

타이밍오차에 강건한 상향링크 OFDMA 시스템의 랜덤 액세스 기법

준회원 송현주*, 정회원 임대운*, 정병장**, 노태균**, 임민중*

A Random Access Scheme Robust to Timing Offsets for Uplink OFDMA Systems

Hyunjoo Song* *Associate Member*, Dae-Woon Rim*, Byung-Jang Jeong**,
Taegyun Noh**, Minjoong Rim* *Regular Members*

요 약

상향링크 OFDMA 시스템에서 빈번한 레인징 동작이 이루어지지 않는 경우 기지국과 단말의 타이밍 동기가 유지되지 않을 수 있다. 특히 크기가 큰 셀에서 간헐적인 랜덤 액세스를 하는 경우 무시할 수 없는 타이밍 오차가 발생하여 OFDMA 신호의 직교성이 깨짐으로 인한 성능 열화가 발생할 수 있다. 이 논문에서는 랜덤 액세스를 할 때 일반적인 OFDMA 심벌보다 짧은 길이의 OFDMA 심벌을 생성하여 전송함으로써 타이밍 오차가 발생하더라도 OFDMA의 직교성이 유지될 수 있는 새로운 랜덤 액세스 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 상향링크 OFDMA 심벌을 형성할 때 zero-padding 구간을 삽입함으로써 타이밍 오차에 대해 강건하도록 한다.

Key Words : Random Access, OFDMA, Uplink, Timing Offset, Zero-Padding

ABSTRACT

If ranging processes are not frequent in an uplink OFDMA system, the timing synchronization between base and mobile stations may not be maintained. Especially in the case of infrequent random accesses in a large cell, timing offsets can be considerable and the destroyed orthogonality of OFDMA signals may result in the degraded performance. This paper proposes a novel random access scheme for uplink OFDMA systems, which support the orthogonality of OFDMA signals with timing offsets by allowing a random access OFDMA symbol shorter than a normal one. In order to make uplink OFDMA systems robust to timing offsets, the proposed scheme inserts a zero-padding region in an OFDMA symbol.

I. 서 론

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템의 부반송파들을 다수

의 사용자들이 분할하여 자원을 공유하는 개념으로, 차세대 이동통신을 위한 새로운 다중접속 방식으로 고려되고 있다^[1]. 상향링크 OFDMA 시스템에서는 빈번한 레인징 동작이 이루어지지 않는 경우에는 기지국과 단말의 타이밍 동기가 유지되지 않을 수

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT신성장동력핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2006-S-001-02, 4세대 이동통신을 위한 적응 무선접속 및 전송 기술 개발]

* 동국대학교 정보통신공학과 (hjsong@dongguk.edu, dwlim01@dgu.edu, minjoong@dongguk.edu)

** 한국전자통신원 (bjeong@etri.re.kr, taegyun@etri.re.kr)

논문번호 : KICS2007-07-321, 접수일자 : 2007년 7월 23일, 최종논문접수일자 : 2008년 5월 19일

있다. 특히 크기가 큰 셀에서 간헐적으로 데이터 전송이 이루어지는 경우 무시할 수 없는 크기의 타이밍 오차가 발생하여 OFDMA 신호의 직교성이 훼손됨으로 인한 성능 열화가 발생할 수 있다. 또한 적절한 전력 제어가 이루어지지 않는 경우에는 상향링크 신호의 타이밍 오차는 다른 단말의 신호에도 영향을 미칠 수 있다.

데이터 전송이 이루어지지 않는 경우의 빈번한 주기적인 레인징 동작은 무선자원의 낭비를 가져올 수 있으며 데이터 전송을 할 때마다 레인징 동작을 통하여 타이밍을 맞추는 동작을 하는 것은 데이터 전송의 지연을 초래하여 실시간성 서비스를 지원하기 어렵게 한다. 빈번한 주기적인 레인징을 줄이고 상향링크 데이터 전송의 지연을 줄이기 위해서는 타이밍 오차가 존재하는 환경에서도 별도의 레인징 동작 없이 밴드폭 할당 요구를 하는 랜덤 액세스 버스트를 바로 전송할 수 있어야 하며 이 때 타이밍 오차가 있는 환경에서도 OFDMA 심벌의 직교성이 유지될 수 있어야 한다.

