

송수신 다이버시티 시스템에서의 위상잡음 영향 분석

이승룡* · 이종길*

*인천대학교

Analysis of Phase Noise Effects in Transceiver Diversity Systems

Seungryong Lee* · Jong Gil Lee**

*University of Incheon

E-mail : jnglee@incheon.ac.kr

요 약

OFDM 시스템은 고속 데이터 전송 능력 및 효율적인 주파수 대역 이용 특성 때문에 그 활용 가능성이 날로 커지고 있다. 그러나 OFDM 시스템은 위상잡음에 매우 민감한 특성을 보이는데 시스템 위상잡음의 정도에 따라 직교성 상실에 의한 반송파 간섭 및 전체적인 시스템 잡음의 증가를 초래할 수 있다. 따라서 이러한 위상 잡음의 영향을 분석하기 위하여 위상잡음의 분포특성 및 크기를 모델링하고 이러한 위상잡음의 변화에 따른 시스템 성능의 열화정도를 분석하였다. 특히 본 논문에서는 비교적 간단한 송신 및 수신 다이버시티 적용 시스템에서의 위상잡음에 의한 성능열화 정도를 분석하였다.

ABSTRACT

The popularity of OFDM systems is being increased because of high speed data transmission capability and the spectral efficiency characteristics. However, since OFDM systems are very sensitive to the phase noise, The interference among subcarriers and the total system noise can be increased seriously due to the degree of phase noise effects which can cause the orthogonality problems. Therefore, these phase noise effects were analyzed using the phase noise model by varying its parameters. Especially in this paper, The degree of system performance degradation was investigated for the OFDM systems applying the relatively simple transmit and receiver diversity.

키워드

phase noise, diversity, interference, OFDM

1. 서 론

무선 및 이동통신이 비약적으로 발전함에 따라 날이 갈수록 멀티미디어 서비스를 위한 무선 고속데이터 송수신 기술의 필요성이 커지게 되었다. 이러한 요구에 부응할 수 있는 유용한 시스템중의 하나가 OFDM 방식 통신 시스템이다. OFDM 방식은 다수의 부 반송파를 이용하는 다중 주파수 방식의 일종으로서 각 부반송파의 직교성을 이용하여 변조된 신호의 주파수 대역을 겹쳐서 전송할 수 있게 함으로서 효율적인 주파수대역

사용이 가능하게끔 하였다. 따라서 OFDM 전송 기술은 부반송파 수만큼 심볼의 주기가 확장되므로 다중경로 전파에 따른 심볼간 간섭문제에 상당히 효율적이며 상대적으로 느린 시변 채널인 경우 특정 가입자에 대해 신호 대 잡음 비에 따라 전송속도를 가변시킴으로서 최적화된 통신이 가능하다.

그러나 이러한 OFDM 시스템은 여러 개의 부 반송파를 사용하기 때문에 이러한 부반송파 주파수가 시스템 위상잡음의 영향으로 인하여 송신 및 수신 단에서 정확히 일치되지 못할 경우 각

부반송파사이의 직교성이 상실되어 부반송파들 채널간의 간섭현상이 발생하게 된다. 이러한 간섭 현상들은 그 정도에 따라 시스템의 성능에 심각한 영향을 줄 수 있다.

이러한 위상잡음에 의한 영향은 앞으로 많이 활용되어질 다이버시티 적용 시스템에서는 다소 강한 특성을 보인다. 따라서 본 논문에서는 비교적 간단한 구조인 2개의 송신 및 2개의 수신 안테나를 갖는 송수신 다이버시티 시스템에서의 성능 열화정도를 분석하였다.

