

IQ Imbalance와 위상 잡음을 고려한 OFDM 통신 시스템의 성능 분석

Performance Analysis of OFDM Communication System with the IQ Imbalance and Phase Noise

김상균 · 유흥균 · 강병수* · 이광천*

Sang-Kyun Kim · Heung-Gyoon Ryu · Byung-Su Kang* · Kwangchun Lee*

요 약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 이동성이 있는 고속 데이터 전송에 적합한 전송 방법으로 널리 알려져 있지만, 위상 잡음과 직교 불균형(IQ imbalance)에 매우 민감한 특성을 보이는 단점이 있다. 그러므로, 본 논문에서는 위상 잡음 특성에 따른 위상 잡음 분산을 계산한 다음, 직교 불균형이 있는 OFDM 시스템의 통신 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 위상 잡음의 분산과 직교 불균형의 크기 변화에 따라 통신 성능이 변화하는 것을 분석하였다. 분석 결과, 진폭 불균형이 $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4$ 이고, 위상 불균형이 $\phi=10^0$ 이고, 위상 잡음의 분산 $\sigma^2=0.012$ 일 때, BER은 10^{-5} 에서 각각 2.88 dB, 3.61 dB, 4.69 dB의 SNR penalty가 존재한다.

Abstract

OFDM system is an excellent high speed transmission method but it is seriously sensitive to the phase noise and IQ imbalance. Therefore, in this paper, we analyze the communication performance of the OFDM communication system with IQ imbalance and phase noise. Phase noise's variance can be calculated by integral calculus of phase noise power spectrum. From simulation results, it can be shown that the BER performances show different change according to the phase noise variance and IQ imbalance amount. When amplitude imbalance is $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4$ and phase imbalance is $\phi=10^0$, and distribution of phase noise is $\sigma^2=0.012$, BER is degraded by 2.88 dB, 3.61 dB, 4.69 dB in 10^{-5} in the respect of the SNR penalty

Key words : Phase Noise, OFDM and IQ Imbalance, BER Analysis

I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 impulse noise와 멀티 패스 효과에 강하고, 시스템이 이용할 수 있는 대역폭을 더욱 넓히는 능력 때문에 최근 많은 무선 application에서 사용되는 변조 방법이다^{[1]-[3]}. 그러나 OFDM은 무선 주파수(RF) front-end 요소의 손상에 민감하다. 손상의 주요 원인은 인

호의 in-phase(I)와 quadrature-phase(Q) 사이의 불균형이다. 그리고 위상 잡음, 주파수 옵셋 등의 문제점들이 통신 성능에 나쁜 영향으로 나타난다. 보통, 베이스밴드 신호는 안테나에 전달되기 전에 무선 주파수로 업 컨버트 변환하게 된다. 수신기 쪽에서, RF 신호는 베이스밴드로 down-converted하게 되고, 디지털로 처리된다. OFDM 신호는 복잡한 신호이기 때문에, up-conversion은 코사인파 사인 파형이 필요하다.

충북대학교 전자공학과 및 컴퓨터정보통신연구소(Dept. of Electronic Engineering and Research Institute of Computer, Information & Communication, Chungbuk National University)

*한국전자통신연구원 이동통신연구단 RF 기술 연구팀(RF Technology Team, Mobile Telecommunication Research Division, ETRI)

· 논문 번호 : 20070430-051

· 수정완료일자 : 2007년 7월 18일

부정확한 제작 때문에 코사인과 사인 파형 사이의 phase 시프트는 90°가 되지 않고 그것은 같은 진폭도 가지지 않는다. IQ 불균형은 시스템의 성능을 급격하게 감소시킨다. 특히 송신기의 업 컨버터와 수신기의 다운 컨버터와 같은 국부 발진기에서 발생하는 위상 잡음은 OFDM 시스템에서 부반송파간의 직교성에 영향을 주어 ICI(Inter sub-Carrier Interference)를 증가시키는 요인으로 작용한다^[4].

IQ 불균형의 영향과 위상 잡음에 대해 사전 연구들이 있었다. 참고문헌 [5], [6]에서 아날로그 대역에서의 up-conversion과 down-conversion, IQ 불균형이 소개되었다. 위상과 진폭 mismatch 모델이 참고문헌 [7]에서 유도되었다. OFDM 시스템에 관한 IQ 불균형의 영향은 참고문헌 [8], [9]에서 연구되었다. 참고문헌 [10]에서, 시뮬레이션 결과는 MIMO-OFDM 시스템에서 IQ 불균형의 한계를 보여주었다. 이들은 또한 직교 space-time codes의 구조를 이용해서 IQ 불균형에 강한 MIMO 수신기 구조를 설계하였다. 참고문헌 [11]에서, 저자들은 불균형 인자를 계산하기 위한 추정 기법을 제안했다. 추정된 매개 변수들은 calibrate 수신기 불균형을 위해 사용된다. IQ 불균형과 위상 잡음과 주파수 offset 같은 몇몇 손상들은 참고문헌 [12], [13]에서 연구되었다. 2001년 A. G. Armada는 OFDM 통신 시스템에서 문제가 되는 위상 잡음의 예측과 분석에 관한 연구를 하였다^[4]. 1995년 T. Pollet는 주파수 오프셋과 위상 잡음이 존재하는 OFDM 시스템에서의 BER 성능을 분석하였다^[4].

