

---

# 송수신 다이버시티를 적용한 다중 반송파 시스템에서의 위상잡음 영향 분석

이 종 길\*

Analysis of Phase Noise Effects in OFDM Systems Using Transceiver Diversity

Jong Gil Lee\*

## 요 약

본 논문에서는 송신 및 수신 다이버시티(diversity) 기법을 적용하는 OFDM 통신 시스템에서의 위상잡음에 의한 영향을 분석하였다. OFDM 시스템은 위상잡음에 매우 민감한 특성을 가지는데 반송파 간섭 및 시스템 잡음의 증가를 초래함으로써 전체적인 시스템의 성능열화 현상이 나타나게 된다. 따라서 이러한 위상잡음의 영향을 분석하기 위하여 위상잡음의 분포특성 및 그 크기 정도를 모델링하고 이러한 위상잡음의 특성에 따라 어느 정도까지 시스템 성능이 열화 되는지를 고찰하였다. 이러한 열화 현상은 송수신 다이버시티 구조에 따라 달라지는데 일반적으로 비교적 간단히 구현할 수 있는 2개의 송신 및 수신안테나를 쓰는 경우와 2개의 송신 안테나 다이버시티 기법만을 적용한 경우, 그리고 다이버시티 기법을 적용하지 않았을 때의 시스템 성능에 관하여 비교하고 분석하였다.

## ABSTRACT

In this paper, the phase noise effects of OFDM transceiver diversity systems were analyzed. Since OFDM communication system is very sensitive to phase noise, the system performance may degrade seriously due to the increase of subcarrier interferences and system noise. Therefore, The phase noise model was suggested and its distribution and power were varied to investigate the effects of phase noise on the system performance. The degree of the system performance degradation depends on the specific diversity structures of transceiver systems. Here, the performances of OFDM systems with two antennas transceiver diversity were analyzed and compared with that of systems with only transmission diversity and without diversity as the phase noise characteristics varied.

## 키워드

송수신 다이버시티, phase noise, OFDM, interferences

## I. 서 론

기존의 음성위주의 정보나 문자데이터는 저속의 협대역 통신으로 지금도 가장 많이 이용되고 있는 서비스이다. 그러나 날이 갈수록 고품질의 이미지와 음성, 동영상 데이터와 같은 다양한 멀티미디어 데이터의 서비스

요구가 증가함에 따라 안정적인 고속 데이터 통신에 대한 요구가 급격히 증대되고 있다. 또한 최근 휴대용 컴퓨터와 이동통신의 보급이 확산되면서 이동체에서의 고속 데이터 통신 서비스 요구가 급증함에 따라 장소에 상관없이 컴퓨터 망에 연결시키는 수단으로 무선 데이터 전송의 중요도가 높아지고 있는 실정이다. 이에 따라 대

용량의 데이터를 신뢰성 있게 전송하기 위한 광대역 데이터 전송 서비스와 무선 채널을 통하여 이동성과 휴대성 및 간편성 등의 장점을 가지고 있는 고속 무선 LAN에 대한 연구가 계속되고 있다. 이러한 고속 멀티미디어 데이터 전송을 위해 제시되고 있는 방식이 다중 반송파 전송방식이며 이중 직교 주파수 분할 다중 반송파 전송방식은(OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 상호 직교성이 있는 부분송파를 사용함으로써 스펙트럼 효율이 다른 다중 반송파 전송 방식에 비해 우수하다는 장점을 가진다. 또한 이와 함께 무선채널에서의 다중경로 전파에 의한 페이딩 현상을 경감시키기 위한 다이버시티 기법에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다 [1][2][3].

그러나 OFDM 방식은 여러 개의 부분송파를 사용하기 때문에 송신단과 수신단의 반송파 주파수가 일치되지 못하면 부분송파 사이의 직교성이 파괴되어 부분송파들 사이에 인접 채널 간섭이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 위상잡음 특성을 모델링하고 이에 따른 반송파 간섭, 신호전력, 잡음전력을 고려하여 송수신 다이버시티 기법을 적용하는 OFDM 통신방식에서의 시스템의 열화현상을 고찰하였다. 즉 비교적 간단하게 구현이 가능한 2개의 송신 및 수신 안테나를 사용하는 다이버시티 시스템 과 2개의 송신 안테나 다이버시티 기법만을 적용한 경우, 단일 송수신 안테나를 사용하여 다이버시티 기법을 적용하지 않는 경우를 비교, 분석하였으며 위상잡음의 특성 변화에 따른 성능열화 정도를 고찰하였다.

