

# I/Q 불균형에 의하여 왜곡된 OFDM 신호의 검출방식

정회원 박경원\*, 조용수\*

## A Detection Method for An OFDM Signal Distorted by I/Q Imbalance

Kyung-won Park\*, Yong-soo Cho\* *Regular Members*

요약

본 논문에서는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 I/Q(In-phase/Quadrature) 불균형에 의한 영향을 분석하고 I/Q 불균형이 발생하는 경우에 신호를 검출하는 방식을 제안한다 또한, 제안된 검출 방법을 위한 채널 추정 방식 및 파일럿 신호를 설계하는 방식을 제안한다 OFDM 시스템에서 I/Q 불균형은 SIR(Signal to Interference Noise Ratio)을 감소시켜, 성능을 열화시키므로 강건한 검출방식이 요구된다 제안된 검출방식은 기존의 방식과 달리, I/Q 불균형에 의하여 발생하는 OFDM 신호의 특성을 이용하여 신호를 검출함으로써 SIR 손실을 줄이며 I/Q 불균형에 의한 영향을 효과적으로 억제할 수 있다

Key Words OFDM, I/Q imbalance

### ABSTRACT

In this paper, after analyzing the effect of I/Q imbalance in an OFDM system, the detection method of an OFDM signal distorted by I/Q imbalance is proposed Also, the channel estimation and the pilot symbol design scheme are proposed for using the proposed detection method Since I/Q imbalance in an OFDM system degrades the SIR and the BER(Bit Error Ratio) performance, the robust detection method is required for an OFDM system the proposed detection method can effectively suppress the interference caused by I/Q imbalance using characteristics of an OFDM signal differently from the conventional method, and results in improving the SIR of a desired OFDM signal

### I. 서론

OFDM 방식은 고속의 데이터 전송을 하고자 할 경우 다중 경로에 의해 발생하는 심각한 주파수 선택적 페이딩 채널에 쉽게 대처할 수 있는 장점이 있어, DAB(Digital Audio Broadcasting), DVB (Digital Video Broadcasting), xDSL (Digital Subscriber Line), WLAN (Wireless Local Area Network), BWA (Broad-band Wireless Access) 등 다양한 분야에 전송 방식으로 채택되었으며, 최근에는 4세대 이

동 통신의 핵심 무선 전송기술로 활발히 연구되고 있다[1]. 이러한 장점에도 불구하고 단일 반송파 시스템에 비하여 기저대역 신호로 변환하는 과정에서 발생하는 주파수 오류 및 I/Q 불균형에 민감한 단점이 있다. 특히, RF 신호에서 기저대역 신호로 직접변환(direct conversion)하거나 Low-IF (Intermediate Frequency) 변환 하는 경우에 발생하는 I/Q 불균형은 고속 데이터 전송을 위하여 고차 변조방식을 사용하는 OFDM시스템에서 간접 신호를 발생시켜 성능열화를 유발하기 때문에 이를 추정하고 보상하는 방법,

\* 중앙대학교 전자전기공학부 디지털통신 연구실(yscho@cau.ac.kr)

논문번호 030253-0613, 접수일자 2003년 6월 13일

※본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 추진되고 있는 유비쿼터스컴퓨팅네트워크원천기반기술개발사업의 지원에 의한 것임

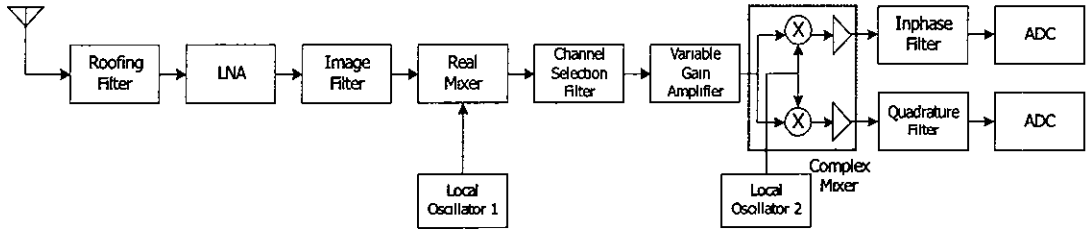


그림 1 전형적인 헤테로다인 수신기 구조

파일럿 신호를 이용하여 주파수 영역에서 적응 등화하는 방식 등의 연구가 수행되었다[2]-[5] 기존의 방식들은 간섭이 존재하는 상황에서 간섭 신호의 영향을 억제하여 해당 부채널의 검출 성능을 개선하고자 하는 방식이다 하지만 간섭의 영향은 억제할 수 있어도 I/Q 불균형에 의한 해당 부채널의 전력이 감소하기 때문에 성능 개선의 한계가 있다. 본 논문에서는 I/Q 불균형으로 인하여 발생하는 OFDM 신호의 특성을 이용한 검출 방식을 제안한다 제안된 방식은 기존의 방식과 달리, 간섭 신호를 이용하여 I/Q 불균형에 의한 전력 감소를 최소화시키는 방식이다. 또한, 제안된 검출방식을 위하여 채널 계수 및 I/Q 불균형 요소를 추정할 수 있는 파일럿 신호의 설계 방식을 제안한다. 제안된 검출방식은 적은 하드웨어 추가만으로도 I/Q 불균형에 의한 영향을 크게 억제할 수 있다

