

# TDM 수신 방식의 단일 RF 체인 MIMO 시스템에서 STO 특성 분석 및 보상

## Sampling Time Offset and Compensation in TDM-Based Single RF Chain MIMO Receiver

안 창 영 · 유 흥 균

Changyoung An · Heung-Gyoon Ryu

### 요 약

기존의 MIMO 시스템은 수신 안테나 수만큼 신호처리를 위한 RF 체인이 필요하다. 안테나를 늘릴 경우, RF 체인도 같이 늘어나기 때문에 전력 소비량이 급격하게 증가하게 된다. 이러한 이유로 더 많은 안테나의 MIMO 시스템을 전력이 제한적인 모바일 단말기에 적용하기에는 어려움이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 단일 RF 체인을 이용하여 다중 안테나의 신호를 수신하는 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 STO(Sampling Timing Offset)을 동기 신호와 신호의 위상 각 추정을 통해 보상하였을 때 다중 RF chain을 사용하는 일반적인 MIMO 시스템과 유사한 성능을 낸다. 따라서 단일 RF chain을 통하여 전력 소비를 감소시키면서 다중 안테나의 MIMO-OFDM 시스템을 구현할 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

Conventional MIMO system is required to a number of RF chains as much as a number of antennas. If the number of antennas increased then the number of RF chains increased. Therefore, it is difficult to apply conventional MIMO system to mobile terminals with limited power. In this paper, we propose a TDM(time division multiplexing)-based single RF chain MIMO system. The outcome shows that performance of the proposed system is similar to conventional MIMO system using multiple RF chains when STO is corrected by phase angle estimation and the synchronizing signal of received signal. Therefore, it is possible to implement the MIMO-OFDM system of low power and complexity through a single RF chain.

Key words : Single Rf Chain, Sampling Time, TDM, STO

### I. 서 론

인터넷 접속과 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 폭발적으로 증가함에 따라 고속의 데이터 전송은 차

세대 이동통신 시스템의 매우 중요한 부분으로 부각되고 있다. 현재 서비스하고 있는 LTE(Long Term Evolution)에 이어서 LTE-Advanced 이동통신 시스템의 목표는 보행자 이동 환경에서 1 Gbps, 고속으로

「이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013R1A2A2A-01005849).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received July 16, 2013 ; Revised September 2, 2013 ; Accepted September 11, 2013. (ID No. 20130716-062)

· Corresponding Author : Heung-Gyoon Ryu (e-mail : ecomm@cbu.ac.kr)

이동하는 상황에서 100 Mbps의 데이터 전송 속도를 만족시키는 것이다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위해 한정된 주파수 대역을 사용해서 고용량의 데이터를 전송하는 MIMO 시스템의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>.

MIMO 시스템은 송신기와 수신기에 다중의 안테나를 이용하여 서로 다른 데이터 스트림을 동시에 전송함으로써 시스템의 주파수 대역폭을 증가시키지 않고 고속의 데이터를 전송할 수 있는 공간 다중화 기법과 다중의 송신 안테나에서 같거나 변형된 데이터를 전송하여 성능을 향상시키는 공간 다이버시티 기술로 나눌 수 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 MIMO 시스템의 대표적인 수신 방식에는 ML(Maximum Likelihood) 방식과 ZF(Zero Forcing) 방식이 있다. ML 검파 방식은 수신 신호와 복조된 신호 사이의 최소 거리를 갖는 송신 신호 집합을 찾는 방식으로써 검파기 최고의 성능을 보인다. 그러나 ML 방식은 송수신 안테나가 많아지거나 신호의 성상이 커지면 탐색해야 하는 경우의 수가 지수적으로 많아지기 때문에 실제 구현이 어렵다. 이와 반대로 ZF 검파 방식은 채널 행렬의 역행렬을 수신 신호에 곱함으로써 전송된 신호를 검파하는 방식이다. ZF 검파 방식은 ML 방식에 비해서 계산량이 매우 적지만, 역행렬을 곱할 때 잡음이 증폭되므로 BER 성능이 좋지 않다. 이러한 trade-off 관계로 인해 MIMO 시스템에서는 성능과 복잡도의 적절한 지점을 찾는 것이 중요하다<sup>[3]~[5]</sup>.

