum_{k=0}^{P-1} \text{sinc}^2(T \cdot f_d^{(k)}) \cdot E^{(k)} \\ &\quad , -N/2 \leq i \leq N/2 - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $E^{(k)}$ 은 도플러 전력 스펙트럼에서 도플러 주파수가  $f_d^{(k)}$ 일 때의 값을 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있고, 경로  $k'$ 에 따른  $b(f_d^{(k)})$ 의 모든 합은 1이 된다.

$$E^{(k)} = \sigma_X^2 b(f_d^{(k)}) \quad (8)$$

그러므로  $i$ 번째 부반송파에 작용하는 반송파 간섭부분(subcarrier interference)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{Scl}^2 &= \sum_{k=0}^{P-1} \left[ \sum_{\substack{i=-N/2 \\ i \neq j}}^{N/2-1} \text{sinc}^2(T(f_i - f_j + f_d^{(k)})) \right] \cdot E^{(k)} \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 식 (7)과 식 (9)를 이용하여 다양한 도플러 전력 스펙트럼 모델에 따른 반송파 간섭을 계산할 수 있다. 이때 반송파 간섭에 의한 영향을 고려하지 않는 original SNR은  $\gamma = \sigma_X^2 / E[|W|^2]$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로 레일리 페이딩과 rectangular doppler spectrum을 가지고 있는 채널을 가정하면  $E^{(k)}$ 은 다음 식과 같이 정리할 수 있고 이때 식 (7), (9)를 식 (3), 식 (5)에 적용함으로써 SIR과 effective SNR을 구할 수 있다.

$$E^{(k)} = \sigma_X^2 \frac{1}{2f_{d, \max}}, \quad |f_d| \leq f_{d, \max} \quad (10)$$

그림 1에 SIR, 그림 2에  $\gamma = 40 \text{ dB}$ 일 때의 SIR과 effective SNR을 다양한 도플러 전력 스펙트럼 모델[4]에서 적용한 모의실험 결과를 나타내었다.

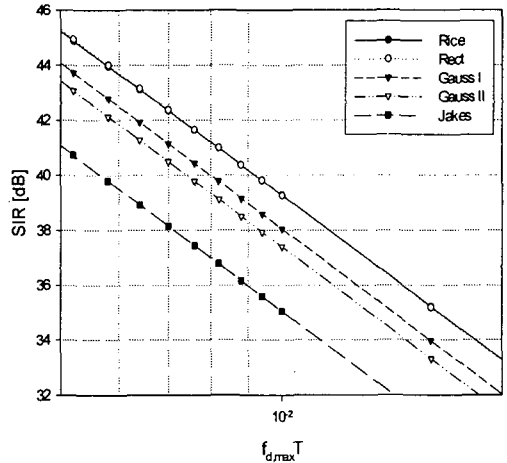


그림 1. 도플러 전력 스펙트럼 모델에 따른 도플러 확산의 영향 (SIR)  
Fig 1. Effects according to Doppler power spectrum model (SIR).

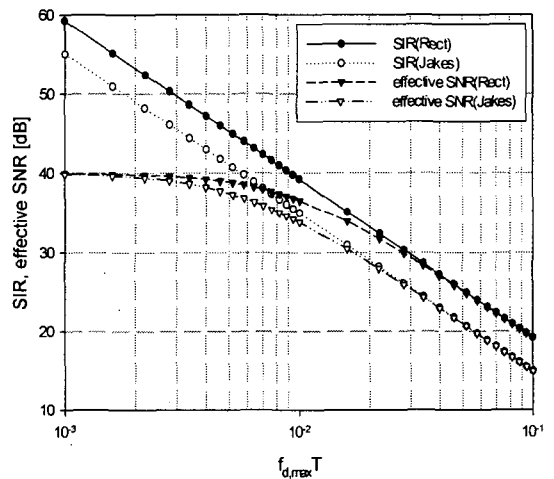


그림 2.  $\gamma = 40 \text{ dB}$ 일 때의 도플러 확산의 영향  
Fig 2. Effects according to Doppler power spectrum spread when  $\gamma = 40 \text{ dB}$ .

#### IV. 수신 다이버시티 기법

앞에서 고찰한 바와 같이 이러한 도플러 확산에 의한 시스템 성능 열화현상을 경감시키기 위한 다이버시티 기법에 대하여 고려하여 본다.

수신 다이버시티 시스템에서의 일반적인 기법은 MRC(maximal ratio combining), EGC(equal gain combining), SC(selection combining)의 세 가지가 있으며 각 branch들이 동일한 평균 SNR을 갖는다면 MRC 기법이 최적의 combining 방법인 것으로 알려져 있다 [5]. 그림 3에 2-안테나 다이버시티 시스템의 기본 블록도를 나타내었다.

