

# 다중 반송파 통신 시스템에서 효과적인 CFO와 STO 추정 및 보상 방법

준회원 이 희 규\*, 정회원 유 흥 균\*\*

## Efficient Estimation and Compensation of CFO and STO in Multi-carrier Communication System

Hui-Kyu Lee\* Associate Member, Heung-Gyoon Ryu\*\* Regular Member

### 요 약

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 환경에서 sample timing offset(STO)과 carrier frequency offset(CFO)은 inter-symbol interference (ISI), inter-carrier interference (ICI) and phase error를 발생 시키는 원인으로 작용하고 있다. OFDM 의 특성상 STO와 CFO에 민감하고, 특히 ICI 가 발생될 경우 보상이 어렵다. 또한 보상을 위해 많은 복잡도를 가진 equalizer가 요구된다. 이 논문에서는 블록 파일럿과 동기화 신호를 가지고, feedback방법을 이용해 STO와 CFO의 효과적인 추정 방법을 제시한다. 주파수 축에서 동기화 신호와 pilot을 이용해 추정된 값들을 시간 축으로 피드백 시킨 후, 시간 영역에서 sample & holder의 시간 타이밍과 oscillator의 주파수의 교정을 통해 정정한다. 시뮬레이션 결과 보상이 없이 피드백 구조만으로 STO와 CFO를 보상하여 성능을 개선 시켰다.

**Key Words** : STO, CFO, ICI, ISI, OFDM

### ABSTRACT

Sample timing offset (STO) and carrier frequency offset (CFO) are caused by inter-symbol interference (ISI), inter-carrier interference (ICI) and phase error in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system. OFDM characteristic is sensitive about STO and CFO. So when ICI occurs, compensation is hard and complex equalizer is needed. In this paper, we propose an effective correction method using feedback process with pilot and synchronization symbol. After feedback with estimated value in frequency domain, STO and CFO are corrected by control sample & and holder and oscillator. As a result of simulation, we confirm that STO and CFO can be corrected without equalizer through feedback.

### 1. 서 론

직교 주파수 분할 다중화 시스템은 다중의 직교 부 반송파를 사용하여 병렬로 전송하는 방식이다. 임펄스 잡음과 다중결로 페이딩에 강하며 주파수 대역을 효율적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그래서 무선 랜

및 디지털 비디오 방송 디지털 오디오 방송 시스템의 무선 통신 표준에 널리 쓰이고 있는 방식이다. 하지만 OFDM 시스템에서 도플러나 송·수신기의 불일치와 DAC, ADC의 불일치는 CFO와<sup>[1,2]</sup>, STO<sup>[3]</sup>를 발생시킨다. 이동통신 시스템에서 기지국은 이동하지 않지만, 수신기는 정지 상태에 있지 않기 때문에, 도플러 주파수

\* 충북대학교 전자공학과 및 컴퓨터정보통신연구소

\*\* 충북대학교 전자정보대학 전자공학과 (ecoma@cbu.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-10-504, 접수일자 : 2010년 10월 21일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 11일

가 발생할 수 있다. 또한 송수신기의 발진기가 이상적으로 같이 없기 때문에 CFO를 발생시킨다. 이렇듯 CFO는 도플러 주파수의 영향이나 송·수신기 발진기의 주파수 불일치로 발생한다. OFDM 시스템에서 CFO는 ICI<sup>[6]</sup>를 일으키고, 이로 인해 부 반송파의 직교성이 파괴되면서 큰 성능저하를 일으킨다. 이런 CFO의 영향을 주파수 축에서 파일럿을 통해 추정하고 보상하는 방법들이 많이 연구가 되어 왔다. 분산 형태의 파일럿을 이용한 방법<sup>[6]</sup>이나 연속 형태의 파일럿을 이용한 방법 등이 연구 되어왔다<sup>[7]</sup>.

STO는 송신기 측의 DAC와 수신기 측의 ADC가 이상적으로 같게 작동할 수 없으므로 오차가 발생하게 된다. 송·수신 신호의 동기를 찾는 방법은 프리엠블<sup>[5]</sup>을 이용해 연구가 진행 되어 왔으며, 최소 오차 또는 ML 방식을 통해 찾는 방법이다. 또한 CP를 이용해 동기화를 추정하는 방식도 연구되어 왔다. 하지만 낮은 SNR에서는 추정이 어렵고, 지연이 길어지면 추정이 이루어 지지 않는 단점이 있다. OFDM 시스템에서 STO의 지연이 길어지면 현재 심볼이 다음 심볼에 영향을 주는 ISI가 발생한다. ISI는 성능을 크게 열화 시키지만, 지연길이보다 긴 CP를 삽입해 보상할 수 있다. 하지만 위상 회전의 영향으로 동기가 맞지 않는다면 성능저하의 영향은 남아있게 된다. 이런 위상회전은 주파수 축에서 탭 등화기를 통해 보상이 가능하다. 그리고 이런 두 영향들이 동시에 발생하는 상황에 대해서도 연구가 진행되어 왔다<sup>[8-11]</sup>.

기존의 방법들은 pilot을 통해 추정을 하고 보상을 하는 방식들로 성능을 개선하고 있다. 그러므로 많은 연산과정을 필요로 하고, 더 좋은 성능을 내기 위해서 복잡도가 증가할 것이다.