기존의 MIMO 시스템은 수신 안테나 수만큼 신호 처리를 위한 RF 체인이 필요하다. 안테나를 늘릴 경우 RF 체인도 같이 늘어나기 때문에 전력 소비량이 급격하게 증가하게 된다. 이러한 이유로 더 많은 안테나를 사용하는 MIMO 시스템은 전력이 제한적인 모바일 단말기에 적용하기에는 어려움이 있다. 본 논문에서는 첫 번째로 이러한 문제를 해결하기 위하여 단일 RF 체인을 이용하여 다중 안테나의 신호를 수신하는 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 다수의 안테나의 신호를 고속 스위칭을 통해 시간적으로 분리하여 하나의 RF 체인으로 신호를 수신하는 시스템이다. 제안하는 방법은 다중 안테나를 사용하는 MIMO 시스템의 RF 체인 수를 줄여 전력 소비를 감소시킬 수 있다. 두 번째로는 이러한 고속 스위칭 방식으로 신호를 수신할 경우, 시간적으로 분리되기

때문에 두 신호의 간섭은 나타나지 않지만, 아날로그와 디지털 상호 변환에서 발생하는 STO와 두 신호가 동시에 샘플링될 수 없어서 발생하는 고속 스위칭 구조상의 오프셋을 분석하고, 이를 보상하여 시스템의 성능을 확인한다. 제안하는 시스템은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반 2x2 MIMO 시스템으로 설계하여 시뮬레이션하였다<sup>[6]</sup>.

본 논문은 서론에 이어 II장에서 MIMO 시스템에 대하여 알아보고, III장에서는 제안하는 시스템을 소개하며, IV장에서는 제안하는 시스템의 시뮬레이션 결과를 분석한다. 그리고 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존의 MIMO 시스템

다중 안테나를 사용하는 MIMO 시스템의 경우 성능 향상을 위한 공간 다이버시티 기법과 전송률 향상을 위한 공간 다중화 기법이 있다. 본 논문에서는 대표적인 다중화 기법인 V-BLAST(Vertical Bell Laboratories layered Space-Time)를 이용하여 각 송신 안테나에서 별도의 코딩 작업이 없이 독립적으로 신호를 할당하고, 수신단에서 신호를 분리하는 방법을 사용한다.

그림 1은 공간 다중화 기법을 사용하는 MIMO 시스템의 구조에서 송신단의 신호들은 독립적으로 2개의 안테나로 분배되어 송신된다<sup>[9]</sup>. 수신 안테나에서는 각 송신 안테나의 신호가 독립적으로 수신되는 것이 아니라 2개의 송신안테나 신호가 함께 합쳐져서 수신되게 된다. 그렇기 때문에 채널 환경을 추정 한 후, 채널 정보를 이용하여 섞여 있는 2개의 신호를 분리한다. 이 신호를 분리하는 방법으로는 가장 성능이 우수하지만 매우 큰 복잡도를 가진 ML 방식이 있으며, 낮은 복잡도를 가지지만 성능이 ML에 비하여 많이 낮은 ZF 방법이 있다. 또한, ZF 방법을 사

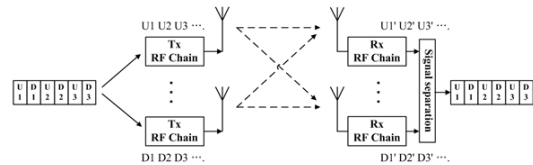


그림 1. 기존 MIMO 시스템의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of conventional MIMO system.

용할 때 나타나는 잡음 성분이 커지는 단점을 보완하여 성능을 약간 개선시키는 MMSE(Minimum Mean Square Error) 방법이 있다. 본 논문에서는 너무 큰 복잡도로 인해 구현이 어려운 ML 방식을 제외한 ZF 방식과 MMSE 방식을 이용하여 MIMO 시스템의 수신 신호를 분리한다.