본 논문의 II장에서 OFDM 시스템에서 I/Q 불균형의 영향을 분석하고, I/Q 불균형으로 인하여 왜곡된 OFDM 신호의 검출방식을 III장에서 제안한다 III장의 검출방식을 사용하기 위한 채널 추정 방식 및 파일럿 심볼 설계 방식을 IV장에서 제안하고, V장에서 제안된 방식의 성능을 모의실험을 통하여 분석하고 VI장에서 결론을 맺는다.

## II. OFDM 시스템에서 I/Q 불균형의 영향

그림 1은 전형적인 헤테로다인 수신기 구조를 보여준다. 그림 1에서 보는 바와 같이 RF 신호에서 기저대역 신호로 한번에 변환하는 직접변환(direct conversion) 시스템과 달리, 헤테로다인(heterodyne) 수신기는 RF 신호를 실 믹서(real mixer)를 통하여 IF 신호로 변환하고 다시 IF 신호를 복소 믹서(complex mixer)를 통하여 기저대역 신호로 변환한다 이러한 헤테로다인 수신기에서는 복소 믹서기에서 I/Q 불균형이 발생한다. I/Q 필터를 거친 후, ADC

(Analogue-to-Digital Converter)에 의하여 이산화된 OFDM 수신 신호는 다음과 같이 표현된다[3]

$$y(n) = (1 + \epsilon)e^{-j\Delta\phi/2}z_I(n) + j(1 - \epsilon)e^{j\Delta\phi/2}z_Q(n) + w(n) \quad (1)$$

$$= a \cdot z(n) + b \cdot z^*(n) + w(n)$$

여기서  $z(n) = z_I(n) + jz_Q(n)$ 은 I/Q 불균형이 없는 경우에 수신된 기저대역 OFDM 신호를 의미하고  $w(n)$ 은 분산이  $\sigma_n^2$ 인 영평균 가산성 복소 백색 잡음(AWGN Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다 또한,  $\epsilon$ 은 이득 불균형(gain imbalance)을 나타내며,  $\Delta\phi$ 는 위상 불균형(phase imbalance)을 나타낸다 위첨자 "\*"은 공액 복소수를 의미한다 식 (1)에서 I/Q 불균형에 의한 왜곡항,  $a$ 와  $b$ 는 다음과 같이 주어진다

$$a = \cos(\Delta\phi/2) + \epsilon \cdot j\sin(\Delta\phi/2) \quad (2)$$

$$b = \epsilon \cdot \cos(\Delta\phi/2) - j\sin(\Delta\phi/2)$$

FFT한 후, 식 (1)의 시간영역 수신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y(k) = aX(k)H(k) + bX^*(-k)H^*(-k) + W(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

여기서  $k$ 와  $N$ 은 각각 주파수 인덱스와 전체 부채널 수를 나타내며  $-k$ 는  $N-k$ 를 의미한다. 단일 반송파 시스템에서 I/Q 불균형이 발생하면, 이득 불균형에 의한 정상도의 확장/축소(stretch/compress)와 위상 불균형에 의해 정상도의 비틀림(skew)이 발생한다 하지만 단일 반송파 시스템과 달리, 단일 OFDM 시스템에서는 식 (3)에서 보는 바와 같이  $-k$ 번째 부채널에 의한 간섭이 발생하며, 이로 인하여 높은 SNR 환경에서도 성능이 개선되지 않는 오류마루(error flow)