본 논문에서는, CFO와 STO의 복합 된 영향이 OFDM 시스템에서 어떤 영향을 미치는가를 분석한다. 특히 샘플 타이밍은 연속신호가 이산신호로 샘플링 되면서, 샘플 단위의 불일치뿐만 아니라 샘플 단위 작은 지연이 발생 했을 때를 영향을 분석한다. 그리고 발생된 문제를 파일럿을 이용해 추정하고, 피드백을 통해 시간 축에서 상쇄하는 방법을 제안한다. CFO의 경우는 소수 분주 방식의 주파수 합성기의 주파수를 조절하고, STO의 경우는 샘플 앤 홀더의 샘플링의 타이밍을 조절해 성능을 확인하고 평가한다.

## II. OFDM 시스템 모델

OFDM 에서 N개의 부 반송파를 가지는 신호는, IFFT 과정을 통해 N번의 샘플 횟수를 가진 심볼로 전

송된다고 가정한다.

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} D \cdot e^{j2\pi n/N} \quad (1)$$

시스템 구성도는 그림 1과 같으며, 피드백 구조를 가진 시스템 모델이다. 이 시스템에서는 도플러와 송·수신단간에 오실레이터의 불일치로 인해 발생하는 CFO와 송·수신단의 DAC와 ADC 사이에서 발생할 수 있는 STO에 대해서 고려한다. 위에서 언급한 바와 같이, CFO의 경우는 송·수신단의 오실레이터의 불일치로 발생함으로 수신단의 오실레이터에서 발생하는 현상이다. 그리고 STO의 경우도 송·수신단의 DAC와 ADC의 차이로 발생하기 때문에, 수신단에서 조절로 그 영향을 경감시킬 수 있다. 이와 같이 피드백 구조는 주파수 축에서 수신된 파일럿을 이용해 이 영향을 분석하고, 시간 축으로 피드백 시켜 에러를 정정하는 방식을 제안한다.

## III. 오프셋 분석

### 3.1 반송파 주파수 오프셋

송신기에서 TX front-end를 통해 출력된 신호는 연속신호이다. OFDM에서 수신된 신호가 FFT를 통과해 오류 없이 수신하기 위해서는 연속신호의 정확한 샘플링이 이루어 져야 한다. 하지만 신 발진기는 이상적으로 같을 수 없으며, 또한 수신기의 모빌리티로 인해 발생하는 Doppler 현상에 의해 수신신호가 송신 신호와 똑같이 복조 되기는 어렵다. 특히, 이런 영향들은 위상 회전과 ICI로 나타나는데, OFDM의 직교성을 무너뜨리는 원인이 되며 성능 저하로 나타난다.

데이터 신호 x(t)는 CFO로 인해 다음과 같은 영향이 시간 축에서 나타난다.

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} H_k \cdot X_k \cdot e^{j2\pi \frac{k+\epsilon}{N}} + z_n \quad (2)$$

CFO는 시간축에서 그 영향이 위상 회전으로 나타나는데, 이 영향으로 인해 수신단에서 위상 회전과 ICI가 발생하게 된다.

$$Y_p = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} H_{k,m} \cdot X_{k,m} \cdot e^{j2\pi \frac{k+\epsilon}{N}} \cdot e^{-j2\pi \frac{m}{N}} + Z_p \\ = H_p \cdot X_p \cdot e^{j2\pi \epsilon p} \\ + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} H_{k,m} \cdot X_{k,m} \cdot e^{j2\pi \frac{k-m}{N}} \cdot e^{j2\pi \frac{\epsilon}{N}} + Z_p \quad (3)$$

송·수신단 사이의 이산신호가 CFO로 왜곡이 되면 식(3)과 같이, 첫 번째 단의 위상회전과 두 번째 단의 ICI로 발생하게 된다. 그리고  $Z_p$ 은 샘플링 된 AWGN이다. 식 (3)에서 위상회전은 보상되지 않을 경우에는 성능 향상에 ICI보다 더 큰 문제가 되지만, 블록 파일럿을 통해 보상이 가능하다.

위에서  $\varepsilon$ 는 정규화된 CFO로, 도플러 주파수를 반송파 간격으로 나눈 값이다. 도플러 주파수는 다음과 같이 최대 효과를 낼 수 있는 방향, 즉 수신기의 이동이 전파 방향과 같이 이동하는 경우를 고려하여 계산하였다.

$$\varepsilon = \frac{f_d}{\text{carrier spacing}}, f_d = \frac{v \cdot f_c}{c} \quad (4)$$

### 3.2 샘플 타이밍 오프셋

STO는 2가지의 경우를 고려할 수 있다. 첫 번째는 STO가 정수 단위로 발생했을 경우이고, 즉, 샘플 단위로 지연이 발생하는 경우이다. 두 번째는 소수 단위로 발생했을 경우, 즉, 지연 정도가 한 샘플이 길이보다 작은 경우이다. 이 논문에서는 두 가지의 경우를 모두 고려하고 각각의 현상을 분석하고 보상하였다.