ZF 알고리즘은 선형 알고리즘으로 수신 신호 벡터  $\mathbf{r}$ 에  $\mathbf{H}^\#$ 를 곱해주는 알고리즘이다.  $\mathbf{H}^\#$ 는 채널 행렬  $\mathbf{H}$ 의 Moore-Penrose pseudo-inverse 행렬을 나타낸다.

$$\mathbf{H}^\# = (\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^H \quad (1)$$

$$\mathbf{H}^\#\mathbf{H} = \mathbf{I} \quad (2)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{S} \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{H}^\# \mathbf{r} \quad (4)$$

위 식 (1)에서 첨자  $H$ 는 Hermitian 연산이다. 위 식에서  $\mathbf{S}$ 는 ZF 알고리즘이 적용된 후의 신호를 나타낸다. 송신신호는 수신 신호에  $\mathbf{H}^\#$ 를 곱해서 채널의 영향  $\mathbf{H}$ 를 제거하여 구한다. 그러나  $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$  행렬의 역행렬이 구해지지 않는다면  $\mathbf{H}^\#$ 를 구할 수 없으며, 송신 신호를 복원할 때 잡음에도  $\mathbf{H}^\#$ 이 곱해지므로 잡음 신호가 증폭되는 단점이 있다<sup>7)</sup>.

MMSE 알고리즘은 ZF 알고리즘에서 잡음 신호가 증폭되는 단점을 보완하기 위하여 역행렬을 구할 때 잡음 신호까지 고려한 방법이다. MMSE 알고리즘은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{H}_{MMSE} = \left( \mathbf{H}^H\mathbf{H} + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} \mathbf{I}_M \right)^{-1} \mathbf{H}^H \quad (5)$$

여기에서  $\mathbf{I}_M$ 은  $M \times M$  크기의 단위 행렬이고,  $\sigma_n^2$ 는 잡음의 분산값,  $\sigma_s^2$ 는 신호 크기의 분산값을 나타낸다. 이 방법은  $\mathbf{H}_{MMSE}$ 이 SNR에 따라 변화하면서 간섭을 제거하는 동시에 잡음의 증폭을 막게 된다<sup>4)</sup>.

이러한 기존의 MIMO 시스템은 데이터 레이트를 증가시키기 위해 더 많은 안테나를 사용할 경우, 그에 따라 RF chain의 개수 또한 증가하게 된다. RF chain이 증가되면 전력 소모 및 복잡도가 증가하게 되어 전력이 제한적인 모바일 시스템에 확장된 MIMO 시스템을 적용하는 것은 어렵다. 만약  $N$ 개의 안테나를 사용하는 MIMO 시스템이라면  $N$ 개의 LNA와

Down-converter, ADC, FFT가 필요하게 된다<sup>8)</sup>.

### III. 제안하는 시스템 모델

#### 3-1 시스템 모델

MIMO 시스템을 기존의 방식으로 확장할 경우, 발생하는 문제점은 더 높은 데이터 수요를 해결하기 위한 차세대 통신 시스템에서 반드시 해결되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 TDM을 이용하여 단일 RF 체인을 사용하는 시스템을 제안한다.

그림 2는 제안하는 단일 RF chain MIMO 시스템을 나타낸다. 수신 안테나로부터 수신된 신호는 TDM(Time Division Multiplexing) 방식을 구현하는 고속 스위칭에 의해 단일 RF 체인으로 샘플링된다. 각 수신 안테나로부터 순차적으로 RF 체인에 인가된 신호는 ADC를 거치면서 신호에 대한 동기를 맞추게 된다. 제안하는 방법을 사용할 경우 더 높은 데이터 전송률을 얻기 위해 안테나를 증가시켜도 RF chain은 하나만을 사용한다. 즉,  $N$ 개의 안테나를 사용하여도 1개의 LNA, Down-converter, ADC, FFT를 이용하여 신호를 수신할 수 있다. 따라서 이러한 방식은 기존의 방식보다 RF chain의 수가 감소하여 기존 시스템에 비해 낮은 전력 소모와 낮은 복잡도를 갖는다.

#### 3-2 STO의 추정 및 보상

제안하는 시스템은 TDM 샘플링 과정에서 STO (Sampling Time Offset)에 의해 성능 저하가 일어날 수 있다<sup>10)</sup>. OFDM 시스템에서는 변조와 복조가 IFFT와

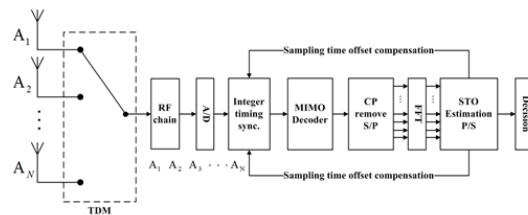


그림 2. TDM 수신 방식을 사용하는 단일 RF 체인 MIMO 시스템의 블록도

Fig. 2. Block diagram of proposed MIMO system using single RF chain.