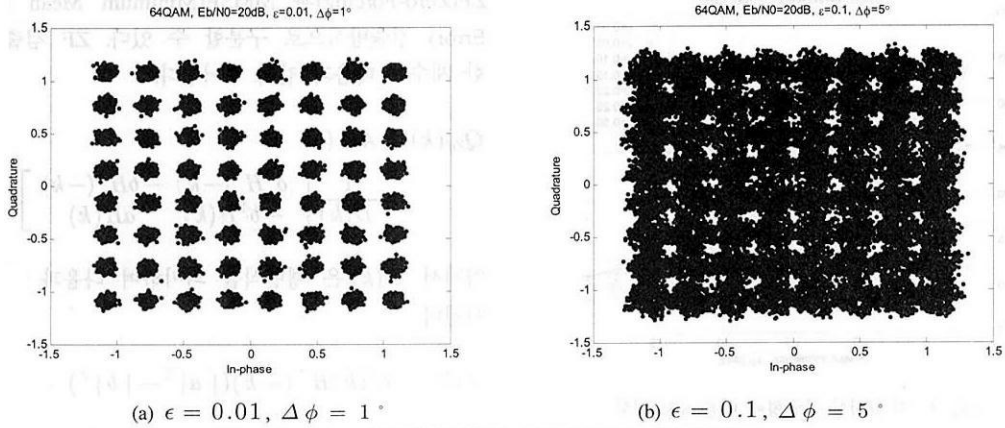


그림 2. I/Q 불균형에 의하여 왜곡된 OFDM 신호의 정상도

현상이 발생한다. 그림 2는 I/Q 불균형에 의하여 왜곡된 OFDM 신호의 정상도를 보여준다. 그림 2에서 I/Q 불균형에 의한 영향으로 정상도 심볼간의 유클리디안 거리(Euclidian distance)가 작아짐을 확인할 수 있다.

I/Q 불균형이 발생한 경우에 각 부반송파의 SINR(Signal to Interference Noise Ratio)는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho(k) = \frac{E[|aX(k)H(k)|^2]}{E[|bX^*(-k)H^*(-k) + W(k)|^2]} \quad (4)$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 기대치를 나타낸다. 평균 송신 전력이 1이라고 가정하면 평균 전력이  $\sigma_n^2$ 인 AWGN 채널의 경우에 식 (4)의 SINR은 다음과 같이 수정된다.

$$\rho = \frac{a^2}{b^2 + \sigma_n^2} \quad (5)$$

식 (5)로 부터 AWGN 채널 환경의 경우에 SINR은 불균형 요소  $a$ 와  $b$ 에 의하여 결정됨을 확인할 수 있다. 그림 3은 잡음 전력이 0인 경우에 이득/위상 불균형에 따른 SIR을 보여준다. 그림 3에서 SIR을 30dB 이상으로 증가시키기 위해서는 이득 불균형  $\epsilon$ 가 0.01 이하가 되어야 하며, 위상 불균형  $\Delta\phi$ 가 이하가 되어야 한다.

이와 같이 OFDM 시스템에서 I/Q 불균형은 SIR을 감소시키며, 이로 인하여 잡음 전력이 감소해도 성능이 개선되지 않기 때문에 I/Q 불균형에 강건한 검출

방식이 요구된다.

### III. I/Q 불균형으로 인하여 왜곡된 OFDM 신호의 검출방식

본 절에서는 I/Q 불균형에 의하여 왜곡된 수신 OFDM 신호를 검출하는 방식을 제안한다. 식 (3)에서 FFT는 입력 신호를 주기 신호로 간주하기 때문에  $k$  번째 부반송파와  $-k$  번째 부반송파는 서로 간에 간섭으로 작용한다. 이와 같은 OFDM 신호의 특성을 이용하여 I/Q 불균형 때문에 왜곡된 OFDM 수신 신호를 다음과 같이 벡터(vector) 형태로 표현할 수 있다.

$$y(k) = A(k)x(k) + w(k), \quad k = 0, 1, \dots, N/2 - 1 \quad (6)$$

여기서  $y(k) = [Y(k), Y^*(-k)]^T$ 은 수신 신호 벡터,  $x(k) = [X(k), X^*(-k)]^T$ 은 송신 신호 벡터,  $w(k) = [W(k), W^*(-k)]^T$ 은 잡음 벡터를 나타낸다. 또한,  $A(k)$ 은 채널 행렬을 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$A(k) = \begin{bmatrix} aH(k) & bH^*(-k) \\ b^*H(k) & a^*H^*(-k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (6)에서 이득 불균형과 위상 불균형이 발생하지 않으면 즉,  $a = 1$  이고  $b = 0$  이면 채널행렬  $A(k)$ 은 대각행렬(diagonal matrix)이 되기 때문에  $k$ 과  $-k$  번째 부채널 사이에 간섭이 발생하지 않지만 I/Q 불균형이 발생하면 서로 다른 원소를 갖는  $2 \times 2$  정칙행렬

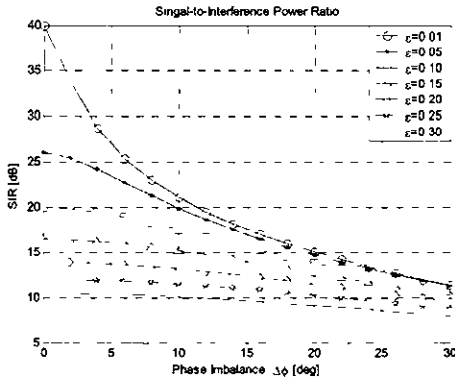


그림 3 이득위상 불균형에 따른 SIR 변화

이 되어 대칭(symmetric) 반송파가 간섭 신호로 작용한다 OFDM 시스템에서 I/Q 불균형이 발생하면 k번째 부채널 데이터와 -k번째 부채널 데이터가 서로 확산되기 때문에 주파수 선택적 채널에서 검출 방식에 따라 다이버시티 이득을 얻을 수 있다 제안된 검출방식은 OFDM 시스템에서 I/Q 불균형은 식 (6)과 같이 나타남을 이용하여 V-BLAST(Bell-Lab Layered Space-Time) 검출 알고리즘 기반의 검출방식을 제안한다 제안된 검출 방식은 I/Q 불균형을 제거하기 보다는 간섭 신호를 적극적으로 활용하여 SIR 손실을 억제하는 방식이다