첫 번째, 정수 단위로 발생하는 STO의 경우이다. OFDM 시스템에서 IFFT 전단의 N개의 부 반송파를 가진 신호는, IFFT 후단에서 N 샘플을 가지는 하나의 심벌로 신호를 전송하게 된다. N개의 샘플을 가지는 신호가 지연되어 수신되면 다음 심벌에 영향을 주어 ISI가 발생하여 성능을 열화 시킨다. ISI는 cyclic prefix(CP)를 사용해 직교성을 유지할 수 있지만, 지연된 신호로 인해 주파수 도메인에서 위상회전으로 영향이 나타난다. 정수 단위의 지연으로 생긴 위상변화는 그 회전폭이 커 데이터 수신을 어렵게 만든다. 식(5)는 신호지연으로 생기는 위상회전과 ISI를 나타낸다.

$$\begin{aligned} y_n &= h_n \otimes x_{n+\delta} + z_n \\ Y_p &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} H_{k,m} \cdot X_{k,m} \cdot e^{j2\pi \frac{k-m}{N}} \cdot e^{j2\pi \frac{\delta_m}{N}} + Z_p \\ &= H_p \cdot X_p \cdot \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{\delta_m}{N}} \\ &\quad + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} H_{k,m} \cdot X_{k,m} \cdot e^{j2\pi \frac{k-m}{N}} \cdot e^{j2\pi \frac{\delta_m}{N}} + Z_p \end{aligned} \quad (5)$$

정수 단위의 STO로 발생하는 위상변화는 OFDM의 직교성으로 인해 각 부 반송파당 다른 위상 변화로 나타나며, 전체가 상성도가 원을 그리며 회전하는 모습으로 나타난다. 하지만 정수 단위의 STO의 경우, 부 반송

파 인덱스에서 처음과 마지막의 부 반송파가 Nyquist sampling이론에 따라 최소로 샘플링 된 신호이기 때문에, 한 샘플 지연이 180도의 위상회전을 가진다. 그러므로 정수 단위의 STO가 증가함에 따라 큰 위상변화를 가지며, 이런 이유로 혼련 심벌의 최소 오차를 구해 추정한다.

두 번째, 소수 단위로 발생하는 STO의 경우이다. 시간영역에서 N개의 샘플을 가지는 OFDM 신호의 경우, ADC를 통해 연속 신호가 N개의 이산신호로 샘플링 된다. 이때, 하나의 샘플 간격보다 작은 지연신호가 발생할 수 있다. 이런 지연은 정수 단위의 샘플 타이밍 오프셋보다는 영향이 크지 않지만 성능을 저하시킨다. 또한, N개의 샘플로 샘플링 된 후의 신호라서 혼련 심벌을 통해 보상하기가 어렵다. 소수 단위로 발생하는 STO의 경우도 정수형 단위로 발생하는 STO와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_p &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} H_{k,m} \cdot X_{k,m} \cdot e^{j2\pi \frac{k-m}{N}} \cdot e^{j2\pi \frac{\Delta \delta_m}{N}} + Z_p \\ &= H_p \cdot X_p \cdot \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{\Delta \delta_m}{N}} \\ &\quad + \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} H_{k,m} \cdot X_{k,m} \cdot e^{j2\pi \frac{k-m}{N}} \cdot e^{j2\pi \frac{\Delta \delta_m}{N}} + Z_p \end{aligned} \quad (6)$$

OFDM의 특성상 첫 번째 반송파 주파수는 두 번째 반송파 주파수와 2배의 주기 차이를 가지며, 세 번째 반송파와는 3배의 주기 차를 가진다. 이러한 특성 때문에 각각의 부 반송파는 다른 크기의 위상회전을 가진다.

소수 단위 STO의 경우도 정수 단위의 STO의 경우와 같이 위상 변화를 가진다. 하지만 그 크기가 작아서 치명적인 성능 열화를 발생하지 않지만, 일정 이상의 소수 단위 STO이 발생하면 성능복원 어려워진다. 그 이유는 중심으로부터 멀어진 부 반송파들은 샘플링 타임이 점점 최저 샘플링 속도를 가지기 때문이다. Nyquist 샘플링 이론과 같이 복원 가능한 최저 샘플링을 가진 신호는 지연으로 인해 위상변화가 생길 경우 진폭의 변화를 가져올 수 있고, 90도의 지연으로 인해 수신이 되지 않을 수도 있다. 이런 경우는 주파수축의 보상기로 보상하기가 어려워진다.

### 3.3 복합 환경

CFO와 STO가 같이 발생하는 경우는 위상회전과 ICI의 영향이 더욱 크게 늘어날 것이다.

$$Y_p = H_p \cdot X_p \cdot \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(\delta_m + \Delta \delta_m) - \epsilon N p}{N}} + \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} H_{k,m} \cdot X_{k,m} \cdot e^{j2\pi \frac{k-m}{N}} \cdot e^{j2\pi \frac{(\delta_m + \Delta \delta_m) - \epsilon N p}{N}} + Z_p \quad (7)$$

2개의 영향이 동시에 나타났을 때는 CFO와 STO의 영향이 가중되고 수신 성능을 저하시킨다.