본 논문에서는, 대용량 고속 전송에 적합한 OFDM 통신 시스템이 단일 반송파 시스템과 달리 여러 가지 특성에 아주 민감한 특성을 지니고 있음을 연구하였다. 즉, 시스템 외부 채널 등의 원인이 아니라 시스템 내부에서 발생하는 IQ imbalance와 위상잡음이 동시 발생하여 이들에 의한 특성 분석을 연구하였다. 단계적으로, IQ 불균형의 영향이 OFDM 전체 시스템에 통신 성능에 끼치는 영향을 연구하고, IQ 불균형과 위상 잡음이 동시 작용되는 경우의 통신 성능을 연구하였으며, 이를 바탕으로 한 시스템의 성능 분석 결과는 실제 시뮬레이션을 통해서도 확인하였다.

II. OFDM 시스템의 직교 불균형



그림 1. OFDM 송신기의 간단한 block diagram
Fig. 1. Simple block diagram of OFDM transmitter.

OFDM는 FFT와 IFFT에 의해 효율적으로 구현될 수 있다. 송신기에서 IFFT는 신호를 주파수 축에서 시간 축으로 변환시킨다. OFDM 송신기의 간단한 block diagram이 그림 1에 있다.

Serial to parallel converter(S/P) 후의 입력 data를 $X=[X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$ 이라고 하자. 시간 축에서 OFDM 신호의 complex base-band는 다음과 같이 주어진다.

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi n t / NT}, \quad 0 \leq t < NT \quad (1)$$

여기서 T 는 data 주기이고, NT 는 OFDM symbol duration이고, $\Delta f = \frac{1}{NT}$ 은 sub-carrier spacing이다. IFFT 후 신호는 송신기의 P/S에서 parallel to serial로 변환된다. 시간 축 신호 $x(t)$ 의 sample된 신호는 sequence $x=[x_0, x_1, \dots, x_{LN-1}]^T$ 이다. L 은 oversampling factor로 불리는 1보다 크거나 같은 정수이다. $L=1$ 일 때, sample들은 Nyquist rate sampling을 사용하여 구한다. “ L 배 over-sampled”된 시간 축 신호는 다음과 같이 얻어진다.

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi nk / LN} \quad k = 0, 1, \dots, LN - 1 \quad (2)$$

또는 $x=IFFT(X)$ 로 쓸 수 있다. 지금부터 이 논문에서 $L=1$ 일 경우를 고려할 것이다. 높은 주파수로 조정된 신호는 quadrature 변조에 의해 실현된다. $x(t)$ 의 실수 축과 허수 축은 in-phase(I) and quadrature(Q)로 간주한다. Local oscillation의 sine파와 cosine파가 필요하다. Local Oscillator(LO)는 I branch의 cosine waveform을 생성하고, 이 신호를 Q branch에서 90° shift 되게 위상을 맞춘다. 전송 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = I(t)\cos \omega_c t + Q(t)\sin \omega_c t \quad (3)$$

여기서 ω_c 는 carrier의 각 주파수이다. 참고문헌 [7]에 따르면 RF 신호는 2개의 branch에서 불균형을 만

들 것이다. 진폭과 위상에서 IQ 불균형 결과는 그림과 같이 표현된다.

이제, 송신 신호는 다음과 같이 표현된다. $I(t)$ 와 $Q(t)$ 를 I, Q 로 간단히 표기하기로 한다.

$$\hat{s}(t) = I \left(1 + \frac{\varepsilon}{2} \right) \cos \left(\omega_c t + \frac{\phi}{2} \right) + Q \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \sin \left(\omega_c t - \frac{\phi}{2} \right) \quad (4)$$

여기서 ε 은 이상적인 경우 I 와 Q branch 사이의 진폭 불균형이고 ϕ 는 위상 불균형이다. System의 성능은 IQ 불균형에 의해 감소된다. Quadrature 복조에 서 수신 신호는 각각 복조 carrier 신호 $\cos \omega_c t$ 와 $\sin \omega_c t$ 로 곱해진다. 잡음이 없는 channel을 가정하면, 복소수 형태로 신호가 결합된다.

$$r(t) = \left[I \left(1 + \frac{\varepsilon}{2} \right) \cos \frac{\phi}{2} - Q \left(1 + \frac{\varepsilon}{2} \right) \sin \frac{\phi}{2} \right] + j \left[-I \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \sin \frac{\phi}{2} + Q \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \cos \frac{\phi}{2} \right] \quad (5)$$