### 3.1 ML 검출방식

식 (4)에서 채널행렬  $A(k)$  을 정확히 알고 있다고 가정하면, 다음과 같은 ML(Maximum Likelihood) 검출방식을 통하여 수신 신호를 검출할 수 있다

$$\hat{x}(k) = \min_{x(k)} \|y(k) - A(k)x(k)\|^2 \quad (8)$$

이와 같은 ML 검출방식은 최적의 성능을 보이나 변조차수(modulation order)가 증가함에 따라 연산량이 지수적으로 증가하기 때문에 고차 변조방식에서는 구현이 힘들다는 단점이 있다. Sphere 복조 알고리즘을 이용할 경우에 변조차수에 따라 연산량이 증가하지 않기 때문에 수신기의 복잡도를 크게 줄이면서 ML 검출에 근접한 성능을 얻을 수 있다[6]. 한편, I/Q 불균형이 없는 경우에  $A(k)$  은 대각행렬이 되므로 다이버시티 이득을 얻을 수 없다

### 3.2 선형 검출방식

선형 검출방식은 등화 계수를 구하는 방식에 따라

ZF(Zero-Forcing)과 MMSE(Minimum Mean Square Error) 검출방식으로 구분할 수 있다. ZF 검출을 위한 계수는 다음과 같이 주어진다.

$$Q_{ZF}(k) = A^{-1}(k) = \frac{1}{D(k)} \begin{bmatrix} a^*H^*(-k) & -bH^*(-k) \\ -b^*H(k) & aH(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서  $D(k)$  은 행렬식을 의미하며 다음과 같이 주어진다

$$D(k) = H(k)H^*(-k)(|a|^2 - |b|^2) \quad (10)$$

반면, MMSE 검출을 위한 계수는 다음과 같이 구할 수 있다

$$Q_{MMSE}(k) = (A^H(k)A(k) + \sigma_n^2 I)^{-1}A^H(k) \quad (11)$$

여기서 위첨자 “H”는 Hermitian 전치행렬을 나타내며,  $I$ 는  $2 \times 2$  단위행렬을 나타낸다 ZF/MMSE 계수를 이용하여 다음과 같이 수신 신호를 검출한다

$$\hat{x}(k) = Q(k)y(k) \quad (12)$$

여기서 계수 행렬,  $Q(k)$  은 ZF 검출인 경우에는  $Q_{ZF}(k)$  이고 MMSE 기반의 검출방식인 경우에는  $Q_{MMSE}(k)$  이다 I/Q 불균형이 발생하지 않는다면, 식 (12)는 ZF/MMSE 등화(equalization)방식과 동일하다

ZF 검출 후, 잡음 전력은 주파수 인덱스  $k$  에 대한 함수이며, 다음 수식과 같이 표현된다

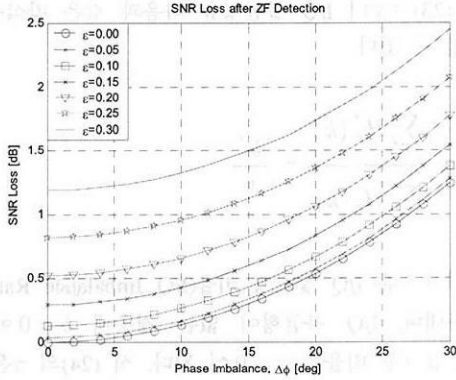
$$\sigma_{post}^2(k) = E \left[ \left| \frac{a^*W(k) - bW^*(-k)}{H(k)(|a|^2 - |b|^2)} \right|^2 \right] \quad (13)$$

만일 채널 계수,  $H(k)$  이 저속 페이딩(slow fading) 혹은 블록 페이딩(block fading)인 경우에 식(13)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

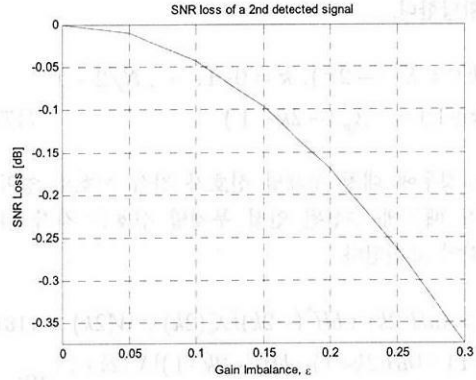
$$\sigma_{post}^2(k) = \frac{\sigma_n^2(1 + \epsilon^2)}{|H(k)|^2(|a|^2 - |b|^2)^2} \quad (14)$$