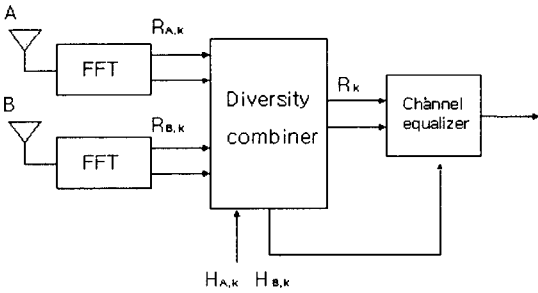


그림 3. 수신 안테나 다이버시티  
Fig 3. Receiving antenna diversity.

##### 1. Maximal ratio combining (MRC)

각 안테나로 수신된 신호들은 OFDM 복조를 거쳐 신호의 크기에 비례하여 가중치가 주어지며 combiner를 거친 신호의 수식은 다음과 같다.

$$R_k = R_{A,k}(H_{A,k})^* + R_{B,k}(H_{B,k})^* \quad (11)$$

따라서 등화기에서는  $|H_{A,k}|^2 + |H_{B,k}|^2$  의 값으로 보상이 이루어져야 한다.

##### 2. Subcarrier selection combining (SC)

SC 기법은 각 안테나로 수신된 신호의 전력이 가장 큰 신호를 선택하는 기법이다. 즉, 그림 1의 combiner 출력  $R_k$  는  $R_{A,k}$  와  $R_{B,k}$  중 하나만 선택된다. 따라서 등화기에서  $R_k$  는 선택된 값에 따라 적절한 채널의 주파수 응답,  $|H_{A,k}|$ ,  $|H_{B,k}|$  로 보상이 이루어져야 한다.

##### 3. Equal Gain Combining(EGC)

EGC 는 수신신호의 크기를 측정하기 쉽지 않을 때 사용할 수 있으며 각 안테나로부터 수신된 신호들이

combining될 때 위상보정이 이루어지는가에 따라 coherent EGC과 incoherent EGC으로 나뉘어진다. coherent EGC의 경우 combiner 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_k = R_{A,k}(e^{j\arg(H_{A,k})})^* + R_{B,k}(e^{j\arg(H_{B,k})})^* \quad (12)$$

따라서 등화기에서는  $|H_{A,k}| + |H_{B,k}|$  의 값으로 보상이 이루어져야 하며 incoherent EGC의 경우는 combiner 출력이 다음과 같이 표시된다.

$$R_k = R_{A,k} + R_{B,k} \quad (13)$$

그러므로 등화기에서는  $H_{A,k} + H_{B,k}$  의 값으로 보상이 된다.

#### V. 도플러 확산 및 다이버시티 효과

도플러 모델에 따른 확산 현상을 고찰하기 위하여 모의실험에 적용한 3가지 도플러 모델은 COST 207을 따라서 나타내었다[6].

최대도플러 주파수가 반송파 간격의  $7 \times 10^{-2}$  이고 SNR이 15dB인 경우를 가정하여 Jakes, Rice, Gauss II 도플러 전력스펙트럼 모델을 적용하였을 때의 16-QAM 성상도를 각각 그림 4에서 그림 6까지 나타내었다. Jakes 모델의 경우 도플러 주파수가 좌우대칭으로 나타나기 때문에 성상도상의 위상회전은 발생하지 않으며, 다만 도플러 주파수별 크기 분포가 보다 랜덤한 Jakes 모델을 적용한 경우 성상도상에서 일반

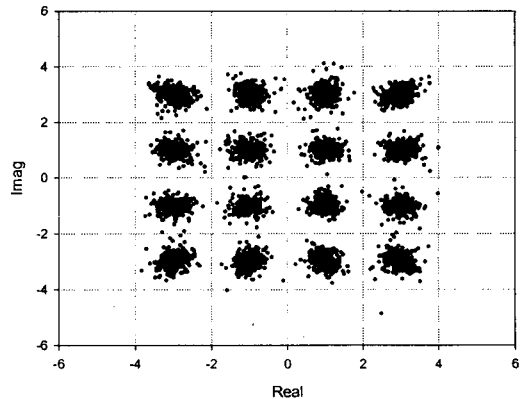


그림 4. Jakes 모델 성상도  
Fig 4. Constellation for Jakes model.

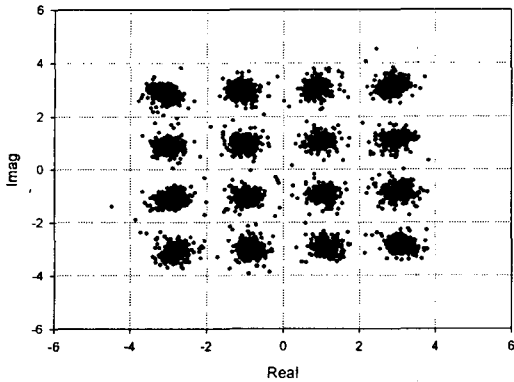


그림 5. Rice 모델 성상도  
Fig 5. Constellation for Rice model.