II. 송수신 다이버시티 기법

무선채널의 경우 유선채널과는 달리 간섭, 도플러 천이, 다중경로 등의 영향으로 인하여 심각한 페이딩 현상이 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 신호의 수신을 위하여 동일한 전송신호를 여러 가지 방법으로 재전송하거나 재 수신하게 된다[1][2]. 이러한 방법들을 일반적으로 송수신 다이버시티 방법이라고 부른다. 다이버시티 기술을 적용하여 각각의 송수신 채널이 어느 정도의 독립성이 유지된다면 신호의 페이딩 확률을 현저히 낮출 수 있을 것이다. 본 논문에서는 일반적으로 간단히 구현할 수 있는 2개의 송신 및 수신 안테나 다이버시티를 적용하여 OFDM 시스템을 구성하는 것을 가정하였다. 그림 1 과 표 1, 표 2 에서 보는 것처럼 Alamouti 가 제안한 방법과 같은 구조이다. 두 개의 송신 안테나에선 s_0, s_1 두 개의 심볼과 그 심볼들의 쥘레 복소수 $-s_1^*, s_0^*$ 를 시간슬롯 t 과 $t+T$ 에 각각 전송하고 두 개의 수신 안테나에서 두 개의 심볼들을 차례로 수신 받아 처리한다[3].

표 1. 송수신 다이버시티 채널

	송신 안테나 0	수신 안테나 1
송신 안테나 0	h_0	h_2
수신 안테나 1	h_1	h_3

표 2. 수신 신호

	수신안테나 0	수신안테나 1
시각 t	r_0	r_2
시각 $t+T$	r_1	r_3

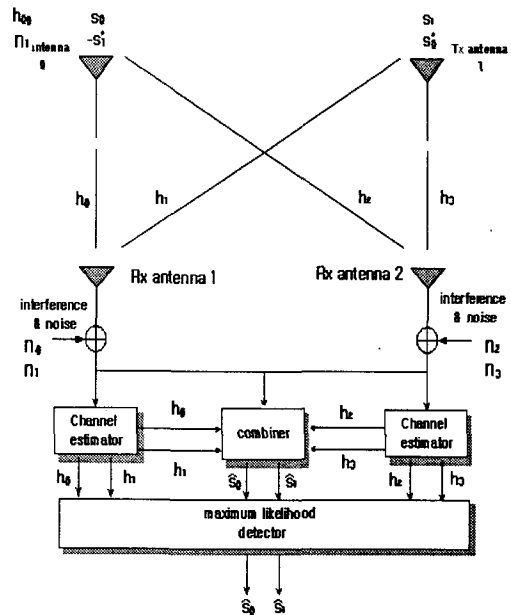


그림 1. 두개의 송수신 안테나 구조

따라서 송수신 채널은 다음과 같은 식들로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h_0(t) &= h_0(t+T) = h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \\
 h_1(t) &= h_1(t+T) = h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \\
 h_2(t) &= h_2(t+T) = h_2 = \alpha_2 e^{j\theta_2} \\
 h_3(t) &= h_3(t+T) = h_3 = \alpha_3 e^{j\theta_3}
 \end{aligned} \tag{1}$$

이러한 경우 채널이 주파수 선택적(frequency selective fading)이며, 연속되는 심볼 구간에서는 채널이 일정하고, 각각의 송신 및 수신안테나 사이의 페이딩(fading)이 서로 독립적이라는 것을 가정하였다. 그러므로 2개의 안테나를 가지는 수신 단에서의 수신 신호는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\
 r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\
 r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\
 r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3
 \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)와 같은 방법으로 수신된 신호는 최종적으로 Maximum likelihood detector로 보내져서 원 신호를 복원하게 된다. 즉, 다음과 같은 방법으로

원래의 신호를 추정, 복원하게 된다.

$$\begin{aligned} \bar{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1^* r_1 + h_2^* r_2 + h_3^* r_3 = \\ &(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1^* n_1 + h_2^* n_2 + h_3^* n_3 \quad (3) \\ \bar{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0^* r_1 + h_3^* r_2 - h_2^* r_3 = \\ &(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2) s_1 - h_0^* n_1 + h_1^* n_0 - h_2^* n_3 + h_3^* n_2 \end{aligned}$$

위의 식(3)과 같이 결합된 신호는 2개의 수신 안테나를 사용하게 되며 입력 심볼 두 개를 입력으로 사용하여 수신 단에서 두개의 신호를 수신하게 된다.