송신 신호의 평균 전력이 1이면 식 (14)에서 확인할 수 있듯이, ZF 기반의 검출방식으로 검출한 후 잡음 전력은 I/Q 불균형이 없는 경우에 비하여,  $10 \log_{10}(1 + \epsilon^2)/(|a|^2 - |b|^2)^2$  dB의 SNR 손실이





(a) ZF 검출 후 SNR 손실



(b) SIC 검출에서 두 번째 신호의 SNR 손실

그림 4. 검출 후 SNR 손실

발생한다. 그림 4(a)는 ZF 검출 후 SNR 손실을 보여 준다. 그림 4(a)에서 이득 불균형  $\epsilon$ 이 0.3이고, 위상 불균형  $\Delta\phi$ 가  $30^\circ$ 인 경우에 약 2.5dB의 전력 손실이 발생함을 확인할 수 있다.

### 3.3 SIC 검출방식

I/Q 불균형이 발생하면 두 대칭 부반송파 간에 비균일 확산이 일어나기 때문에 채널 행렬  $A(k)$ 의 각 원소가 서로 달라지며, 채널 계수  $H(k)$ 와  $H(-k)$ 에 따른 SNR차가 발생하므로 주파수 선택적 페이딩 채널에서 SNR이 높은 신호를 먼저 검출하고 검출된 신호를 제거하는 V-BLAST의 OSIC (Ordered Successive Interference Cancellation) 방식의 접근이 가능하다[7]. 만일  $k$ 번째 부채널의 SNR이  $-k$ 번째 부채널 보다 크다고 가정하면, 먼저  $k$ 번째 부채널을 ZF/MMSE 방식으로 검출한다. 특히 ZF 기반의 SIC 경우에  $k$ 번째 부채널을 ZF 방식으로 검출한 후, 잡음 전력은 식 (13)과 같이 주어진다. 검출된 번째 부채널을 수신 신호 벡터에서 제거하고  $-k$ 번째 부채널의 신호를 검출하기 위하여 두 신호 벡터를 MRC(Maximal Ratio Combining)를 수행한다. MRC 결합 후,  $-k$ 번째 부채널의 잡음 전력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{post}^2(-k) = E \left[ \frac{|H(-k)(b^*W(k) - aW^*(-k))|^2}{|H(-k)|^2(1+\epsilon^2)} \right] \quad (15)$$

채널 계수,  $H(-k)$ 이 저속 페이딩(slow fading) 혹은 블록 페이딩(block fading)인 경우에 식(15)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{post}^2(-k) = \frac{\sigma_n^2}{|H(-k)|^2(1+\epsilon^2)} \quad (16)$$

식(16)에서 잡음 전력은 위상 불균형에 관계없이, 단지 이득 불균형에 의존함을 확인할 수 있다. 오류전파(error propagation)가 없는 경우에 두 번째 검출신호는 ZF 기반의 검출방식에 비하여 잡음 감소효과를 얻을 수 있으며, 심지어 I/Q 불균형이 발생하지 않은 경우보다도 잡음이 감소한다. 그림 4(b)는 SIC 검출 방식에서 I/Q 불균형에 따른 두 번째 검출신호의 SNR 손실을 보여준다. 그림 4(b)에서 확인할 수 있듯이 두 번째 검출된 신호는 I/Q 불균형에 의한 다이버시티 이득으로 인하여 이득 불균형이 0.3인 경우에 I/Q 불균형이 없는 경우에 비하여 약 0.37dB의 SNR 이득을 얻을 수 있으며, 또한 ZF 검출방식 보다 약 3dB의 SNR 이득을 얻을 수 있다.

## IV. 채널 추정 및 파일럿 심볼 설계

III장에서 제안된 검출방식들은  $a$ ,  $b$ ,  $H(k)$ ,  $H(-k)$  등의 채널 및 I/Q 불균형 정보를 미리 알고 있어야 검출할 수 있으나 I/Q 불균형이 발생하는 경우에 주파수 영역에서 이러한 정보들을 개별적으로 추정하기 어렵다. 본 절에서는 개별적인 정보 대신에 프리엠프 혹은 파일럿 신호를 이용하여  $aH(k)$ ,  $bH^*(-k)$ ,  $aH(-k)$ ,  $bH^*(k)$  를 추정하는 방법 및 파일럿 심볼 설계방법을 제안한다.