참고문헌 [15]의 참고문헌 자료를 이용하여, 계산 후에 다음을 유도할 수 있다.

$$r(t) = \left(\cos \frac{\phi}{2} + j \frac{\varepsilon}{2} \sin \frac{\phi}{2} \right) x(t) + \left(\frac{\varepsilon}{2} \cos \frac{\phi}{2} - j \sin \frac{\phi}{2} \right) x^*(t) \quad (6)$$

$$r(t) = \alpha_1 x(t) + \alpha_2 x^*(t) \quad (7)$$

여기서 $x(t) = I(t) + jQ(t)$; $x^*(t)$ 는 $x(t)$ 의 공액 복소수이다.

$$\alpha_1 = \cos \frac{\phi}{2} + j \frac{\varepsilon}{2} \sin \frac{\phi}{2} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \frac{\varepsilon}{2} \cos \frac{\phi}{2} - j \sin \frac{\phi}{2} \quad (9)$$

Down conversion 후에 복소수 base-band 신호 $r(t)$ OFDM 복조기로 보내진다. Serial to parallel로부터 변환된 $r(t)$ 의 이산 형태는 $r = [r_0, r_1, \dots, r_{N-1}]^T$ 이다. FFT를 거친 후 다음을 얻는다.

$$R = \alpha_1 X + \alpha_2 X^* \quad (10)$$

여기서 $R = [R_0, R_1, \dots, R_{N-1}]^T = FFT(r)$, $X = FFT(x) = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$, $X^* = FFT(x^*) = [X_0^*, X_1^*, \dots,$

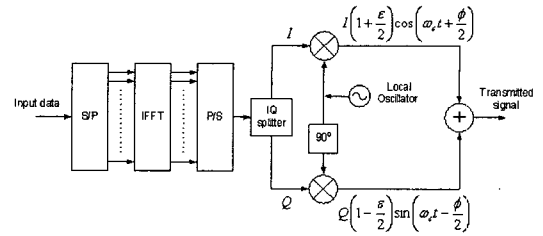


그림 2. IQ 불균형을 갖는 OFDM 송신기
Fig. 2. OFDM transmitter with IQ imbalance.

$X_{N/2}^*, X_{N/2-1}^*, \dots, X_1^*]^T$ 이다.

III. OFDM에서 위상 잡음

그림 2는 IQ 불균형을 갖는 OFDM 송신도이다. 송수신기에서 업다운 conversion을 위해 사용되는 국부 발진기로 인해 위상 잡음이 발생하고 이는 전체 시스템에 영향을 끼치게 된다. 이상적인 OFDM 신호가 잡음성 국부 발진기와 곱해진 후에는 모든 OFDM 부반송파에서 왜곡 현상이 나타난다. 국부 발진기의 영향을 받은 하나의 OFDM 신호는 자신의 신호에 영향을 주는 성분과 인접 부반송파 신호에 영향을 주는 성분을 가지게 된다. 전자의 경우는 일반적으로 공통 위상 에러(Common Phase Error: CPE)로 신호 정상점을 회전시키는 작용을 하며, 후자의 경우는 일반적으로 인접 부반송파간 간섭(Inter Sub-carrier Interference: ICI) 성분으로 OFDM 신호의 직교성을 저해하게 된다^{[4],[16]}.

이론적인 분석을 위해 가정을 한다. $s(t)$ 는 송신기 국부 발진기에 의해 업 conversion 되고, 수신기 국부 발진기에 의해 다운 conversion을 하게 된다. 이것은 식 (11)처럼 표현할 수 있다.

$$r(t) = \{s(t) \cdot e^{j\phi_{Tx}(t)} + n(t)\} \cdot e^{j\phi_{Rx}(t)} \quad (11)$$

$n(t)$ 는 복소 Gaussian 잡음이고 $\phi_{Tx}(t)$ 와 $\phi_{Rx}(t)$ 는 각각 송수신기 국부 발진기에서 발생하는 시변 위상 잡음 프로세스이다. 수신기에서 FFT 연산을 거친 후의 k 번째 부반송파 정보 신호는 다음과 같다.

$$Y_k = \sum_{m=0}^{N-1} r[m] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} km} = \sum_{l=0}^{N-1} X_l \cdot P_{l-k} + N_k \quad (12)$$

N_k 는 수신기 국부 발진기의 위상 잡음이 추가된

$n(t)$ 의 샘플된 FFT 형태이고, 분산 σ_n^2 을 가진다. 그리고 랜덤 위상 잡음 프로세스 $\phi[m]$ 은 $\phi_{TX}[m] + \phi_{RX}[m]$ 이다. 여기서 P_k 는 다음과 같다.

$$P_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j\phi[m]} \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}km} \quad (13)$$

기존 연구 참고문헌 [4], [14]에서는 위상 잡음의 분산을 매우 작거나 선형화를 조건으로 하여 $e^{j\phi[m]}$ 을 $1+j\phi[m]$ 로 간략히 근사화 하여 신호와 잡음항을 분리하였다.