III. 위상잡음의 특성 및 결과

주로 오실레이터 불안정성으로 인해 위상이 랜덤하게 흔들리는 시스템 위상잡음이 발생한다. 이와 같은 시스템 위상잡음의 영향들은 CPE(Common Phase Error) 와 ICI(Interchannel Interference) 형태로 나타나게 된다. 일반적으로 수신단에서 OFDM 복조된 신호는 다음식과 같이 세 부분으로 나누어 정리할 수 있다.

$$Y_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} X_k H_k e^{j2\pi(k-\hat{\delta})/N} \right] + \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{k \in K} X_k H_k e^{j2\pi(k-\hat{\delta})/N} \cdot j\phi(n) \right] + W_i \quad (4)$$

위 식에서 첫 번째 부분은 원하는 신호부분, 두번째 부분은 위상잡음에 의해 생기는 부반송파 간섭 부분 그리고 세번째 부분은 백색잡음을 나타낸다. 보다 간편하게 CPE와 반송파 간섭을 계산하기 위해 n번째 부반송파를 제외한 나머지 반송파들을 0으로 설정하고 n제 부반송파의 심볼 크기는 $X_k=1$ 로 설정하면 다음과 같이 부반송파 간섭의 전력 스펙트럼 및 모든 부반송파에 공통적으로 작용하는 CPE를 표시할 수 있다.

$$L_{Y_i} \approx L_{\phi_n}(f - [f_k - f_i]) \cdot \text{sinc}^2(fT) \quad (5)$$

$$\sigma_{CPE}^2 \approx \int_{-\infty}^{\infty} L_{\phi_n}(f) \cdot \text{sinc}^2(fT) df \quad (6)$$

여기서 시스템 위상잡음 $\phi(n)$ 의 전력 스펙트럼 $L_{\phi_n}(f)$ 에 의한 영향을 분석하기 위하여 실제 위상잡음 측정값과 유사하게 모델링이 가능한 식(7)과 같은 위상잡음 파라미터를 갖는 모델을 가정하였다[4]. 채널의 특성은 일반적인 Rayleigh 채널로 가정하여 위상잡음에 따른 송수신 다이버시티 시스템에서의 영향을 분석하였다.

$$L_{\phi_n}(f) = 10^{-c} + \begin{cases} 10^{-a} & : |f| \leq f_l \\ 10^{-\frac{(f-f_l)b}{(f_h-f_l)} - a} & : f_l < f \\ 10^{\frac{(f+f_l)b}{(f_h-f_l)} - a} & : f < -f_l \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서 파라미터 a는 중심주파수로부터 $\pm f_l$ 까지의 위상잡음 level을, 파라미터 b는 $f_l \sim f_h$ 까지의 주파수가 증가함에 따른 노이즈 감쇄의 가파름을, 파라미터 c는 white phase noise 층을 결정한다.

1. 위상잡음 전력 크기에 의한 영향

시스템의 위상잡음 전력에 따른 영향을 분석하기 위하여 위상잡음 전력 스펙트럼의 메인대역폭을 일정하게 고정시키고 전력이 증가함에 따라 서 얻어질 수 있는 위상잡음 모델의 종류들을 표 3에 나타내었다.

표 3. 위상잡음 전력에 따른 파라미터

	a	b	c	2^*f_l (KHz)	2^*f_h (KHz)	σ^2_ψ (power)
model-1	14.5	4	12	20	200	1×10^{-10}
model-2	7.86	4.2	12	20	200	5.26×10^{-4}
model-3	6.84	5.2	12	20	200	5×10^{-3}

그림 2에 전력크기 증가에 따른 위상잡음 모델을 표시하였다. 그림 3의 결과에서는 위상잡음 전력 스펙트럼의 메인 대역폭을 일정하게 유지시키고 전체 잡음전력의 크기를 점차 증가시켜 가면서 OFDM 시스템의 BER 성능을 고찰하였다. 결과 그림에서 보는 것처럼 위상잡음 전력의 크기가 비교적 작은 경우 2개의 송신 및 수신 안테나를 이용한 송수신다이버시티 시스템은 상당한 성능개선 효과를 보인다. 그러나 위상잡음의 전력이 너무 큰 경우 그 개선 효과는 크지 않음을 확인할 수 있다.