I/Q 불균형의 영향과 채널의 주파수 응답이 결합된 정보를 추정하기 위하여 주파수 영역에서 인접 부채널과 대칭 부채널에 다음과 같은 파일럿 심볼의 데이

터를 할당한다.

$$X_p(2k) = X_p^*(-2k), k = 0, 1, \dots, N/2 - 1$$

$$X_p(2k+1) = -X_p^*(-2k-1) \quad (17)$$

이러한 경우에 대칭 부채널 신호가 간섭 신호로 영향을 주기 때문에 수신된 인접 부채널 신호는 각각 다음과 같이 표현된다

$$Y(2k) = (aH(2k) + bH^*(-2k))X_p(2k) + W(2k) \quad (18)$$

$$Y(2k+1) = (aH(2k+1) - bH^*(-2k-1))X_p(2k+1) + W(2k+1) \quad (19)$$

수신된 신호와 파일럿 정보를 이용하여 ZF 기준에서 채널추정을 수행하면 다음과 같은 채널 추정치를 얻을 수 있다

$$\hat{H}(2k) = aH(2k) + bH^*(-2k) + W(2k)/X_p(2k) \quad (20)$$

$$\hat{H}(2k+1) = aH(2k+1) - bH^*(-2k-1) + W(2k+1)/X_p(2k+1) \quad (21)$$

식 (20)와 (21)에서 추정된 채널은 두 대칭신호의 합으로 표현되므로 인접하는 두 채널이 같다면, 즉,  $\hat{H}(2k) \approx \hat{H}(2k+1)$  이면 다음과 같이 선형결합을 통하여 독립적으로 채널을 추정할 수 있다

$$H_a(2k) = \frac{\hat{H}(2k) + \hat{H}(2k+1)}{2} \quad (22)$$

$$\approx aH(2k) + \left( \frac{W(2k)}{X_p(2k)} + \frac{W(2k+1)}{X_p(2k+1)} \right)$$

$$H_b(-2k) = \frac{\hat{H}(2k) - \hat{H}(2k+1)}{2} \quad (23)$$

$$\approx bH^*(-2k) + \left( \frac{W(2k)}{X_p(2k)} - \frac{W(2k+1)}{X_p(2k+1)} \right)$$

두 인접 부채널의 주파수 응답이 같음을 가정하면, 식 (22)과 (23)으로부터 추정된 두 인접 채널,  $\hat{H}(2k)$ 와  $\hat{H}(2k+1)$ 을 이용하여  $aH(2k)$ 와  $bH^*(-2k)$ 를 추정할 수 있으며, 또한  $\hat{H}(-2k)$ 와  $\hat{H}(-2k-1)$ 를 이용하여  $aH(-2k)$ 와  $bH^*(2k)$ 를 추정할 수 있다 이러한 과정을 통하여 식 (6)의 채널 행렬을 구성할 수 있기 때문에 III절에서 제안한 검출방식들을 모두 사용할 수 있다. 또한, 식(22)과

식 (23)로부터 I/Q 불균형을 다음과 같은 방식을 추정할 수 있다

$$\gamma = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} H_b^*(k)}{\sum_{k=0}^{N-1} H_a(k)} \approx \frac{b^*}{a} \quad (24)$$

여기서  $\gamma$ 은 I/Q 불균형 비율(I/Q Imbalance Ratio)을 나타내며, I/Q 불균형이 없는 경우에  $b = 0$ 이므로 I/Q 불균형 비율은  $\gamma = 0$ 이 된다 식 (24)의  $\gamma$ 은 I/Q 불균형을 탐색하는 방법으로 사용된다.

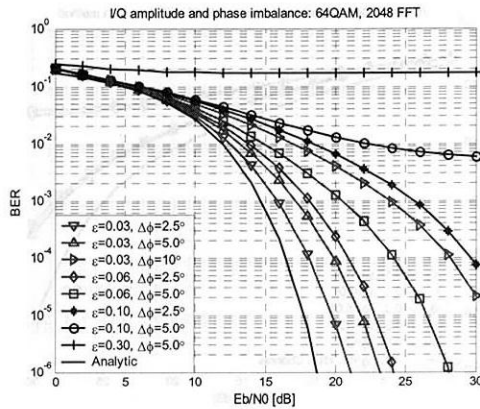
제안된 파일럿 설계 방식은 무선랜과 같이 저속의 이동성을 지원하는 응용분야에서 프리엠블에 적용될 수 있으며, 고속의 이동성을 지원하는 응용분야에서 OFDM 심볼마다 전송되는 파일럿 신호에 적용하여 채널 및 I/Q 불균형 요소를 추정하는데 이용될 수 있다.