표 1. 기존 시스템과 제안하는 시스템의 복잡도 비교  
Table 1. Complexity comparison between conventional and proposed MIMO schemes.

	Conventional MIMO scheme	Proposed MIMO scheme
Receive antennas	$n_R$	$n_R$
LNAs	$n_R$	1
Down-converters	$n_R$	1
ADCs	$n_R$	1
FFTs	$n_R$	1

FFT에서 이루어진다. FFT를 하기 위해서는 수신된 신호의 시작 지점을 정확하게 잡는 것이 중요하다. 특히 OFDM 시스템은 심볼 사이에 ISI(Inter-Symbol Interference)와 ICI(Inter-Channel Interference)의 발생을 방지하기 위하여 CP(Cyclic Prefix) 구간이 삽입되게 되는데, 수신단에서 FFT의 시작점이 CP 구간을 포함할 경우 신호의 성상도가 상황에 따라 매우 심각하게 왜곡될 수 있다<sup>[11]</sup>. 더욱이 TDM을 구현하기 위하여 고속 샘플링을 할 때 사용되는 발진기의 불안정에 의해 샘플링이 이상적으로 이루어지지 않을 수 있다. 샘플링이 동일한 간격으로 이루어지지 않을 경우, ADC가 후에 FFT를 할 때 FFT의 시작점을 정확하게 잡지 못하고, CP의 구간을 침범하여 FFT를 하게 되어 심볼의 왜곡이 발생할 수 있다. 실제 구현에 있어서 이상적인 발진 조건을 만족하지 못하는 상황이 발생할 수 있기 때문에 이러한 오프셋이 있는 상황은 반드시 고려되어야 한다. 이러한 이유로 STO를 추정하고, 추정된 오프셋 값을 보상해야 동기를 맞추고 정상적인 신호를 수신하여 처리할 수 있다. 오프셋을 정정하지 않는다면 신호의 흐름 자체가 무의미하게 섞이기 때문에 반드시 오프셋값을 보상해 주어야 한다.

OFDM의 수신 신호는 다음과 같다<sup>[12]</sup>.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} e^{-j2\pi \frac{(\delta_m + \Delta\delta_m)}{N} m} \quad (6)$$

식 (6)에서  $\mathbf{Y}$ 는 수신 신호 벡터를 의미하며,  $\mathbf{H}$ 는 채널 벡터이다.  $\mathbf{X}$ 는 송신 심볼으로 구성된 벡터이다.  $N$ 은 부반송파의 개수이다.  $\delta_m$ 은 정수배 오프셋

의 영향이며,  $\Delta\delta_m$ 은 소수배 오프셋의 영향을 나타낸다. 정수배 오프셋의 발생은 수신기에서 FFT 출력 신호의 부반송파 인덱스가 순환 이동되는 현상을 일으킨다. 원래 자리에 있던 심볼은 정수배 오프셋의 영향으로 오프셋의 값만큼 밀려 순환 이동되는 현상을 일으킨다. 따라서 이를 보상하지 않을 경우, 심각한 성능 열화를 발생한다. 또한, 소수배 오프셋이 발생하면 부반송파 간의 직교성을 상실하게 하고, 따라서 신호의 위상 회전과 크기 감소를 초래하게 된다. 정수배 오프셋은 가장 먼저 동기 신호를 이용하여 정수 단위의 샘플링을 맞추어야 한다. 송신단에서 동기 신호를 추가하여 신호를 송출하고, 수신단에서 신호를 수신한 다음 동기 신호 간에 오프셋이 있는지 확인하고, 오프셋이 있으면 이 오프셋을 보상해준다. 여기서 오프셋은 동기 신호간 최소 오차를 확인하여 추정한다. 수신된 동기 신호의 샘플링 값  $n$ 을 옮겨 가면서 알고 있는 동기 파일럿 신호와 최소 오차를 구하여 오프셋을 추정한다. 최소 오차를 구하는 식은 다음과 같다<sup>[12]</sup>.

$$\hat{\delta} = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \left( \sum_{i=\delta}^{N_G-1+\delta} |sync_{received}[n+i] - sync_{pilot}^*[i]|^2 \right) \quad (7)$$

여기에서  $N_G$ 는 탐색을 위한 신호 구간을 나타내며,  $n$ 은 수신 신호에서 탐색을 시작하기 위한 시작점을 나타낸다.  $n$ 값을 이동하면서 기준이 되는 동기 파일럿 신호와 최소 오차를 갖는 수신된 신호의 동기 신호 시작점을 찾는다.