본 연구는 IQ 불균형의 영향이 OFDM 시스템에 진폭과 위상 불균형을 일으키는 것에 위상 잡음을 더 첨가하는 것을 분석하는 것이므로 최종적으로 IQ imbalance 식 (5)에 phase noise $e^{j\phi[m]}$ 을 더 첨가하였다. 이것은 수신기의 국부 발진기에 의해 다운 conversion 되기 전의 신호로 식 (14)와 같이 얻을 수 있다^[19].

$$r(t) = \left[\left\{ I \left(1 + \frac{\epsilon}{2} \right) \cos \frac{\phi}{2} - Q \left(1 + \frac{\epsilon}{2} \right) \sin \frac{\phi}{2} \right\} + j \left\{ -I \left(1 - \frac{\epsilon}{2} \right) \sin \frac{\phi}{2} + Q \left(1 - \frac{\epsilon}{2} \right) \cos \frac{\phi}{2} \right\} \right] \cdot e^{j\phi_{rx}(t)} + n(t). \quad (14)$$

OFDM 시스템에서 국부 발진기 위상 잡음의 영향으로 발생하는 성능 저하를 평가하기 위해 감소 계수(Degradation Factor: DF)를 사용한다^[17]. DF는 위상 잡음이 존재할 때와 존재하지 않을 때 decision device의 입력에서 수신된 신호 대 잡음 비의 비율로 나타낸다.

$$DF = 10 \log \frac{(S/N)_{without\{\phi\}}}{(S/N)_{with\{\phi\}}}. \quad (15)$$

잡음성 국부 발진기의 위상 잡음을 고려한 신호 대 잡음 비는 다음과 같다.

$$(S/N)_{with\{\phi\}} = \frac{P_s}{P_p + P_n}. \quad (16)$$

여기서 P_s 는 유용한 신호의 평균 전력, P_n 는 AWGN의 전력, 그리고 P_p 는 위상 잡음에 의한 방해 신호 전력으로 전력 P_{CPE} 와 인접 부반송파간 간섭 전력 P_{ICI} 로 나눈다. 각 전력을 구하기 위해 k 번째 결정변

수를 다음과 같이 표현한다.

$$Y_k = X_k \cdot P_0 + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X_l \cdot P_{l-k} + N_k. \quad (17)$$

첫째로 P_{CPE} 을 계산한다. 이것은 P_0 의 전력이므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{CPE} &= \text{var}[P_0] = \text{var}\left[\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j\phi[m]}\right] \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \text{var}[e^{j2\phi_{TX}[m]}] \\ &= \frac{1}{N} \cdot (1 - e^{-4\sigma_\phi^2}). \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)의 결과를 얻기 위하여 다음의 과정을 이용한다. 송신기 국부 발진기 위상 잡음이 서로 동일한 특성을 가지고 위상 잡음 프로세스인 ϕ_{TX} 또는 ϕ_{RX} 는 평균이 0이고 분산이 σ_ϕ^2 인 Gaussian 랜덤 프로세스라고 가정한다^[18]. 따라서 $e^{j\phi}$ 의 분산은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\text{var}[e^{j\phi_{TX}}] = E[|e^{j2\phi_{TX}}|^2] - E^2[e^{j2\phi_{TX}}]. \quad (19)$$

여기서 $E[|e^{j2\phi_{TX}}|^2] = E[\cos^2 2\phi_{TX} + \sin^2 2\phi_{TX}] = 1$, 그리고

$$\begin{aligned} E[e^{j2\phi_{TX}}] &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j2\phi_{TX}) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\phi}} \exp\left(-\frac{\phi_{TX}^2}{2\sigma_\phi^2}\right) d\phi_{TX} \\ &= e^{-2\sigma_\phi^2}. \end{aligned} \quad (20)$$

따라서 $e^{j\phi}$ 의 분산은 $(1 - e^{-4\sigma_\phi^2})$ 와 같다.

$$\begin{aligned} P_{ICI} &= \text{var}\left[\sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} X_l \cdot P_{l-k}\right] = P_s \cdot \{\text{var}\left[\sum_{l=0}^{N-1} P_l\right] - \text{var}[P_0]\} \\ &= P_s \cdot \frac{N-1}{N} \cdot (1 - e^{-4\sigma_\phi^2}). \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)에서 $\sum_{l=0}^{N-1} P_l$ 의 분산은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{var}\left[\sum_{l=0}^{N-1} P_l\right] = \frac{1}{N^2} \text{var}\left[\sum_{l=0}^{N-1} \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} e^{j\phi[m]} e^{j\frac{2\pi}{N}lm} \right\}\right] = (1 - e^{-4\sigma_\phi^2}). \quad (22)$$