### V. 모의실험

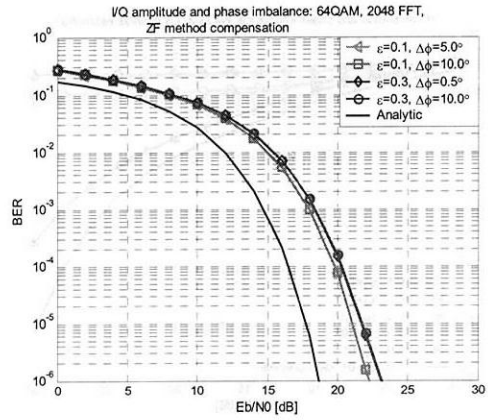
본 절에서는 제안된 검출방식을 AWGN 채널과 무선채널 환경에서 평가한다 모의실험에 사용된 FFT 크기는 2048, 반송파 주파수는 2GHz, 대역폭은 25MHz이다 그림 5는 64QAM을 사용한 경우에 AWGN 채널에서 I/Q 불균형에 따른 비트오류를 성능을 보여준다 그림 5(a)에서 이득/위상 불균형이 공존하는 하는 경우에 이득 불균형이 0.1이고 위상 불균형이  $5^\circ$  이면 오류마루가 발생한다. 반면, 그림 5.1(b)는 제안된 ZF 검출방식을 적용한 성능을 보여준다 ZF 검출방식을 적용하기 위하여 OFDM 한 심볼을 사용하여 III장에 제안된 추정방법에 따라  $a$ 와  $b$ 를 추정하였다. 그림 5(b)에서 확인할 수 있듯이 이득/위상 불균형이 큰 경우에도 성능 포화가 발생하지 않는다 모의실험에서 단지 하나의 OFDM 심볼을 이용하여 불균형 요소,  $a$ 와  $b$ 를 추정했기 때문에 이론적인 성능과 약 4dB의  $E_b/N_0$  차가 발생한다 이득 불균형이 0.1인 경우와 0.3인 경우에는 성능차가 약 1dB 정도 발생하는데 이것은 식(14)에 의한 SNR 손실에서 발생한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 제안된 ZF 검출방식은 I/Q가 발생한 환경에서 매우 강건한 성능을 보인다

그림 6은 무선 채널에서의 각 검출방식에서 I/Q 불





(a) I/Q 불균형의 영향



(b) ZF 검출

그림 5. AWGN 채널에서 I/Q 불균형에 의한 비트오류률

균형에 의한 비트오류률 성능을 보여준다. 모의실험은 첫 번째 경로와 두 번째 경로의 전력차가 3dB로 주파수 선택성이 큰 두 경로 무선 채널환경에서 수행하였으며, 채널 추정용 프리앰블을 이용한 OFDM 심볼로 구성된 채널 추정용 프리앰블을 이용하였다. 그림에서 “Ideal Channel”은 채널 계수를 정확히 알고 있는 경우를 의미하며, 다른 성능 곡선은 채널추정을 통하여 획득된 채널 계수를 사용한 비트오류률 성능 곡선이다. 그림 6(a)는 ZF 등화기를 이용한 성능을 보여준다. 기존의 ZF 등화방식은 I/Q 불균형으로 인하여 채널추정 오차와 간섭이 발생하므로 오류마루 현상이 발생한다. 반면, 그림 6(b), (c), (d)는 제안된 검출방식을 적용한 경우의 성능을 보여준다. 모의실험에서 채널추정은 III장에 제안된 방식을 사용하였다. 이득 불균형이 0.1인 경우에 오류마루가 발생하지 않으며, 0.3일 경우에도 성능이 개선된다. 또한, ZF 검출방식 보다 OSIC 방식이 약간의 성능 향상이 있으며, ML 방식은 I/Q 불균형이 없는 경우와 거의 동일한 성능을 보인다.

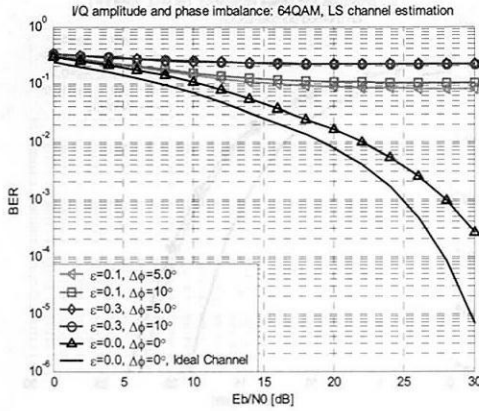
## VI. 결론

본 논문에서는 I/Q 불균형에 의하여 왜곡된 OFDM 신호를 검출하는 방식을 제안하고 모의실험을 통하여 성능을 검증하였다. 제안된 검출방식은 I/Q 불균형에 의하여 발생하는 간섭 신호를 이용하여 전력 감소를 최소화하여 고차 변조방식에서도 강건한 검출과정을 수행할 수 있다. 또한 채널 계수 및 I/Q 불균형 요소를 추정하기 위한 파일럿 신호의 설계를 제안하였다.