그림 1은 ICI를 고려하지 않고 위상 변화만을 생각할 경우 상성도의 변화를 간략하게 보여준 것이다. CFO의 영향으로 신호의 위치가 회전을 하고, STO의 영향으로 각 부 반송파들이 그 위치에 따라 다르게 회전한다. 다음을 통해 두 영향의 복합 환경에 대한 보상을 고려할 수 있다. 우선 CFO의 위상회전 경우 전체 상성도의 이동을 의미한다. 즉, 심볼 전체가 같은 방향으로 오프셋을 가진다. 반면 STO의 위상회전의 경우는 각각의 부 반송파들에 대한 다른 위상회전을 가지게 되는데, 다시 말해, 각각 다른 주파수를 가진 부 반송파마다 다른 오프셋의 영향을 가진 것을 의미한다.

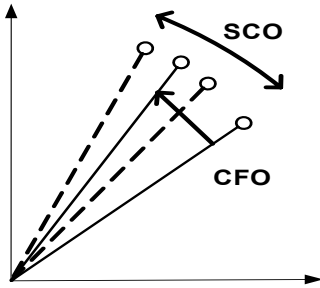


그림 1. 환경에서의 CFO와 STO의 영향. Fig. 1. The effects of CFO and STO in a joint environment.

#### IV. 반송파 주파수 오프셋과 샘플 타이밍 오프셋 추정

##### 4.1 반송파 주파수 오프셋 추정

CFO 추정은 블록 파일럿을 이용해 위상 회전을 추정할 수 있다. 식(8)은 CFO가 가지는 위상변화를 나타낸다.

$$Y_p = H_p \cdot X_p \cdot e^{j2\pi \epsilon p} + Z_p \quad (8)$$

채널을 AWGN으로 가정하고 다음과 같이 훈련 심볼을 통해 추정할 수 있다. 우선, 수신된 신호에서 위

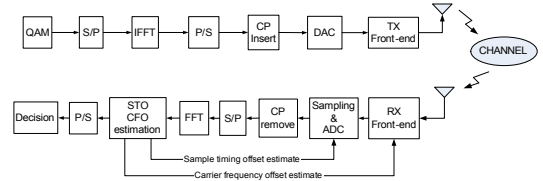


그림 2. OFDM 시스템 모델. Fig. 2. OFDM system model.

상회전만을 파악할 수 있다. 그림 1에서와 같이 CFO의 위상회전은 한 심볼이 같은 방향으로 발생하며, ICI로 인해 약간씩 회전 방향 회전 폭은 다르지만, 전체적인 회전 방향은 같다. 이 특성으로 블록 파일럿의 위상 회전을 통해 추정이 가능하다.

$$P_{received} = P_{transmitted} \cdot e^{j2\pi \epsilon} \quad (9)$$

위상회전의 값은 블록 파일럿을 사용하며,

$$\hat{\epsilon} = \ln \frac{P_{received}}{P_{transmitted}} / (j2\pi) \quad (10)$$

식 (10)으로 다시 표현될 수 있다.

그림 3은 Fractional PLL의 순서도를 보여주고 있다. 식(10)에 의해서 추정된 정규화된 CFO의 값은 Fractional PLL의 분수 분주의 조절을 통해 주파수를 움직일 수 있으며, 수신 단에서 주파수가 시프트된 만큼의 주파수 조절을 통해 CFO의 영향을 최소화 할 수 있다.

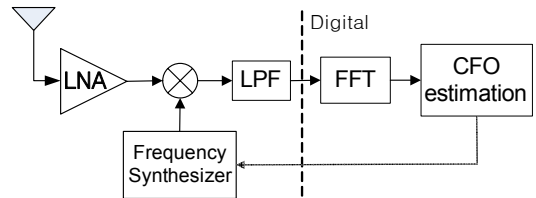


그림 3. Fractional PLL을 이용한 CFO 정정. Fig. 3. Correction of CFO using fractional PLL

##### 4.2 샘플 타이밍 오프셋 추정

STO 또한 위상 회전과 ISI의 영향으로 나타난다. 그리고 훈련 심볼을 통해 추정할 수 있다.

$$Y_p = H_p \cdot X_p \cdot \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(\delta_m + \Delta \delta_m)}{N}} \quad (11)$$

식(11)에서 위상회전의 영향으로 정수 단위와 소수 단위의 영향이 더해져서 나타나는 것을 가정할 수 있다. STO에서 나타나는 위상회전의 경우는 OFDM의 직교성에 따라 반송파 마다 다른 위상회전 크기를 갖게 된다. 첫 번째 반송파는 두 번째 반송파보다 2배 빠른 주기를 가지기 때문에, 부 반송파마다 다른 위상회전을 갖게 된다. 정수 단위의 STO의 경우 1 샘플 당 최대 회전할 수 있는 반송파가 180도의 위상회전을 가지기 때문에 위상회전만으로 추정이 어렵다. 그래서 동기화 신호를 통해 동기를 맞춘다.

동기 신호는 다음과 같은 방법으로 찾는다.

$$\hat{\delta} = \arg \min \left( \sum_{i=0}^{N_C-1+\delta} |Sync_{received}[n+i] - Sync_{\pi_{tot}}^*[i]|^2 \right) \quad (12)$$

다음 식(12) 같이 동기화 심볼을 통해 최소 오차를 찾는다. PN sequence를 통해 발생된 동기화 심볼을 식(12)과 같이 연산을 통해 최소값을 찾게 된다. 시간 축에서 지연된 값을 찾아 보상하게 된다.

$$Y_p = H_p \cdot X_p \cdot \sum_{m=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{\Delta \delta_m}{N}} \quad (13)$$

정수 단위의 STO가 보상된 후, 소수 단위의 STO는 주파수 축에서 위상의 회전 정도로 추정할 수 있다.