여기서 $\sum_{l=0}^{N-1} (e^{j\frac{2\pi}{N}l})^m = \begin{cases} N^2, & l=0 \\ \frac{\sin(\pi l)}{\sin(\pi l/N)} \cdot e^{j\pi(\frac{N-1}{N})l}, & \text{otherwise} \end{cases}$ 이

고, 전력은 다음과 같다.

$$\left| \sum_{l=0}^{N-1} (e^{j\frac{2\pi}{N}l})^m \right|^2 = \begin{cases} N^2, l=0 \\ \frac{\sin(\pi l)}{\sin(\pi l/N)} \end{cases}$$

그러므로 국부 발진기의 위상 잡음을 고려한 신호 대 잡음비는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{N}\right)_{with(\phi)} &= \frac{P_s}{(P_{CPE} + P_{ICI}) + P_n} \\ &= \frac{P_s}{\frac{1}{N}(1 - e^{-4\sigma_\phi^2}) \cdot \{1 + (N-1) \cdot P_s\} + P_n} \end{aligned} \quad (23)$$

다음으로 위상 잡음으로 인한 OFDM 시스템의 성능 저하를 평가하기 위해서 계산한 전력들을 사용하여 DF를 구한다.

$$\begin{aligned} DF &= 10 \log \frac{P_s / P_n}{P_s / \frac{1}{N}(1 - e^{-4\sigma_\phi^2}) \{1 + (N-1) \cdot P_s\} + P_n} \\ &= 10 \log \left\{ 1 + \frac{1}{N}(1 - e^{-4\sigma_\phi^2}) \cdot \left[\frac{1}{P_s} + (N-1) \right] \cdot SNR_{without(\phi)} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

식 (24)에서 σ_ϕ^2 는 Gaussian 분포를 가지는 랜덤 변수 ϕ_{TX} 또는 ϕ_{RX} 의 분산을 가리키고 그 값은 잡음성 국부 발진기 출력의 전력 스펙트럼 밀도를 적분하여 구할 수 있다.

$$\sigma_\phi^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\phi(f) df \quad (25)$$

여기서 $S_\phi(f)$ 는 전체 OFDM 대역폭(B)과 작거나 같은 대역폭으로 제한되어 있다는 것이다. 그러므로, 식 (25)에서는 적분 구간을 $-B/2 \sim B/2$ 로 제한해야 한다. 식 (26)은 식 (25)를 실질적으로 주파수 음수를 고려하여 적분하는 식으로 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\sigma_\phi^2 = \frac{1}{a \cdot \ln 10} (10^{\frac{dBc}{10}} - 10^{\frac{dBc'}{10}}) \quad (26)$$

여기서 a 는 적분 구간 내의 스펙트럼의 기울기이고, dBc, dBc' 는 가운데 신호로부터 구간이 멀어지면 신호의 크기는 얼마나 줄어드는지를 나타낸 수치이다.

IV. 성능 분석과 논의

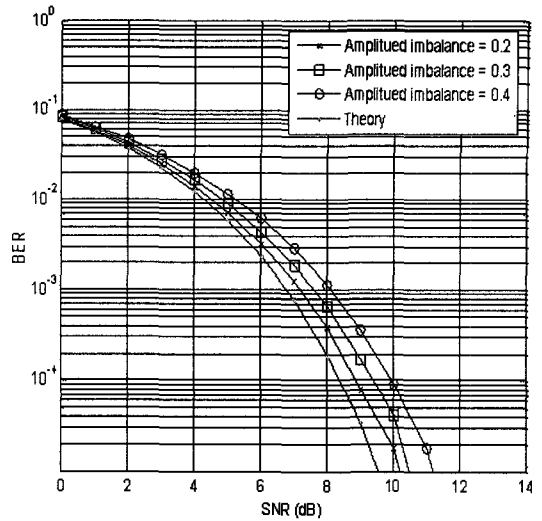


그림 3. $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=0^0, \text{var}=0$ 일 때 BER 성능
Fig. 3. BER $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=0^0, \text{var}=0$.

OFDM 시스템은 다음과 같은 매개 변수를 가진다. 부반송파의 수는 $N=64$, 변조 기법은 QPSK이다. 그림 3은 진폭 불균형만을 고려하여 BER 성능을 도시하였다. 10^{-5} 에서 진폭 불균형 $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4$ 는 각각 0.5 dB, 1.08 dB, 1.55 dB 정도 BER 감소를 일으킨다. 그림 4은 phase IQ 불균형만 첨가하여 OFDM 시스템의 BER 성능을 보인다. 10^{-5} 에서 BER은 10.15 dB, 11.16 dB, 12.3 dB로 각각 0.65 dB, 1.66 dB,