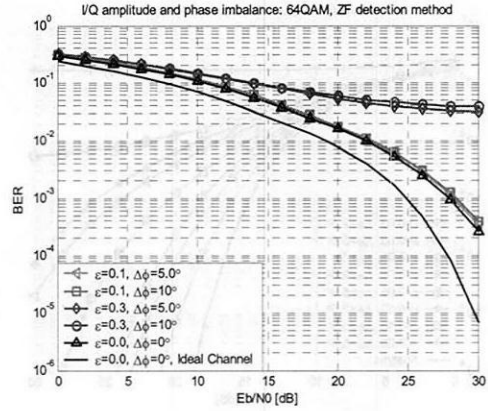
제안된 검출방식은 적은 하드웨어 추가만으로도 I/Q 불균형에 의한 영향을 효과적으로 억제할 수 있으며, 프리앰블이나 파일럿 신호 기반의 OFDM 시스템에 간단하게 적용할 수 있는 장점이 있다.

## 참고 문헌

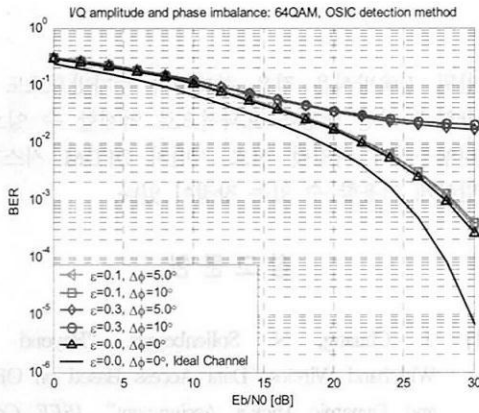
- [1] J. Chuang, N. Sollenberger, “Beyond 3G: Wideband Wireless Data Access Based on OFDM and Dynamic Packet Assignment”, *IEEE Comm. Mag.*, Vol. 38, No 7, July 2000
- [2] M. Buchholz, A. Schuchert, R. Hasholzner, “Effects of Tunner IQ Imbalances on Multicarrier Modulation,” *Proc. IEEE ICCDCS 2000*, Cancun, March 15-17, 2000
- [3] Liu, C.-L., “Impacts of IQ Imbalance on QPSK-OFDM-QAM Detection,” *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 42, No. 3, pp. 729-738, Aug. 1996
- [4] A. Baier, “Quadrature Mixer Imbalance in Digital TDMA Mobile Radio Receivers,” *Proc. Int'l Zurich Seminar on Digital Communications*, Zurich, Switzerland, pp. 147-162, 1990
- [5] A. Schuchert, R. Makowitz, and M. Buchhlz, “Front End Architectures for Multistandard Digital TV Receivers,” *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 46, No. 3, pp. 422-427, Aug. 2000
- [6] M. O. Damen, A. Chkeif, and J.-C. Belfiore,



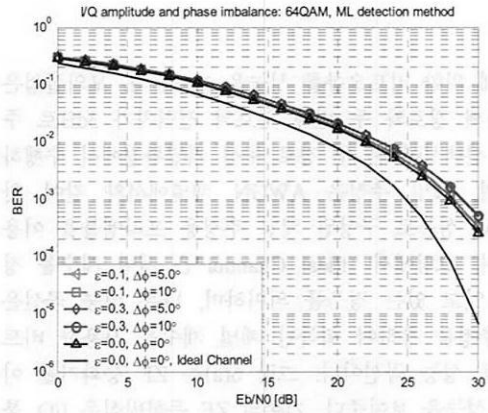
(a) ZF 등화



(b) ZF 검출방식



(c) OSIC 검출방식



(d) ML 검출방식

그림 6. 두 경로 채널에서 I/Q 불균형에 의한 비트오류률

"Lattice codes decoder for space-time block codes," *IEEE commun. Lett.*, vol. 4, pp. 161-163, May 2000

[7] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, R. A. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," invited paper, *Proc. ISSSE-98*, Pisa, Italy, Sept. 29, 1998

박 경 원(Kyung-won Park)

정회원



1999년 2월 : 중앙대학교 전기공학  
과 졸업

2001년 2월 : 중앙대학교 전기공학  
과 석사

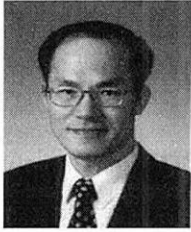
2003년 8월 : 중앙대학교 전기전자  
공학부 박사과정 수료

<관심분야> 디지털 통신, OFDM 셀룰러/LAN 모뎀



조 응 수(Yong-soo Cho)

정회원



1984년 2월 : 중앙대학교 전자공  
학과 졸업

1989년 2월 : 연세대학교 전자공  
학과 석사

1991년 : The University of  
Texas at Austin 공학박사

1984년: 금성전자(주) 연구원

2001년: 한국전자통신연구원 초빙연구원

1992년 ~ 현재: 중앙대학교 전자전기공학부 교수

<관심분야> 디지털 통신, OFDM 셀룰러/LAN 모델,  
OFDM 모델의 FPGA 설계