그림 4는 STO 정정 방법에 대한 순서도이다. 주파수 축에서 추정된 값을 시간 축에서 샘플 앤 홀더의 조절을 통해 소수 단위의 샘플을 정정할 수 있다. 그림 5는 소수단위 STO가 발생할 경우 성능저하 정도를 나타낸 그래프이다.

그림 5에서 볼 수 있듯이, 샘플 지연이 발생할 경우에 0.05정도의 값부터 성능에 영향을 미치기 시작하므로, 0.05 샘플 기준의 샘플링 오차를 구한다.

그림 3과 같이 IFFT를 통해 생성된 OFDM신호는 각각 다른 위상회전을 가진다. 0.1 샘플 지연이 발생할 경우 0.5도부터 18도 까지 위상변화를 보이며, 그림 3 같이 인덱스에 따라 값이 퍼지게 된다. 주파수 축에서 부 반송파 인덱스 중간 값을 중심으로 1 ~ 32, 33 ~

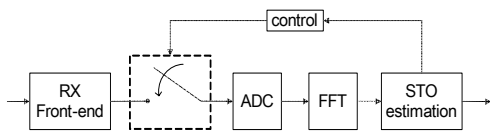


그림 4. 샘플 클럭 조절을 통한 샘플 타이밍 오프셋 정정.  
Fig. 4. Correction of STO by controlling sample timing.

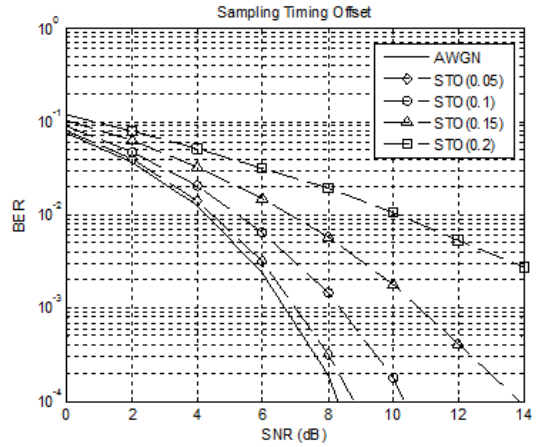


그림 5. 소수 단위 STO에 따른 성능저하.  
Fig. 5. BER performance due to fractional type STO.

64로 양쪽이 서로 반대의 위상값을 갖게 된다. 인덱스 별로 각각의 식으로 나타내면 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Y_p}{X_p} = \sum_{p=1}^{32} e^{-j2\pi \frac{\Delta \delta_p}{N}}, \quad \frac{Y_p}{X_p} = \sum_{p=33}^{64} e^{-j2\pi \frac{\Delta \delta_p}{N}} \quad (14)$$

각각의 부 반송파가 시간 축에선 위상은 반대지만, 같은 크기의 위상변화를 가지므로 그 차이는 식(15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left| \sum_{p=1}^{32} e^{-j2\pi \frac{\Delta \delta_p}{N}} \right| = \left| \sum_{p=33}^{64} e^{-j2\pi \frac{\Delta \delta_p}{N}} \right| \quad (15)$$

부 반송파는 IFFT 크기의 중간점을 기준으로 양쪽 크기가 같은 것을 이용해 식(16)방법으로 위상 회전을 추정할 수 있다.

$$\Delta \hat{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2} (P_i - P_{i+N/2})}{N/2} \quad (16)$$

(16)으로 추정오차를 구하고 피드백 시켜 샘플링 속도를 조절할 때, 그 임계 값들은 다음을 그림 5를 기준으로 설정하였다. STO의 경우 정수 단위의 위상 변화는 수신 성능에 치명적이다. 그리고 소수 단위의 STO의 경우, 그 지연 정도에 따라서 성능 저하가 달라진다. 0.05 크기의 STO에서부터 그 영향이 나타나기 때문에,

0.05 단위로 추정 정정하였다.

### V. 시뮬레이션 결과 분석

표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타내고 있다. 64개의 부 반송파를 가진 OFDM 신호를 발생시켜 전송하였고, 모듈레이션은 QPSK로 하였다. 채널 상황은 AWGN으로 가정하여 시뮬레이션 하였다.

정규화된 CFO는 표 1의 파라미터 값을 식(4) 대입하여 구할 수 있다. 신호의 반송과 주파수는 3GHz로 가정했을 때, 도플러 주파수는 333.33Hz이다. 이때 정규화된 CFO는 0.042이다. 여기서 방향은 수신기가 송신기의 방향을 향하고 있다고 가정한다. CFO는 도플러 주파수뿐만 아니라, 송·수신기의 불일치로도 발생 가능하기 때문에 CFO는 0.05을 기준으로 시뮬레이션 하였다.

우선 CFO는 위상회전과 ICI로 나타나는데, 보상을 하지 않았을 경우에 위상회전의 영향이 BER 성능을 감소시키는 주요 원인이 된다.