## II. 송수신 다이버시티 기법

무선채널에서 전송된 신호는 심볼 간 간섭, 다중경로, 도플러 천이 등의 현상이 발생하게 되며 심각한 페이딩 현상이 발생할 수 있다. 페이딩 현상으로 인한 신호의 감쇄가 심할 경우 전송된 신호의 복원이 불가능하게 된다. 따라서 무선 환경에서는 안정적인 수신을 위하여 동일한 전송신호를 복사하여 여러 가지 방법으로 다시 전송하게 되는데 이러한 방법들을 일반적으로 송신 다이버시티 기법이라고 한다. 다이버시티 기술은 페이딩이 심한 채널에서 복사된 같은 신호들이 독립적인 페이딩을 겪게 한다면 전체적인 수신 신호의 페이딩 발생 확률을

현저히 낮출 수 있다는 것이다.

안테나 다이버시티는 구조적으로 크게 송신 다이버시티와 수신 다이버시티로 나눌 수 있다. 그러나 수신 다이버시티는 2개 이상 여러 개의 수신 안테나를 사용할 경우 수신단의 복잡도가 심화되고 그만큼 부피가 커져 휴대하거나 사용하는데 있어서 불편을 겪는 등 실제 시스템에 적용하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 고정된 무선 송신부에 송신 다이버시티 시스템을 구현하는 방법에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다[4][5]. 송신단에 다수의 안테나를 사용하는 형태의 송신 다이버시티 기술을 적용하게 되면 수신 다이버시티에서와 마찬가지로 페이딩에 의한 성능열화 정도를 개선시킬 수 있다. 또한 송신 및 수신 부모두에 다수의 안테나를 이용할 경우 더 나은 성능향상을 기대할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 송신 및 수신 다이버시티 기법을 동시에 적용하는 비교적 구조가 간단하여 구현이 용이한 OFDM 시스템을 가정하였으며 이러한 시스템에서의 위상잡음이 그 특성에 따라 전체적인 시스템 성능에 어느 정도의 영향을 미치게 되는지를 정량적으로 분석하였다.

2개의 송신 안테나만을 적용할 경우의 일반적인 구조를 그림 1에 표시하였다. Alamouti에 의해 제안된 방식으로 2개의 가지를 갖는 송신 다이버시티 구조이다[6]. 2개의 송신 안테나와 하나의 수신 안테나를 사용하는 구조로서 시간 및 공간상에서 동일한 신호들을 서로 반복 전송하게 된다.

그림 2에서는 송신 및 수신단에 각각 2개의 안테나를 갖는 송수신 다이버시티 구조를 나타내고 있다. 송신단에서와 마찬가지로 수신단에서도 시간과 공간영역에서 부호화시킨 전송신호들을 수신, 결합하여 고속 무선 통신 시스템에서의 보다 안정적이고 신뢰성 있는 신호의 추정이 이루어 질 수 있도록 하는데 목적이 있다.

### 2.1 2개의 송신 안테나 다이버시티 구조

Alamouti 부호기는 두개의 송신 안테나에서 동일한 심볼 구간을 가지는 심볼들을 동시에 전송하게 된다. 첫 번째 시간 슬롯 (time  $t$ )에서는 복소수 심볼인  $s_0, s_1$ 을 전송한다.  $s_0$ 는 첫 번째 안테나에서 전송된 심볼이고  $s_1$ 은 두 번째 안테나에서 전송된 심볼이다. 두 번째 시간 슬롯 (time  $t+T$ )에서는  $-s_1^*, s_0^*$ 를 각각 전송하게 된다.

이러한 신호들은 결합된 후 최종적으로 maximum likelihood detector 로 보내져 원 신호를 추정, 복원하게 된다[6][7].