2. 위상잡음 분산에 의한 영향

위상잡음 퍼짐에 따른 영향을 분석하기 위해서 표 4와 같이 위상잡음 전력 스펙트럼의 전력을 일정하게 유지하면서 메인 대역폭을 극단적으로 부반송파 대역폭의 2배까지 증가시키면서 시스템의 열화정도를 분석하였다.

표 4. 위상잡음 분산에 따른 파라미터

	a	b	c	$2 \cdot f_l$ (KHz)	$2 \cdot f_h$ (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 송신 다이버시티 시스템에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 위상잡음 전력의 전체 크기를 10^{-3} 로 고정시켰으며 위상잡음 전력 퍼짐정도를 증가시키면서 각각 2개의 송수신 안테나를 이용하는 OFDM 다이버시티 시스템의 성능 열화 정도를 그림 4에 표시하였다. 그림 4에서 보는 것처럼 송수신 다이버시티 효과는 위상잡음의 퍼짐에는 거의 영향을 받지 않고 비교적 일정하게 유지된다는 것을 알 수 있다.

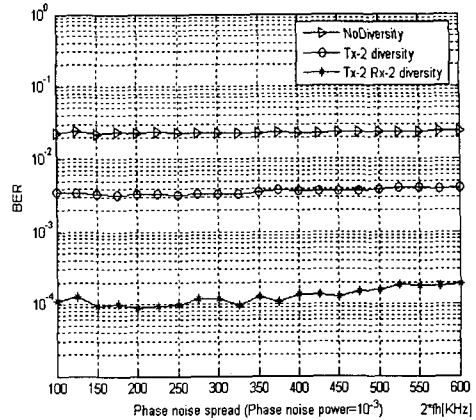


그림 4. 위상잡음 분산에 따른 송수신 다이버시티 효과 (위상잡음 전력= 10^{-3})

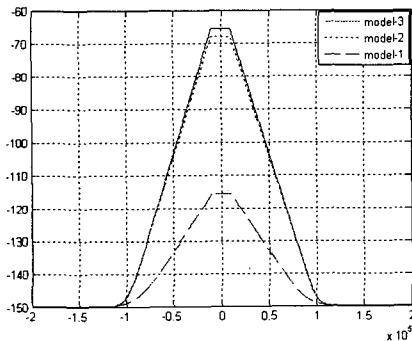


그림 2. 전력크기 증가에 따른 위상잡음 모델

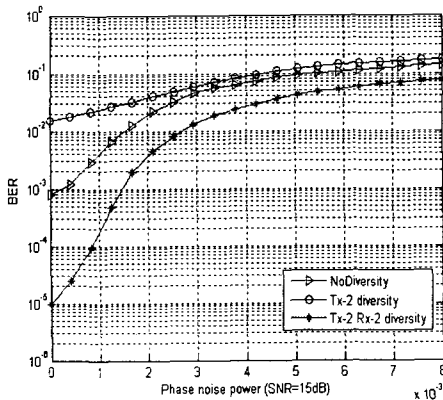


그림 3. 위상잡음 전력 크기 변화에 따른 송수신 다이버시티 효과

IV. 결론

본 연구에서는 간단한 송수신 다이버시티를 적용하는 OFDM 시스템에서의 위상잡음에 의한 시스템 열화현상을 분석하였다. 위상잡음에 의한 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 위상잡음 전력 모델을 설정하고 위상잡음 전력의 크기 및 형태를 다양하게 변화시키면서 시스템의 성능 열화 정도를 검증하였다. 결과 그림들에서 볼 수 있는 것처럼 위상잡음의 전력의 크기가 상당히 크지 않은 경우에는 송수신 다이버시티 적용 시스템에서의 성능 열화정도가 훨씬 적게 나타남을 확인할 수 있다.

* 본 연구는 산업자원부, 한국산업기술평가원 지정 인천대학교 멀티미디어연구센터의 지원에 의한 것입니다

참고문헌

- [1] 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
- [2] T. S. Rappoport, *Wireless Communications*, 2nd edition, Prentice Hall PTR, 2002
- [3] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity scheme for wireless communications", IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1988
- [4] Y. Ou, et al., "phase noise simulation and estimation methods," IEEE Trans. Circuit and Systems, vol. 49, pp. 635-638, 2002