그림 6는 CFO가 발생할 때 성능열화의 BER 곡선이다. CFO의 크기를 증가시켜 가면서 그 영향을 확인하고, 피드백 정정방식을 이용해, 정정 후 성능을 보여주고 있다. 보상 전인 CFO가 0.05 w/o comp 인 경우 10.5dB의 성능 열화를 보이고, 0.05 w comp와 같이 보상이 된 경우, 8.5dB정도로 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 특히 오프셋이 크게 작용하는 경우에 성능 개선에서 뛰어난 결과를 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과로 fractional PLL을 사용함으로써 수신 단에서 발생할 수 있는 CFO에 대해 좋은 성능 향상이 이루어진다는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 STO에 따른 성능 분석이다. STO는 CP가 삽입된 경우, ISI가 발생하지 않아, 위상회전의 영향만이 나타난다. 하지만 위상회전으로 인해 보상 전에는

표 1. 시뮬레이션 환경.  
Table 1. Simulation Parameters.

OFDM system	
부 반송파 수	64
부 반송파 간격	7.812kHz
심플 주기	160
샘플링 주파수	500KHz
샘플 주기	2
CP 길이	16
모듈레이션	QPSK
채널	AWGN

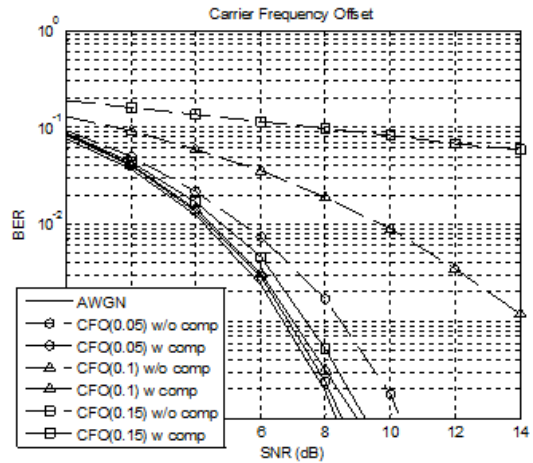


그림 6. CFO의 변화에 따른 성능저하.  
Fig. 6. BER performance according to CFO changes.

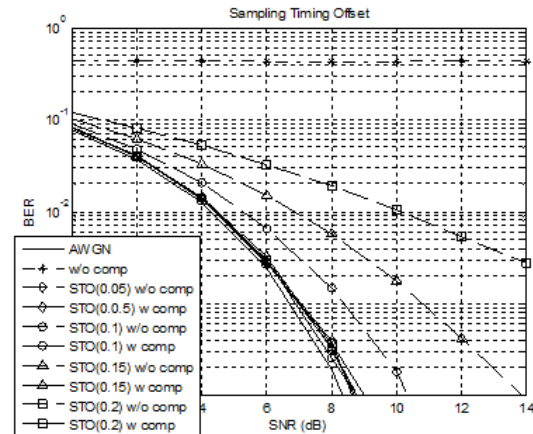


그림 7. STO 변화에 따른 보상 성능.  
Fig. 7. BER performance according to STO changes.

w/o comp와 같은 성능 저하를 볼 수 있다. STO의 경우 보상 후 성능 w comp는 AWGN곡선과 0.5dB 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 샘플링을 통해 시간 축에서 보상을 함으로써, 발생될 수 있는 문제들이 줄어 좋은 성능을 보였지만, 추정 오차로 약간의 성능 열화를 나타낸다. 추정 오차의 원인은 잡음과 CFO에서 발생한 ICI에 의한 추정 오차가 있다. 또한 STO가 증가할 때 신호 주파수의 2배로, 즉, Nyquist 이론에 따른 최저 샘플링이 이루어진 신호가 지연으로 위상이 변하게 되면 진폭이 변하게 되는데, 이 값에 의해 추정 오차가 생긴다.

그림 7을 보면, 정수 단위의 샘플 지연은 SNR이 증가하더라도 통신을 할 수 없는 상태가 된다. 그리고 소수 단위의 STO는 그림 5와 같이 보상이 되지 않았을

경우에는 비슷한 성능 경향을 보이며 보상이 된 경우에는 AWGN에 근접한 시뮬레이션 결과를 볼 수 있었다. 하지만 샘플을 조절하여 보상하는 것도 추정이 정확히 이루어지지 않으면, 성능에 좋지 않은 영향을 준다. 그림 7에서는 보상 후 BER이 조금 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 0.05 단위까지는 추정이 정확히 이루어지지 않았기 때문이다.

하지만 0.05단위의 추정 오차는 그 성능에 큰 영향을 주지 않으므로 STO 정정에는 좋은 효과를 보였다.