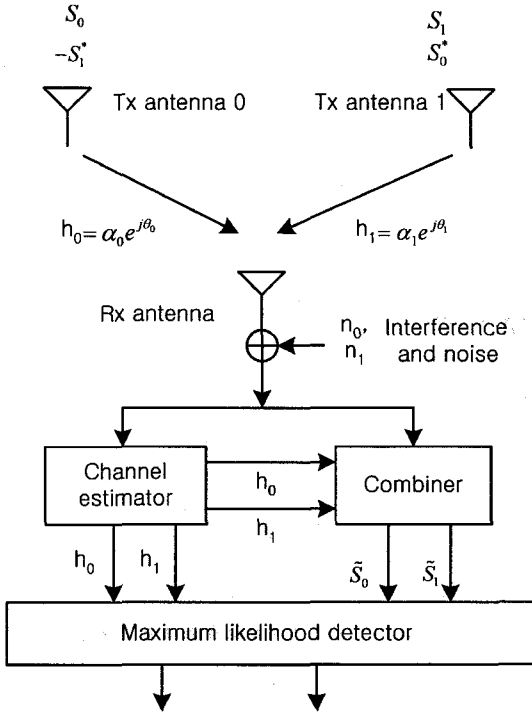


그림 1. 두개의 송신 안테나 다이버시티 구조  
Fig. 1 The structure of 2-transmission antenna diversity

2.2개의 송신 및 수신 안테나 다이버시티 구조

무선채널에서는 간섭, 도플러 천이, 다중경로 등의 영향으로 인하여 심각한 페이딩 현상이 발생할 수 있다. 따라서 앞에서의 송신 다이버시티 구조에서 보는 것처럼 안정적인 신호의 수신을 위하여 동일한 전송신호를 여러 가지 방법으로 재전송하거나 재 수신하게 된다[3][4]. 본 논문에서는 수신 단에서도 비교적 간단히 구현할 수 있는 2개의 수신 안테나 다이버시티 구조를 적용하였다. 즉 송수신부에 각각 2개의 송신 및 수신 안테나 다이버시티를 적용하여 OFDM 시스템을 구성하는 것을 가정하였다. 그림 2에 간략한 블록도로 표시하였으며 전달경로에 따른 송수신 채널 및 수신 신호들을 나타내었다. 두개의 송신 안테나에선  $s_0, s_1$  두개의 심벌과 그 심벌들의

켈레 복소수  $-s_1^*, s_0^*$  를 시간 슬롯  $t$  와  $t+T$  에 각각 전송하고 두 개의 수신 안테나에서 채널 및 잡음의 영향을 받은 4개의 심벌들을 차례로 수신하게 된다[2][3][5]. 이러한 각각의 수신된 신호들은 combiner 에서 결합된 후 추정, 복원된다.

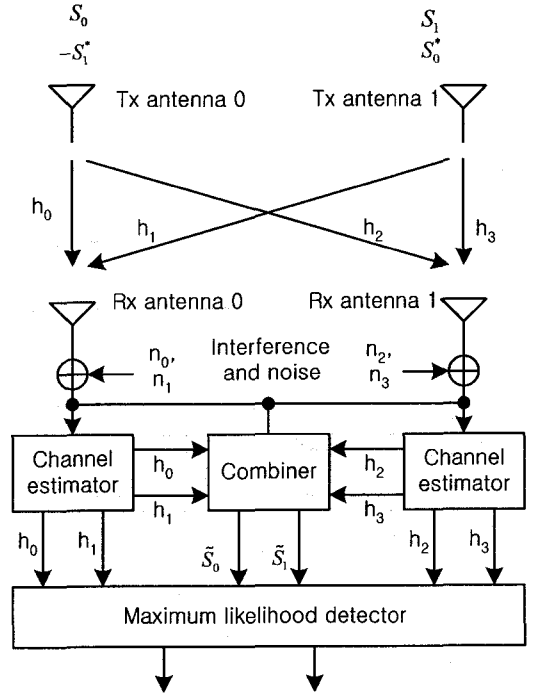


그림 2. 두개의 송신 및 수신 안테나 구조  
Fig. 2 The structure of 2-transceiver antenna diversity

이러한 경우 채널이 주파수 선택적(frequency selective fading)이며, 연속되는 심벌 구간에서는 채널이 일정하고, 각각의 송신 및 수신 안테나 사이의 페이딩(fading)이 서로 독립적이라는 것을 가정하였다.