적인 rectangular 모델보다 더 분산되어 나타남을 알 수 있다.

또한 Rice 모델을 적용한 경우 Jakes 모델과 비교하여 LOS 경로의 신호가 포함되어 약간의 위상회전이 발생하며 Gauss II 모델을 적용한 경우에는 다른 모델과 비교하면 분산 및 위상회전이 비교적 크게 발생함을 알 수 있다.

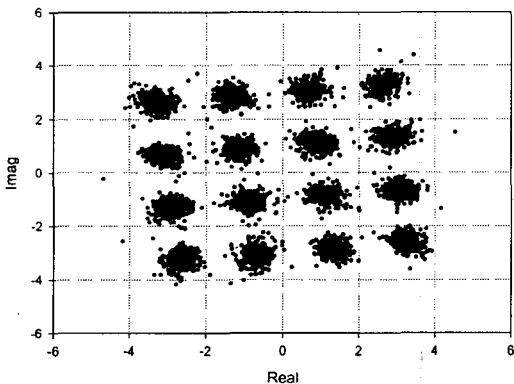


그림 6. Gauss II 모델 성상도  
Fig 6. Constellation for Gauss II model.

그림 7에 반송파 간격에 표준화된 최대 도플러 주파수가  $f_{d,max}/\Delta f = 0.07$  이며, 상대적으로 더 열악한 것으로 판단되는 Gauss II 모델을 적용하였을 경우의 2-안테나 수신다이버시티 기법에 따른 BER 곡선을 나타내었다. Incoherent EGC의 경우 역시 단일 안테나 시스템과 비교하여 별다른 성능 향상이 없음을 알 수 있으며, BER이  $6 \times 10^{-3}$  경우를 기준으로 SC 기법은 단일 안테나 사용시보다 8dB 정도, Coherent EGC 기법은 10dB 정도, MRC 기법은 10.5dB 정도의 성능

개선을 보였다.

그림 8에 단일 안테나 시스템과 2-안테나 diversity OFDM 시스템에서의 최대 도플러 주파수 증가 및 diversity 기법에 따른 BER에 대한 차이를 표시하였다. 단일 안테나 OFDM 시스템과 2-안테나 diversity 시스템 모두 최대 도플러 주파수가 반송파 간격의 0.01 이상일 경우, 상당한 BER 증가가 나타남을 알 수 있다. 또한 도플러에 의한 주파수 천이가 반송

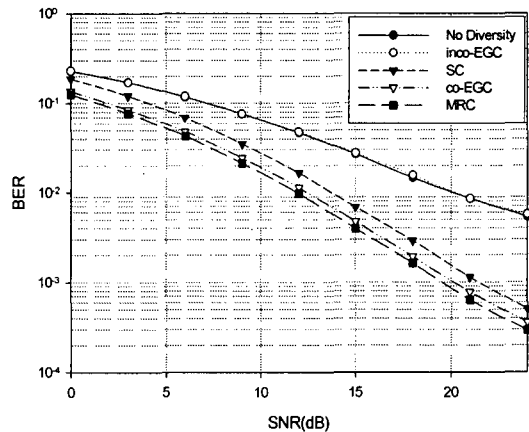


그림 7. 고정된 최대 도플러 주파수에서의 SNR 변화에 따른 2-안테나 OFDM 시스템 BER  
Fig 7. BER of 2-antenna OFDM system with fixed maximum Doppler frequency according to SNR (Gauss II,  $f_{d,max}/\Delta f = 7 \times 10^{-2}$ ).

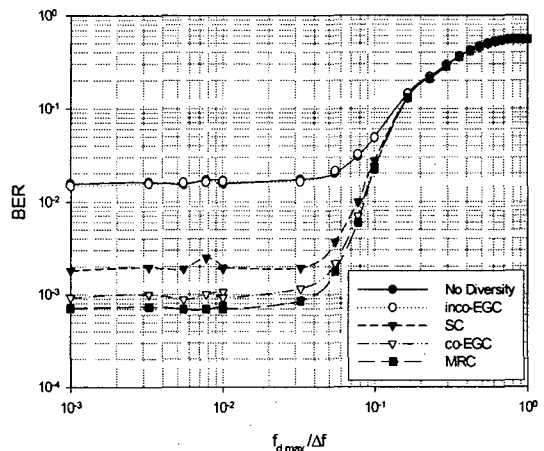


그림 8. 고정된 SNR에서의 최대 도플러 주파수 변화에 따른 OFDM 시스템 BER  
Fig 8. BER of 2-antenna OFDM system with fixed SNR according to maximum Doppler frequency (Gauss II, SNR=15dB).