그림 8은 STO와 CFO가 함께 발생할 경우의 시뮬레이션이다. CFO는 도플러의 영향과 송·수신기의 불일치로 생길 수 있는 정규화된 수치로 0.05의 값으로 시뮬레이션 하였다. STO의 경우는 샘플 지연 값을 바꿔 주면서 변화에 따른 결과를 확인하였다. CFO의 영향으로 최종 보상된 값은 대략 AWGN의 경우보다 1dB상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 각각의 추정 값들이 가지는 오차로 인한 영향 때문이다. STO의 경우는 보상이 되지 않은 경우에는 수신이 불가능하며, 정수 단위의 STO가 보상된다 하더라도, 소수 단위의 STO와 CFO의 영향이 더해지면 수신 성능이 많이 나빠지는 것을 알 수 있다. 이때 STO가 보상되면 성능은 좋아진다. 하지만 STO를 0.05 단위로 보상할 때, 0.05 단위 정도에선 AWGN이나 ICI의 영향으로 정확한 추정이 나오지 않아 다른 입력의 STO에서도 서로간의 약간의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

그림 9는 feedback방식으로 시간 축에서 fractional PLL을 이용해 보상하는 방법과 주파수 축에서 위상회전을 보상하는 방법의 비교 성능이다. 주파수 축에서 CFO를 추정해 위상을 보상하는 방식은, 주파수 축에서 CFO로 발생한 위상 회전과 ICI사이에 위상회전만

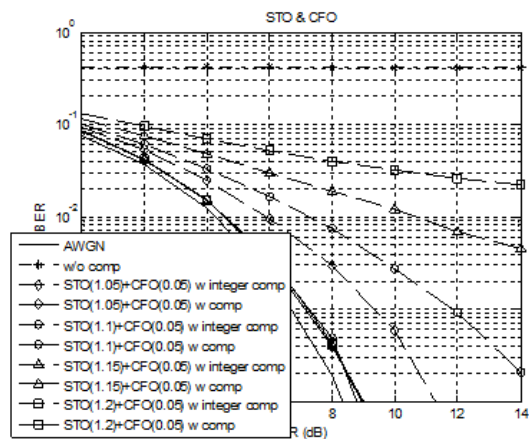


그림 8. STO와 CFO의 보상 성능.  
Fig. 8. BER performance at joint environment with STO and CFO.

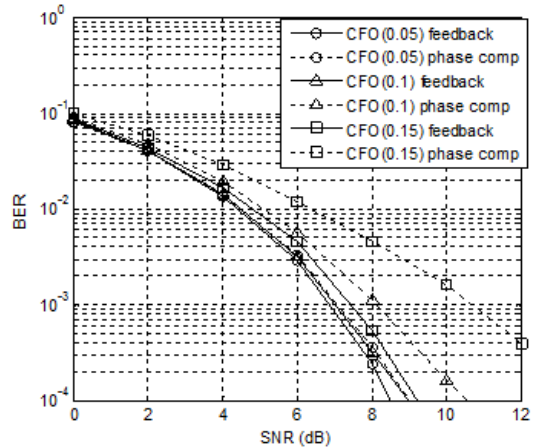


그림 9. Feedback 방식을 이용한 시간영역 보상과 Feedback을 하지 않은 주파수영역 보상의 차이  
Fig. 9. BER performance of different compensation methods between time and frequency domain.

을 보상할 수 있으며, ICI를 보상하기 위해선 별도의 등화기를 통해 보상해야 한다는 점이다. 하지만, Feedback방식의 장점은 주파수 축에서 CFO를 추정해 feedback을 하고 시간 축에서 fractional PLL을 조절해 보상함으로써, ICI발생 자체를 억제할 수 있다. 그러므로 성능이 더 향상된다. 그림 9를 보면, feedback방식은 보상 후, 9dB정도의 보상 성능을 보이지만, 주파수 영역의 보상 방식은 ICI로 인해 CFO의 크기에 따라 다른 성능을 보인다. 또한 ICI가 보상해 성능을 향상시키더라도 시간 축에서 발생 자체가 억제된 경우보다 성능이 좋아질 수는 없다.

CFO의 경우 제안된 방식과 주파수 축에서 보상하는 방식은 같은 추정과정을 거치게 된다. 그러므로 추정 과정으로 소요되는 연산량은 같다. 보상 과정에서 주파수축 보상 방식은 추정된 값을 수신 신호 Rreceiveddata에 곱하는 연산이 추가된다. 제안된 방식은 추정된 값을 feedback을 통해 아날로그 소자인 fractional PLL을 조절함으로써 디지털 영역에서 연산량을 비교하지 않는다. 추정과정에선 파일럿 블록의 평균과 송수신 파일럿을 비교를 통한 추정만 이뤄지고, 보상에선 추정된 값을 통해 각각의 부 반송파의 위상회전을 보상하게 된다. 그리고 N\_P는 한 프레임 안에서 파일럿의 수, B\_N은 파일럿을 제외한 데이터 부 반송파의 수이다.

STO의 경우 제안된 방식은 시간 축에서 정수 단위 STO를 추정 보상하고, 주파수 축에서 소수 단위 STO를 추정했다. 하지만 주파수축 보상 방법으로 주파수 축에서 동시에 정수, 소수 단위의 STO를 추정할 수 있

표 2. 연산량 비교  
Table 2. Comparison of calculation.