III. 위상잡음에 의한 OFDM 시스템 영향

통신 시스템에서의 위상잡음은 주로 고주파 발생장치인 오실레이터의 출력 phase noise 로 인하여 발생하게 된다. 이로 인한 영향은 두가지로 나눌 수 있는데 common phase error와 ICI(Interchannel Interference)이다.

신호가 무선채널로 송신되어 채널의 임펄스 응답  $h(t)$ 와 오실레이터의 위상잡음 (phase noise)  $\phi(t)$ 에 의해 영향을 받은 OFDM 수신단에서의 복조된 신호는 다음과 같이 세 부분으로 나누어 정리 할 수 있다[8][9].

$$Y_i = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{k \in K} X_k H_k e^{j2\pi(k-i)n/N} \right] + \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{k \in K} X_k H_k e^{j2\pi(k-i)n/N} \cdot j\phi(n) \right] + W_i \quad (1)$$

위 식에서 첫 번째 부분이 원하는 신호부분, 두 번째 부분은 위상잡음  $\phi(n)$ 에 의해 생기는 부반송파 간섭 부분 그리고 세 번째 부분은 백색잡음을 나타낸다. 위 식의 반송파 간섭부분에서  $k=i$ 인 경우를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = \frac{X_i H_i}{N} \sum_{n=0}^{N-1} j\phi(n) = \frac{jX_i H_i}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \phi(n) = jX_i H_i \cdot \phi_0 \quad (2)$$

즉,  $P_i$ 는  $i$  번째 반송파에 작용하는 위상잡음의 영향을 나타내며 그 크기는 수신신호에 비례한다. 그러므로 위 식은 모든 반송파에 공통적으로 작용하는 common phase error를 나타낸다. 다음으로  $k \neq i$ 인 경우에는 다음과 같이 정리 된다.

$$A_i = \sum_{\substack{k \in K \\ k \neq i}} \frac{X_k H_k}{N} \sum_{n=0}^{N-1} j\phi(n) \cdot e^{j2\pi(k-i)n/N} = \sum_{\substack{k \in K \\ k \neq i}} X_k H_k j\phi_{k-i} \quad (3)$$

위 식에서  $A_i$ 는 주파수 이동된  $\phi(n)$ 의 합 과 수신 신호와의 곱으로 이루어져 있으므로 마치 잡음과 비슷한 성격의  $i$ 번째 부반송파에 작용하는 다른 부반송파의 간섭을 나타낸다.

이제 보다 간편하게 common phase error(CPE)와 반송파 간섭을 계산하기 위해서  $n$ 번째 부반송파를 제외한 나머지 반송파들을 0으로 설정하고  $n$ 번째 부반송파의 심볼 크기는  $X_k = 1$ 로 가정하면 전송모델을 다음과 같

이 매우 간략한 그림으로 나타낼 수 있다.

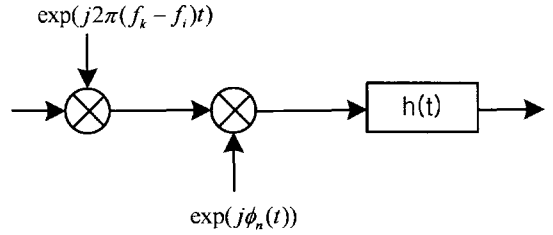


그림 3. 간략화한 전송모델  
Fig. 3. The simplified transmission model

위 그림에서  $k \neq i$ 인 경우  $i$  번째 부반송파에 작용하는  $k$  번째 부반송파 간섭 부분은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$Y_i = \frac{1}{T} j\phi_n(t) e^{j2\pi(f_k - f_i)t} \otimes \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$$