정수 단위의 오프셋을 보정한 다음, 소수 단위의 오프셋을 정정해야 한다. 소수 단위의 오프셋의 경우 동기가 같은 두 신호가 수신된다고 하여도 TDM의 특성상 동시 수신이 불가능하기 때문에  $t/2$ 만큼의 추가적인 샘플링 타이밍 오프셋이 발생하게 된다. 여기에서  $t$ 는 2개의 스트림을 한 번씩 샘플링한 후의 전체 신호 주기를 나타낸다. 소수 단위의 오프셋은 주파수 축에서 위상의 회전 정도를 파악하여 추정할 수 있다<sup>[12]</sup>. 추정된 값을 이용하여 시간 축에서 샘플링 타임의 조절을 통하여 오프셋을 정정할 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 및 분석

채널 환경은 주파수 비선택적 Rayleigh 페이딩 환경을 가정하여 채널 행렬 각 성분을 평균이 0이고, 분산이 1인 i.i.d. 복소 가우시안 확률변수라고 가정하였다. 기존의 MIMO 시스템에서 ZF와 MMSE 방식의 알고리즘을 사용한 성능을 확인하고, 그 다음 제안하는 단일 RF chain 시스템의 성능을 분석한다. 각각의 시스템은 모두 MIMO-OFDM 기반으로 시뮬레이션 되었으며, 신호는 QPSK 신호를 사용하였다. STO에 대한 영향을 확인하기 위하여 정수 단위의 오프셋과 소수 단위의 오프셋을 추가하고, 이를 정정하였을 때와 정정하지 않았을 때의 성능을 확인하였다. 정수 단위 오프셋은 0, 120 샘플 오프셋 환경을 비교하였으며, 소수 단위 오프셋은 0.01, 0.02, 0.03, 0.05 샘플 오프셋 환경의 성능을 확인하였다.

그림 3은 일반적인 MIMO 시스템의 MMSE와 ZF 알고리즘에 따른 성능을 나타낸다. ZF에 비해 MMSE 알고리즘이 약간 더 좋은 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. ZF 알고리즘을 사용하였을 경우 약 24 dB에서  $10^{-3}$ 의 BER 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 이 시스템은 안테나 개수와 같은 RF chain이 사용되었다.

그림 4는 제안하는 단일 RF chain을 사용하는 MIMO 시스템에서 오프셋이 없을 때 성능을 보여준다. 오프셋이 없기 때문에 보상했을 때와 보상하지

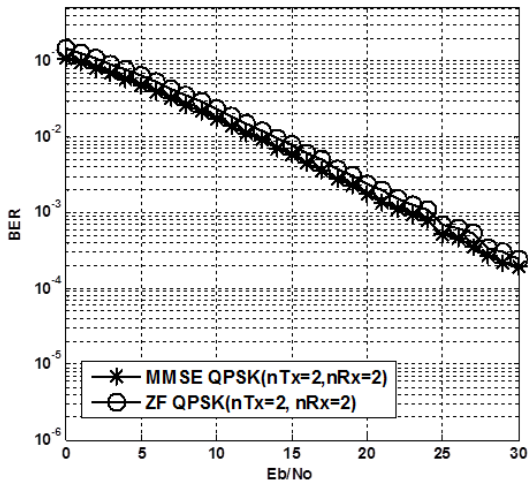


그림 3. 신호 분리 알고리즘에 따른 기존 MIMO 시스템의 성능  
Fig. 3. Performance of conventional system according to decoding algorithm.