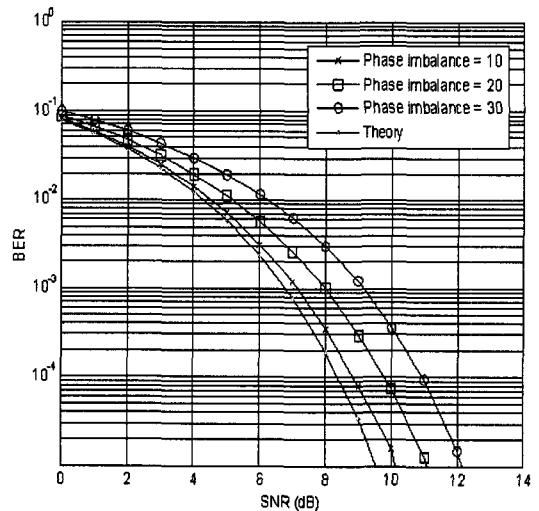


그림 4. $\epsilon=0; \phi=10, 20, 30^0, \text{var}=0$ 일 때 BER 성능
Fig. 4. BER $\epsilon=0; \phi=10, 20, 30^0, \text{var}=0$.

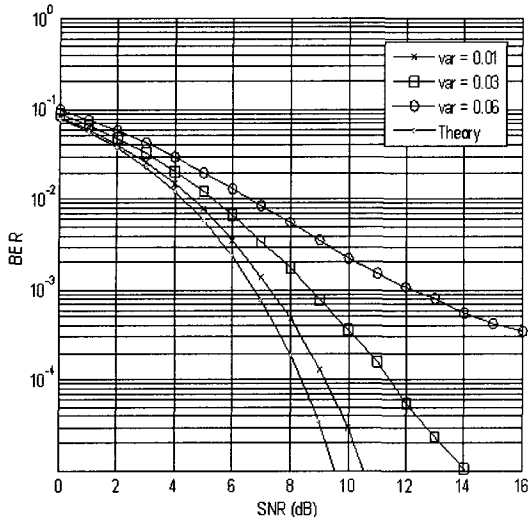


그림 5. QPSK-OFDM 시스템의 BER 성능
Fig. 5. BER performance of QPSK-OFDM system.

2.8 dB 정도 감소를 일으킨다. 그림 5는 상 잡음만을 고려하여 BER 성능을 보았다. QPSK-OFDM 통신 시스템에서 위상 잡음으로 인해 발생하는 성능 저하 수치를 위상 잡음이 없는 이상적인 경우 AWGN 환경에서의 BER 성능과 비교해 보면 10^{-5} 에서 위상 잡음의 분산 $\sigma=0.01, 0.03$ 은 약 10.5 dB, 14 dB의 성능을 보여 각각 1 dB, 4.5 dB 정도 BER을 감소시킨다. 분산 $\sigma=0.06$ 일 때는 SNR=16일 때 error-floor가 생기려고 한다. 그림 6과 7은 진폭과 위상 불균형 들

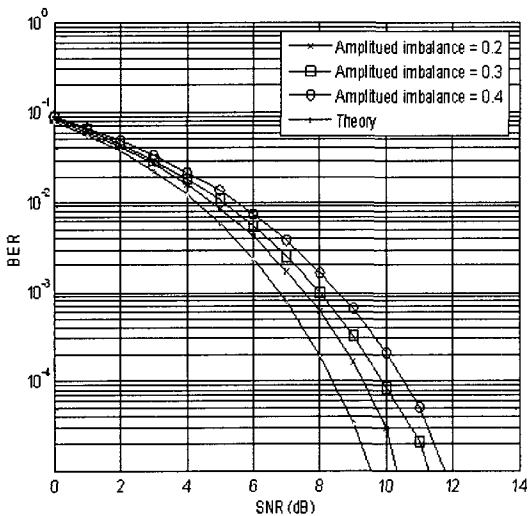


그림 6. $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=10^\circ, \text{var}=0$ 일 때 BER 성능
Fig. 6. BER $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=10^\circ, \text{var}=0$.

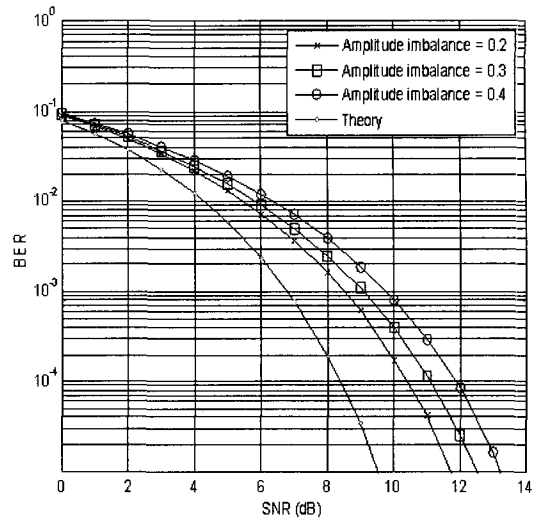


그림 7. $\epsilon=0.1; 0.3; 0.4; \phi=20^\circ, \text{var}=0$ 일 때 BER 성능
Fig. 7. BER $\epsilon=0.1; 0.3; 0.4; \phi=20^\circ, \text{var}=0$.