즉, 부반송파 간섭은 주파수 천이된 페이즈 노이즈 프로세스를,  $T$ 시간동안 크기  $1/T$ 인 구형 펄스(rectangular pulse) 형태의 임펄스 응답,  $h(t)$ 를 갖는 필터에 인가한 출력형태를 갖는다. 그러므로 부반송파 간섭의 PSD(Power spectral density)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{Y_i} \approx L_{\phi_N}(f - [f_k - f_i]) \cdot \text{sinc}^2(fT) \quad (4)$$

그러므로  $i$ 번째 부반송파에 대한  $k$ 번째 부반송파 간섭의 평균전력은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\sigma_{Scl,k}^2 \approx \int_{-\infty}^{\infty} L_{\phi_N}(f - [f_k - f_i]) \cdot \text{sinc}^2(fT) df \quad (5)$$

다음으로 CPE를 계산하기 위해서 그림 3에서  $k=i$ 인 경우를 보면  $Y_i = \frac{1}{T} j\phi_n(t) \otimes \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ 가 되므로 CPE의 PSD는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{CPE}(f) \approx L_{\phi_N}(f) \cdot \text{sinc}^2(fT) \quad (6)$$

따라서 CPE의 평균전력은 다음과 같이 표현되며 위

상잡음 특성이 OFDM 심벌시간동안 stationary 하다면 CPE는 모든 부반송파에 공통적인 크기로 작용하게 된다.

$$\sigma_{CPE}^2 \approx \int_{-\infty}^{\infty} L_{\phi_n}(f) \cdot \text{sinc}^2(fT) df \quad (7)$$

#### IV. 위상잡음 특성 변화 및 결과

본 논문에서는 송신 및 수신 다이버시티 시스템에서의 위상잡음에 의한 영향을 분석하기 위해서 Rayleigh 채널환경에서 실제 측정치를 비교적 정확하게 표시할 수 있는 다음과 같은 위상잡음 모델을 가정하였다[8].

$$L_{\phi_n}(f) = 10^{-c} + \begin{cases} 10^{-a} & : |f| \leq f_l \\ 10^{-(f-f_l)\frac{b}{(f_h-f_l)}-a} & : f_l < f \\ 10^{(f+f_l)\frac{b}{(f_h-f_l)}-a} & : f < -f_l \end{cases} \quad (8)$$

위 식에서 파라미터 a는 중심주파수로부터  $\pm f_l$ 까지의 위상잡음 level을, 파라미터 b는  $f_l \sim f_h$ 까지의 주파수가 증가함에 따른 위상잡음 감쇄의 가파름을, 파라미터 c는 white phase noise 층을 결정한다.

#### 4.1 위상잡음 전력 크기 변화에 따른 영향

먼저 시스템의 위상잡음 전력에 따른 영향을 분석하기 위하여 위상잡음 전력 스펙트럼의 메인대역폭을 일정하게 고정시키고 전력이 증가함에 따라서 얻어질 수 있는 위상잡음 모델의 종류들을 표 1에 예시하였다.

표 1. 위상잡음 전력에 따른 파라미터  
Table 1. phase noise power parameters

	a	b	c	$2^*f_l$ (KHz)	$2^*f_h$ (KHz)	$\sigma^2\psi$ (power)
model-1	14.5	4	12	20	200	$1 \times 10^{-10}$
model-2	7.86	4.2	12	20	200	$5.26 \times 10^{-4}$
model-3	6.84	5.2	12	20	200	$5 \times 10^{-3}$

그림 4의 결과에서는 위상잡음 전력 스펙트럼의 메인 대역폭을 일정하게 유지 시키고 전체 잡음전력의 크기를 점차 증가시켜 가면서 OFDM 시스템의 BER 성능을 고찰하였다. 결과 그림에서 보는 것처럼 위상잡음 전력의 크기가 비교적 작은 경우 2개의 송신 안테나 또는 2개의 송신 및 수신 안테나를 이용한 송수신다이버시티 시스템은 상당한 성능개선 효과를 보인다. 특히 송신 및 수신 다이버시티를 동시에 적용한 경우 개선 효과가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 위상잡음의 전력이 너무 큰 경우 그 개선 효과는 크지 않음을 확인할 수 있다.