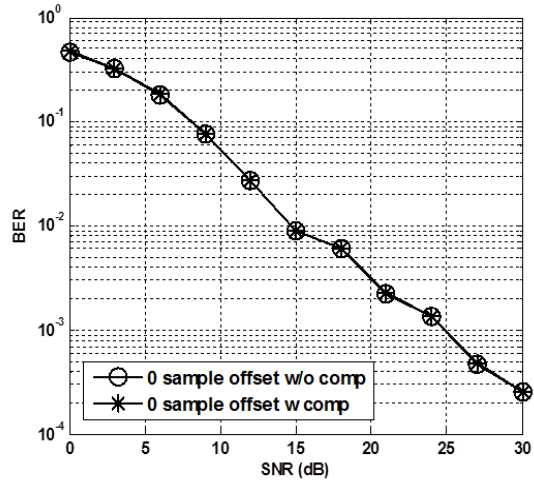


그림 4. 오프셋이 없을 때 제안하는 시스템의 성능  
Fig. 4. Performance of the proposed system without sampling time offset.

않았을 때 성능이 같은 것을 확인할 수 있다. 제안하는 시스템은 TDM을 사용하여 단일 RF chain으로 신호를 수신하지만, 오프셋이 없을 경우 일반적인 MIMO 시스템과 유사한 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 시스템은 24 dB에서  $10^{-3}$ 의 성능을 보인다.

그림 5를 통해 제안하는 단일 RF chain 시스템에서 각각의 안테나의 수신 신호에 오프셋이 존재함을 확인할 수 있다. 위 신호의 경우 두 신호의 오프셋이 160샘플이며, 동기 신호가 오프셋만큼 밀려 수신되는 것을 확인할 수 있다.

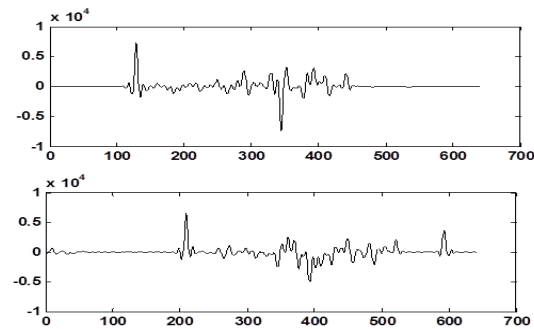


그림 5. 오프셋이 있을 때 수신 신호의 동기 신호 검출 파형  
Fig. 5. Synchronization data of received signal with sampling time offset.

그림 6은 그림 5의 오프셋이 존재하는 신호가 수신되었을 경우, 이를 보상한 경우와 보상하지 않은 경우의 성능을 보여준다. 이 시스템은 동기 신호를 이용하여 160 샘플의 오프셋을 추정하고 보상하였을 때, 오프셋이 없을 경우와 유사한 24 dB에서  $10^{-3}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 그러나 보상을 하지 않았을 경우 데이터 신호의 흐름이 완전히 섞이기 때문에 성능이 나오지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 소수 단위의 오프셋 환경에서 신호의 위상을 추정하여 보상하였을 경우 성능을 나타낸다.

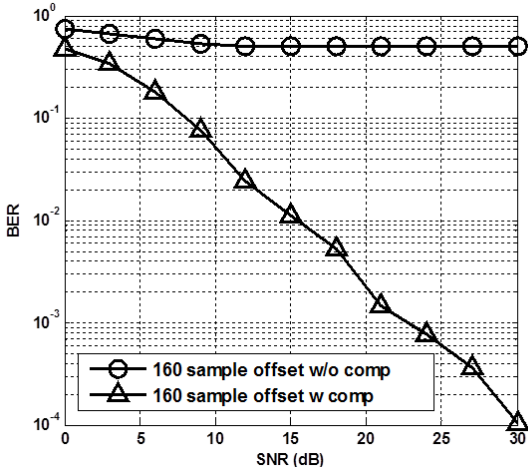


그림 6. 정수 단위 오프셋을 보상했을 때 성능  
Fig. 6. Performance of the proposed system when integer STO is compensated.

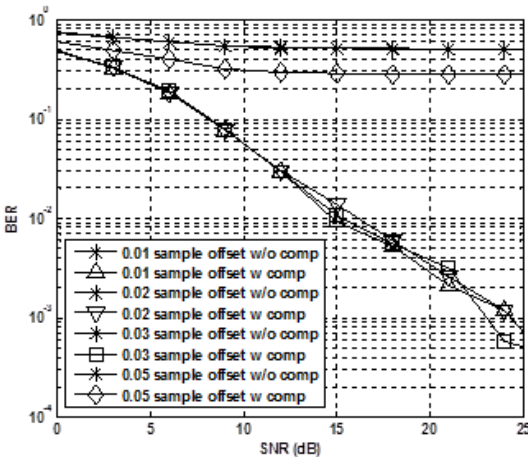


그림 7. 소수 단위 오프셋을 보상했을 때 성능  
Fig. 7. Performance of the proposed system when fractional STO is compensated.