다 고려했을 때의 BER 성능이다. 그림 6에서 $\phi=10^\circ, \epsilon=0.2; 0.3; 0.4$ 는 10^{-5} 에서 0.88 dB, 1.61 dB, 2.29 dB 정도 BER를 감소시킨다. 그림 10에서 $\phi=20^\circ, \epsilon=0.2; 0.3; 0.4$ 는 BER를 1.8 dB, 3.02 dB, 3.62 정도 감소시킨다. 그림 11에서부터 그림 14까지는 IQ 불균형과 위상 잡음 들 다 고려했을 때의 BER 성능이다. 그림 8에서 $\phi=10^\circ, \epsilon=0.2; 0.3; 0.4, \sigma=0.008$

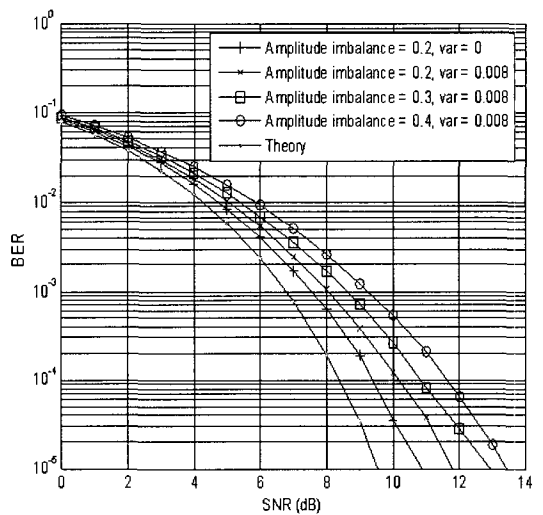


그림 8. $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=10^\circ, \text{var}=0.008$ 일 때 BER 성능
Fig. 8. BER $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=10^\circ, \text{var}=0.008$.

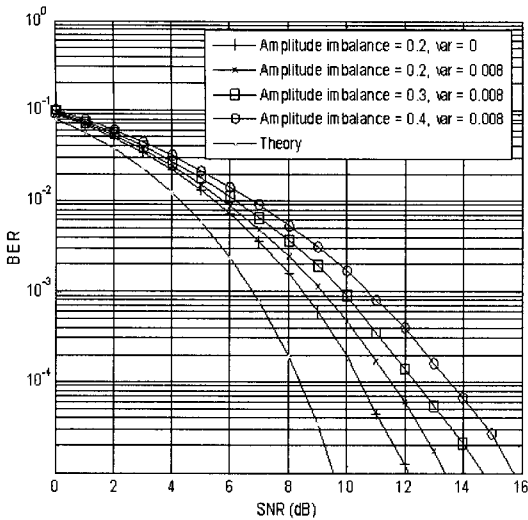


그림 9. $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=20^\circ, \text{var}=0.008$ 일 때 BER 성능

Fig. 9. BER $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4; \phi=20^\circ, \text{var}=0.008$.

은 10^{-5} 에서 2.08 dB, 3.41 dB, 3.79 dB 정도 BER를 감소시키고, $\phi=10^\circ$, $\epsilon=0.2$ 이고 위상 잡음을 고려하지 않은 것과 비교해 보면 0.9 dB, 2 dB, 2.4 dB 정도 감소시킨다. 그림 9에서 $\phi=20^\circ$, $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4$, $\sigma=0.008$ 은 BER를 3.5 dB, 5.22 dB, 6.02 dB 정도 감소시키고, $\phi=20^\circ$, $\epsilon=0.2$ 이고 위상 잡음을 고려하지 않은 것과 비교해 보면 1.2 dB, 2.3 dB, 3.4 dB 정도 BER를 감소시킨다.

따라서, 위와 같은 정보를 가지고 시스템이 요구하는 다른 성능 및 사양을 고려하여 최대 허용할 수 있는 위상 잡음의 크기를 정한 뒤 이에 알맞은 국부 발진기를 설계하면 OFDM 통신 시스템에서 위상 잡음으로 인한 성능 저하 수치를 최소화시킬 수 있게 된다.

V. 결론

RF front-end의 impairment와 국부 발진기의 불완전성은 OFDM 시스템의 성능을 감소시킨다. Up-conversion의 I와 Q branch 구성 요소 사이의 불균형과 위상 잡음이 BER 성능 감소의 원인이다. 본 연구에서는 IQ 불균형과 위상 잡음이 OFDM 통신 시스템의 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 대용량 고속 전송을 위한 OFDM 통신 시스템은 단일

반송파 시스템과 달리, 위상 잡음에 아주 민감한 특성을 지니고 있기 때문에 정확한 시스템 분석을 필요로 하게 된다. IQ 불균형과 위상 잡음을 고려하여 실제 시스템에 가깝게 분석하였다. 분석 결과, 진폭 불균형이 $\epsilon=0.2; 0.3; 0.4$ 이고, 위상 불균형이 $\phi=10^\circ$ 이고, 위상 잡음의 분산 $\sigma^2=0.012$ 일 때 BER은 10^{-5} 에서 각각 2.88 dB, 3.61 dB, 4.69 dB 감소한다.