#### 4.2. 위상잡음 분산 정도에 따른 영향

위상잡음 퍼짐에 따른 영향을 분석하기 위해서 표 2와 같이 위상잡음 전력 스펙트럼의 전력을 일정하게 유지하면서 메인 대역폭을 극단적으로 부반송파 대역폭의 2배까지 증가시켰다.

표 2. 위상잡음 퍼짐에 따른 파라미터  
Table 2. Parameters according to phase noise

	a	b	c	$2^*f_l$ (KHz)	$2^*f_h$ (KHz)	$\sigma^2\psi$ (power)
model-1	7.6839	7.4	15	42	100	$10^{-3}$
model-2	7.6145	7.4	15	22	350	$10^{-3}$
model-3	7.5638	7.5	15	2	600	$10^{-3}$

위상잡음의 퍼짐이 다이버시티 시스템에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 위상잡음 전력의 전체 크기를  $10^{-3}$  및  $10^{-2}$  로 고정시켰으며 위상잡음 전력 퍼짐정도를 증가시키면서 2개의 송신 안테나 또는 송수신부에 각각 2개의 안테나를 적용하는 OFDM 다이버시티 시스템에서의 위상잡음의 퍼짐에 따른 성능을 그림 5와 그림 6에 표시하였다.

그림 5와 그림 6에서 보는 것처럼 송수신 다이버시티 기법에 따른 위상잡음의 영향은 위상잡음의 전력이 일정한 경우 위상잡음의 퍼짐에는 거의 영향을 받지 않고 위상잡음 전력의 크기에 따라 비교적 일정하게 성능 특성이 유지된다는 것을 알 수 있다.

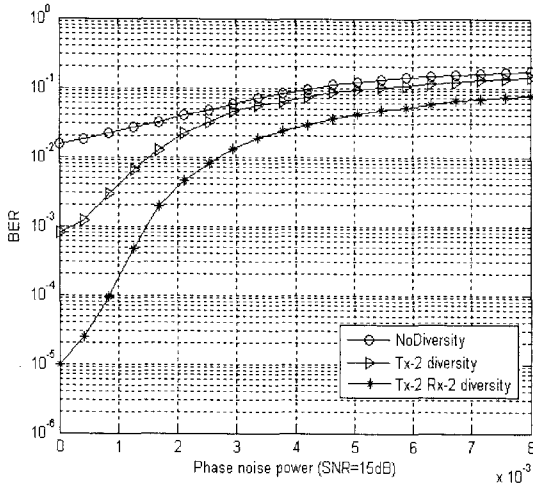


그림 4. 위상잡음 전력에 따른 송신 및 수신 다이버시티 영향

Fig. 4 The effects of transceiver diversity according to phase noise power

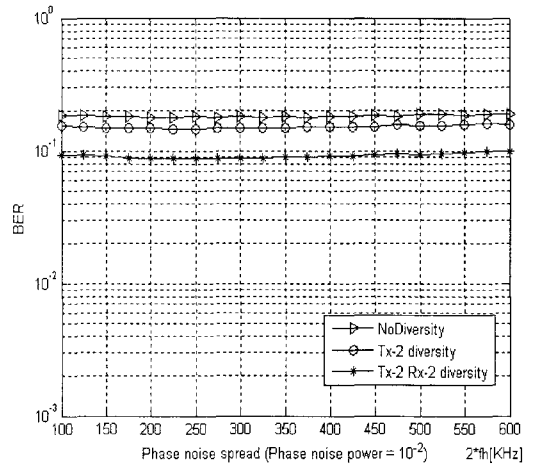


그림 6. 위상잡음 퍼짐에 따른 송신 및 수신 다이버시티 영향 (Phase noise power = 10<sup>-2</sup>)