과 간격의 0.2 이상 발생하는 경우에는 즉, 매우 극심한 도플러 확산 환경에서는 2-안테나 시스템이라도 단일 안테나 시스템과 비슷한 정도의 BER 을 나타내었다.

## VI. 결 론

고속 무선 OFDM 시스템의 무선채널에서의 성능 열화 현상을 분석하기 위해 다양한 채널모델과 도플러 확산에 따른 SIR과 이 SIR을 고려한 effective SNR 을 분석하였다.

본 논문에서는 이러한 결과들을 바탕으로 고속 무선 OFDM 시스템에서의 도플러 확산에 의한 반송파 간섭과 그에 따른 성능열화를 분석하기 위해 다양한 채널모델과 도플러 확산에 따른 BER 계산을 통하여 성능 열화 정도를 확인하였다. 또한 도플러 확산에 의해 야기되는 성능 열화에 대한 보상 기법으로 수신 안테나 다이버시티 기법을 소개하였으며 그에 따른 성능 향상 정도를 분석하였다.

즉, 도플러 확산에 따른 시스템의 성능분석을 수행하였는데 도플러 모델에 따라 성상도상의 회전특성이 다르게 나타났다. Jakes, Rice, Gauss II 의 도플러 전력 스펙트럼 모델을 적용하였으며, Jakes 모델을 적용한 경우 도플러 주파수가 좌우대칭으로 나타나면서 성상도상의 위상회전이 발생하지 않았다. 다만 도플러 주파수별 크기 분포가 보다 랜덤한 Jakes 모델을 적용한 경우 일반적인 rectangular 모델에 비해서 성상도상에서 더 퍼져서 나타남을 알 수 있었다.

또한 Rice 모델을 적용한 경우 Jakes 모델과 비교하여 LOS경로의 신호가 포함되어 약간의 위상회전이 발생하였으며, Gauss II 모델을 적용한 경우에는 모델의 특성상 위상회전 및 분산이 비교적 크게 나타났다. 따라서 BER 성능은 감소하였으며 앞에서 언급한 경우와 마찬가지로 수신 안테나 다이버시티 기법을 적용할 경우 BER 성능은 상당한 정도까지 개선될 수 있음을 보여준다.

반송파 간격에 표준화된 최대 도플러 주파수가  $f_{d,max} / \Delta f = 0.07$  인 경우의 예에서 보는 바와 같이 incoherent EGC 방법을 적용할 경우에는 단일 안테나 시스템과 비교하여 별다른 성능향상이 없음을 확인할 수 있었다. 앞의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 diversity 기법에 따라 BER 성능 개선 정도는 MRC, Coherent EGC, SC 기법의 순으로 크게 나타나게 된다.

또한 최대 도플러 주파수의 증가에 따른 단일 및 두 개의 안테나를 이용하는 수신 다이버시티 OFDM 시스템의 BER 성능은 최대 도플러 주파수가 반송파 간격의 0.01 이하로 발생할 때까지는 도플러 확산에 따

른 영향이 거의 없었다. 그러나 그 이상 발생시 모든 수신 기법에서 급격한 BER 증가가 나타났으며 최대 도플러 주파수가 반송파 간격의 0.2 이상 발생하는 매우 극심한 도플러 확산 환경에서는 안테나 다이버시티를 통한 성능 향상이 나타나지 않았다.

## 참고문헌

- [1] Paul H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction" IEEE Trans. Commun, vol. 42, no. 10, October 1994.
- [2] P. A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," IEEE Trans. on Communication Systems, vol. CS-11, Dec. 1963.
- [3] P. Robertson and S. Kaiser, "Doppler spread analysis and simulation for multi-carrier mobile radio and broadcast systems", Second international workshop on multi-carrier pread spectrum & related Topics (MC-SS'99), September 1999.
- [4] J. D. Parson, Mobile radio propagation channel, John Wiley & Sons, 2000.
- [5] D. Lee, G. J. Sauliner, et al. "Antenna diversity for an OFDM system in a fading channel" Proc. IEEE MCC, vol. 2, no. 31, Nov. 1999.
- [6] M. Patzold, Mobile fading channels, John Wiley & Sons, 2002.
- [7] Matthias Patzold, "Mobile fading channels", WILEY, January 2002, pp.259-265.
- [8] S. Hara and J.P. Linnartz, Wireless Personal Communications, NO. 1-2, Kluwer, 1996.

## 저자소개

### 이 종 길 (Jong Gil Lee)



1982년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1985년 1월 미국 Case Western Reserve University, Electrical Eng. (M.S.)  
 1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)

1991년 1월~1993년 2월 삼성전자 특수연구소  
 1993년 3월~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수  
 ※관심 분야 : 무선통신, 레이다신호처리, 통신시스템, 스펙트럼분석