두 신호 간의 차이가 소수 단위 0.01에서 0.05까지 오프셋이 발생하였을 경우 보상하면 24.5 dB에서  $10^{-3}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 그러나 보상하지 않았을 경우 소수 단위의 오프셋에 의해 심볼의 위상의 지연으로 발생하기 때문에 신호의 정상도가 일그러져서 성능이 나오지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 0.05의 오프셋이 발생하였을 경우에는 위상 추정을 할 수 있는 범위가 넘어가서 인접 다른 심볼로 추정되기 때문에, 추정 후에도 성능이 매우 좋지 않은 것을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

본 논문은 단일 RF chain을 이용한 MIMO 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 다중 안테나의 신호를 TDM 방식을 사용하여 시간적으로 분리하여 단일 RF chain으로 수신한다. 여러 개의 다중 안테나를 사용하지만, 하나의 LNA, Down-converter, ADC, FFT를 사용한다. 그러나 이러한 시스템은 STO에 의해 성능이 저하되기 때문에, 본 논문에서는 제안하는 시스템에서 STO가 발생하였을 경우의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션에서 STO는 정수 단위의 오프셋과 소수 단위의 오프셋에 대해 고려하였다. 제안하는 시스템은 STO를 동기 신호와 신호의 위상각 추정을 통해 보상하였을 때 다중 RF chain을 사용하는 일반적인 MIMO 시스템과 유사한 성능을 낸다. 따라서 단일 RF chain을 통하여 전력 소비를 감소시키면서 다중 안테나의 MIMO 시스템을 구현할 수 있음을 확인하였다.

### References

- [1] A. F. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Increasing data rate over wireless channel", *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 17, no. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.
- [2] X. Li, H. C. Huang, A. Lozano, and G. J. Foschini, "Reduced-complexity detection algorithm for system using multi-element arrays", *Proc. IEEE GLOBE-COM*, pp. 1072-1076, 2000.
- [3] D. Shiu, J. M. Kahn, "Layered space-time codes for wireless communications using multiple transmit an-

- tennas", in *Proc. IEEE ICC*, pp. 436-440, Jun. 1999.
- [4] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel", in *Proc. URSI ISSSE*, pp. 295-300, Sep. 1998.
- [5] G. J. Foschini, G. D. Golden, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Simplified processing for high spectral efficiency wireless communications employing multi-element arrays", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, pp. 1841-1852, Nov. 1999.
- [6] Amitava Ghosh, et al., "LTE-advanced: Next-generation wireless broadband technology", *IEEE Wireless Communications*, pp. 10-22, Jun. 2010.
- [7] Gang Wang, Dandan Wang, and Daoben Li, "An efficient ZF-SIC detection algorithm in MIMO CDMA system", *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003. 14th IEEE Proceedings on*, vol. 2, pp. 1708-1711, Sep. 2003.
- [8] M. Deruyck, W. Vereecken, E. Tanghe, W. Joseph, M. Pickavet, L. Martens, and P. Demeester, "Power consumption in wireless access network", *Wireless Conference(EW), 2010 European*, pp. 924-931, Apr. 2010.
- [9] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, "An overview of MIMO communications - a key to gigabit wireless", *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198-218, Feb. 2004.
- [10] Elliot Briggs, Brian Nutter, and Dan McLane, "Sample clock offset detection and correction in the LTE downlink", *Journal of Signal Processing Systems*, vol. 69, no. 1, pp. 31-39, 2012.
- [11] Sandeep Kaur, Charanjit Singh, and Amandeep Singh Sappal, "Effects and estimation techniques of symbol time offset and carrier frequency offset in OFDM system: Simulation and analysis", *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, pp. 1188-1196, 2012.
- [12] Hui-Kyu Lee, Heung-Gyoon Ryu, "Analysis and compensation of STO effects in the multi-band OFDM communication system of TDM reception method", *The Journal of Korea Information and Communications Society*, vol. 36, issue 5A, pp. 432-440, 2011.

안 창 영



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)  
 2013년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 신호처리

유 흥 균



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  
 2009년: SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상  
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리