Fig. 6 The effects of transceiver diversity according to phase noise spread

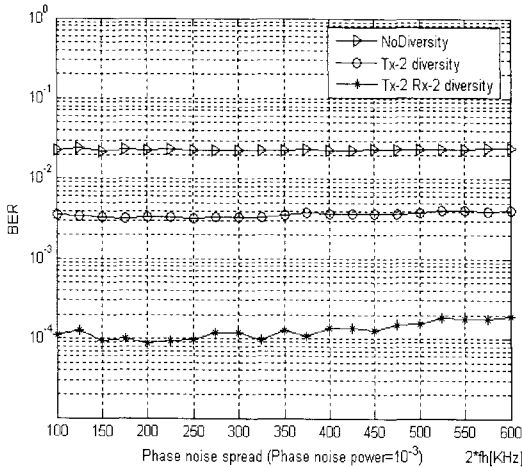


그림 5. 위상잡음 퍼짐에 따른 송신 및 수신 다이버시티 영향 (phase noise power = 10<sup>-3</sup>)

Fig. 5 The effects of transceiver diversity according to phase noise spread

## V. 결론

본 연구에서는 OFDM 시스템에서의 시스템 위상잡음에 의한 열화현상을 분석하기 위하여 위상잡음 모델을 설정하고 위상잡음 전력밀도의 크기 및 형태를 다양하게 변화시키면서 비교적 구현이 용이한 간단한 송신 및 송수신 다이버시티 시스템에서의 위상잡음에 따른 열화정도를 고찰하였다. 즉, 2개의 송신 안테나를 사용하는 경우와 송수신부 모두에서 각각 2개의 송신 및 수신 안테나를 활용하는 다이버시티 시스템에서의 성능을 검증하였다.

시스템의 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 위상잡음 모델 파라미터들을 구체적으로 설정함으로써 위상잡음의 평균전력 크기와 또한 위상잡음 스펙트럼의 메인대역폭의 증감, 즉 퍼짐에 따른 성능분석 결과들을 얻을 수 있었다. 결과들에서 볼 수 있는 것처럼 위상잡음 전력의 크기는 송신 및 송수신 다이버시티 시스템에 매우 나쁜 영향을 줄 수 있는데 시스템의 위상잡음이 커짐에 따라 다이버시티 시스템에 미치는 영향은 커지게 된다. 그러나 비교적 간단히 구현할 수 있는 2개의 송신 및 수신 안테나를 모두 사용하는 다이버시티 시스템의 경우는 그림의 결과들에서 알 수 있듯이 다이버시티를 적용하지 않거나 송신 다이버시티만 적용하는 경우에 비

하여 상대적으로 위상잡음에 의한 시스템 열화현상 정도를 좀 더 경감시킬 수 있다. 이러한 경감정도는 위상잡음 전력의 크기가 작을수록 더 뚜렷하게 나타난다. 그러나 위상잡음의 평균 전력이 일정하다면 위상잡음 전력 스펙트럼의 퍼짐정도의 차이는 송신 및 수신 다이버시티 시스템의 성능에 별다른 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] M. Patzold, *Mobile fading channels*, John Wiley & Sons, 2002
- [2] G. L. Stuber et al., "Broadband MIMO-OFDM wireless communications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, pp. 271-294, Feb. 2004
- [3] T. H. Liew and L. Hanzo, "Space-time codes and concatenated channel codes for wireless communications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 187-219, Feb. 2002
- [4] J. H. Winters, "The diversity gain of transmit diversity in wireless systems with Rayleigh fading", *Proc. IEEE Int. Conf. Communications*, pp. 1121-1125, 1994
- [5] D. Agrawal, V. Tarokh, et al. "Space-time coded OFDM high data-rate wireless communication over wideband channels", *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf.*, pp. 2232-2236, 1998
- [6] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity scheme for wireless communications", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1988
- [7] B. Lu and X. Wang, "Space-time code design in OFDM systems", *Proc. Globecom*, vol. 2, pp. 1000-1004, 2000
- [8] P. Robertson and S. Kaiser, "Analysis of the effects of phase noise in orthogonal frequency division multiplex systems", *Proc. ICC*, pp.1652-1657, Seattle, WA, 1995
- [9] L. J. Cimimi, Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", *IEEE Trans. Commun.* vol. 33, pp. 665-675, July 1985

### 저자소개

이 종 길 (Jong Gil Lee)



1982년 2월 연세대학교 전자 공학과 (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