		CFO	STO
제안된 방법	추정	$\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^{N-P} P(i)$ $\hat{\epsilon} = \ln \frac{P_{received}}{P_{transmitted}} - j2\pi$	$\hat{\delta} = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^{N/2}   \text{Sync}_{\text{max}}[i+i] - \text{Sync}_{\text{min}}[i]  ^2 \right\}$ $\hat{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2} (P_i - P_{i+N/2})}{N/2}$
	보상		
주파수 추정 보상	추정	$\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^{N-P} P(i)$ $\hat{\epsilon} = \ln \frac{P_{received}}{P_{transmitted}} - j2\pi$	$\hat{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2} (P_i - P_{i+N/2})}{N/2}$
	보상	$\sum_{j=1}^B R_{received\ data} \cdot e^{j2\pi \hat{\epsilon}}$	$\sum_{j=1}^B R_{received\ data} \cdot e^{j2\pi \hat{\delta}}$

다. 하지만 추정오차가 많이 발생할 것이다. 그리고 또한, 보상의 경우 제안된 방식은 정수 단위의 STO는 신호 지연을 통해 보상함으로써 연산량을 측정하지 않고, 소수 단위 STO방식은 시간 축에서 샘플 타이밍을 조절함으로써 디지털 영역에서의 연산량을 비교하지 않는다. 주파수추 보상 방식은 CFO의 보상과 같이 각 부반송파에 대한 보상이 이루어진다. 결과적으로 제안된 방식은 보상을 아날로그 단에서 처리하고 feedback을 통해 보상함으로써 아날로그 부분에 대한 수신기 구조가 복잡해 질 수 있다. 하지만, 감소된 연산량과 향상된 성능으로 인해 고속의 시스템에서 사용이 적합합니다.

## VI. 결 론

우리는 도플러, 송·수신 발전기의 오차로 인해 발생하는 CFO와 STO에 대해서 영향을 알아보고 보상에 대해 연구하였다. CFO와 STO 모두 OFDM 시스템에서 성능 열화에 큰 원인이다. 본 논문은 이런 영향이 추정된 값의 피드백을 통해 위상 회전과 샘플링 타입의 조절하여 보상하는 방법을 제안하고, 성능을 시뮬레이션의 통해 분석, 확인하였다. 그리고 시뮬레이션의 결과로서 피드백을 통한 시간 축에서 보상방법이 성능 개선 면에서 보상을 이용한 성능 개선방법에 떨어지지 않는 좋은 방법임을 증명하였다. 또한 피드백 시스템은 성능열화 시키는 요인을 보상기 이전에 보상함으로써, 보상기의 복잡도를 줄일 수 있고, 보상기는 성능

열화의 요인이 줄어든 상태에서 연산을 수행함으로써 더 좋은 성능을 낼 수 있다는 것을 고려하면, 피드백 방식 보상 방법은 뛰어난 성능을 낼 수 있음을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correcting," IEEE Transactions on Communications, Vol.42, No.10, pp.2908-2914, Oct. 1994.
- [2] E. S. Shim, S. T. Kim, H. K. Song, and Y. H. You, "OFDM carrier frequency offset estimation methods with improved performance," IEEE Transaction Broadcast., Vol.53, No.2, pp.567-573, June 2007.
- [3] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," IEEE Transactions on Communications, Vol.45, No.12, pp.1613-1621, Dec. 1997.
- [4] M. Sliskovic, "Sampling frequency offset estimation and correction in OFDM systems," in The 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), Vol.1, pp.437-440, Sep. 2001.
- [5] G. Ren, Y. Chang, H. Zhang, and H. Zhang, "Synchronization method based on a new constant envelope preamble for OFDM systems," IEEE Transactions on Broadcast., Vol.51, No.1, pp.139-143, Mar. 2005.
- [6] M. Speth, S. Fechtel, G. Fock and H. Meyr, "Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study," IEEE Transactions on Communications, Vol.49, Issue 4, pp.571-578, April 2001.
- [7] Peng Liu, Bing-bing Li, Zhao-yang Lu and Feng-kui Gong, "A new frequency synchronization scheme for OFDM," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.50, Issue 3, pp.823-828, Aug. 2004.
- [8] Jun Wu, Qun Zhou and K. K. M. Cheng, "A joint estimation algorithm of symbol timing and carrier offset in OFDM systems," Vehicular Technology Conference 2001 (IEEE VTC 53rd), Vol.1, pp.712-716, May 2001.



- [9] A. Langowski, "Fast and accurate OFDM time and frequency synchronization," International Symposium on Wireless Communication Systems, 2007 (ISWCS 2007), pp.86-90, 17-19 Oct. 2007.
- [10] J. J. Van de Beek, M. Sandell and P. O. Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.45, Issue7, pp.1800-1805, July 1997.
- [11] Li Zhenhong and A. Mammela, "An all-digital frequency synchronization scheme for OFDM systems," Proc. IEEE PIMRC-97, Vol, pp.327-331, 1997.
- [12] Dah-Chung Chang, "Effect and compensation of symbol timing offset in OFDM system with channel interpolation," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.54, No.4, pp.761-770, Dec. 2008.

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)

정회원



1988년~현재 충북대학교 전자공학과 교수

2002년 3월~2004년 2월 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

1996년~현재 IEEE, IET 논문 심사위원

2002년 한국전자과학회 학술상 수상

2008년 ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상

<관심분야> 무선 통신 시스템, 위성통신, B3G/4G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리

이 희 규 (Hui-Kyu Lee)

준회원



2010년 2월 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부(공학사)

2010년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 석사과정

<관심분야> 무선 통신 시스템, 이동 통신 시스템