참고 문헌

- [1] B. Le Floch, R. H. Lassalle, and D. Castelain, "Digital sound broadcasting to mobile receivers", *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 35, no. 3, pp. 493-503, Aug. 1989.
- [2] EBU/CENELEC/ETSIT JTC, "Digital broadcasting systems for television, sound and data services, framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", TM 1545 rev. 2, Jan. 1996.
- [3] J. Van de Beek et al., "On synchronization in an OFDM based UMTS proposal", in *Proc. COST 254 Emergent Techniques for Communication Terminals*, Toulouse, France, Jul. 1997.
- [4] Ana Garcia Armada, "Understanding the effects of phase noise in OFDM", *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 47, no. 2, pp. 153-159, Jun. 2001.
- [5] A. A. Abidi, "Direct-conversion radio transceivers for digital communications", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 30, Issue 12, pp. 1399-1410, Dec. 1995.
- [6] B. Razavi, "Design considerations for direct-conversion receivers", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, vol. 44, Issue 6, pp. 428-435, Jun. 1997.
- [7] B. Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [8] C. L. Liu, "Impacts of I/Q imbalance on QPSK-OFDM-QAM detection", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 44, Issue 3, pp. 984-989, Aug. 1998.
- [9] M. Buchholz, A. Schuchert, and R. Hasholzner,

- "Effects of tuner IQ imbalance on multicarrier-modulation systems", *Proc. IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, pp. T65/1-T65/6, Mar. 2000.
- [10] A. Tarighat, A. H. Sayed, "MIMO OFDM receivers for systems with IQ imbalances", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, Issue 9, pp. 3583-3596, Sep. 2005.
- [11] H. Shafiee, S. Fouladifard, "Calibration of IQ imbalance in OFDM transceivers", *IEEE International Conference on Communications ICC '03*, vol. 3, pp. 2081-2085, May 2003.
- [12] J. Tubbx et al., "Joint compensation of IQ imbalance and frequency offset in OFDM systems", *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '03*, vol. 4, pp. 2365-2369, Dec. 2003.
- [13] J. Tubbx et al., "Compensation of IQ imbalance and phase noise in OFDM systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, Issue 3, pp. 872-877, May 2005.
- [14] T. Pollet, M. van Bladel, and M. Moeneclaey, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise", *IEEE Transactions on Communication*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 191-193, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [15] M. Valkama, M. Renfors, and V. Koivunen, "Advanced methods for I/Q imbalance compensation in communication receivers", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, Issue 10, pp. 2335-2344, Oct. 2001.
- [16] Claus Muschallik, "Influence of RF oscillators on an OFDM signal", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 41, no. 3, pp. 592-603, Aug. 1995.
- [17] 이영선, 유흥균, 정영호, 함영권, "OFDM 통신시스템에서 위상 잡음분석", *한국전자과학회논문지*, 15(11), pp. 1043-1050, 2004년 11월.
- [18] H. Nikookar, R. Prasad, "On the sensitivity of multicarrier transmission over multipath channels to phase noise and frequency offset", *PIMRC' 1996, 7th IEEE International Symposium*, vol. 1, pp. 68-72, Oct. 1996.
- [19] Nguyen Thanh Hieu, Byung-Su Kang, Kwangchun Lee, and Heung-Gyoon Ryu, "Derivation and analysis of the BER closed form in the OFDM communication system with IQ imbalance", *Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 6, no. 3, pp. 182-188, Sep. 2006.

김 상 균



2007년 2월: 충북대학교 전기전자
컴퓨터공학부 (공학사)
2007년 3월~현재: 충북대학교 전
자공학과 석사과정
[주 관심분야] 이동통신공학, OF-
DM 통신 시스템

유 흥 균



1999년~현재: IEEE, IET 논문 심사
위원
2002년: 한국전자과학회 학술상 수
상
2002년 3월~2004년 2월: 충북대학
교 컴퓨터정보통신연구소 소장
1988년~현재: 충북대학교 전자공
학과 교수

[주 관심분야] 디지털 통신 공학, 이동 통신 시스템, 통신
회로 설계 및 통신 신호 처리

강 병 수



1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 3월~현재: 한국전자통신연구원 RF기술연구팀 선임연구원
[주 관심분야] 이동통신 RF 기술,

OFDM 통신 시스템

이 광 천



1986년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 2월~현재: 한국전자통신연구원 RF기술연구팀 팀장
[주 관심분야] 이동통신 RF 기술,

OFDM 통신 시스템, 안테나 기술