이 논문에서는 상향링크 OFDMA 시스템에서 랜덤 액세스를 할 때 일반적인 OFDMA 심벌보다 짧은 길이의 OFDMA 심벌을 생성하여 전송함으로써 타이밍 오차가 존재하여도 OFDMA의 직교성이 유지될 수 있는 새로운 랜덤 액세스 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 상향링크 OFDMA 심벌을 형성할 때 GSM(Global System for Mobile communications)의 액세스 버스트와 유사한 형태의 zero-padding 구간을 삽입함으로써 타이밍 오차가 있더라도 OFDMA 심벌의 직교성을 유지할 수 있도록 한다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 타이밍 오차가 존재할 때의 랜덤 액세스 방법을 설명하고, III장에서는 일반적인 OFDMA 전송 방법에 대해서 설명한다. IV장에서는 랜덤 액세스를 위하여 OFDMA 심벌에 zero-padding 구간을 삽입하는 방법을 제안하며 V장에서 실험을 통해 제안하는 방법의 성능을 확인하고 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 타이밍 오차가 존재할 때의 랜덤 액세스

타이밍 오차가 클 때에는 특별한 형태의 랜덤 액세스 방법이 필요할 수 있다. IEEE 802.16e 시스템에서는 레인징 동작을 통해 타이밍 동기를 맞춘다^[2]. 초기 레인징은 기지국과 단말 사이에 상향링크에 대한 동기가 맞춰져 있지 않은 상태에서 이루어지므로 큰 타이밍 오차가 존재할 수 있으며 그림 1

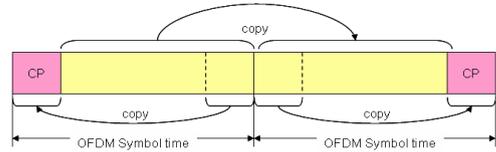


그림 1. IEEE 802.16e 초기 레인징

과 같은 방법으로 두 심벌 길이의 OFDMA 신호를 생성하여 전송한다. 전송은 두 심벌 길이로 이루어지지만 수신은 한 심벌 길이만을 수신하여 타이밍 오차가 있더라도 FFT(Fast Fourier Transform) 구간 내에서는 직교성이 유지되도록 한다. 이 방법은 두 개의 OFDMA 심벌을 전송하므로 무선 자원의 낭비가 있으며 수신되는 FFT 구간에서는 직교성이 유지되지만 타이밍 오차가 있고 전력 제어가 이루어지지 않았을 경우 심벌의 앞뒤로는 다른 사용자에게 심벌간의 간섭 및 부반송파간의 간섭을 발생시켜 다른 사용자의 성능에도 영향을 미칠 가능성이 있다.

TDMA(Time Division Multiple Access) 방식의 GSM 시스템은 그림 2와 같이 일반적인 데이터 전송을 위한 버스트와 랜덤 액세스를 위한 액세스 버스트의 구조가 서로 다른 형태를 가진다^[3]. 랜덤 액세스는 타이밍 동기가 맞춰져 있지 않은 상태에서 이루어질 수 있기 때문에 액세스 버스트의 보호구간은 일반적인 버스트의 경우보다 더 길다.

GSM 시스템의 버스트 구조처럼 OFDMA 시스템도 데이터 전송을 위한 심벌과 랜덤 액세스를 위한 심벌 구조를 그림 3처럼 가정할 수 있다. 랜덤 액세스에서 발생할 수 있는 타이밍 오차의 크기만큼 0을 OFDMA 심벌 뒷부분에 삽입하여

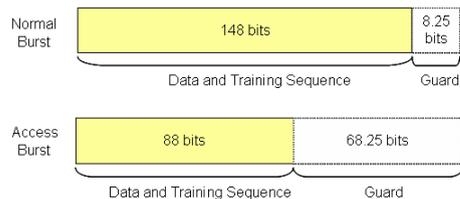


그림 2. GSM의 burst 구조

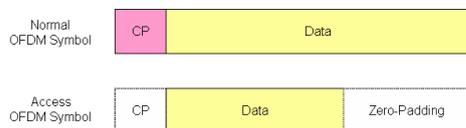


그림 3. 랜덤 액세스를 위한 OFDM 심벌 구조

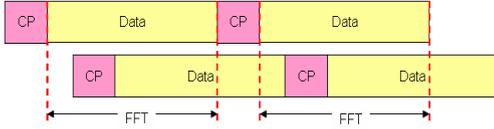


그림 4. 랜덤 액세스를 하는 단말이 큰 타이밍 오차를 가질 때 수신된 OFDMA 심볼

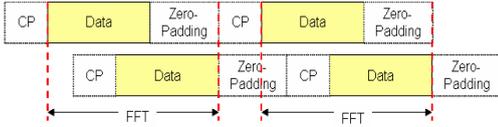


그림 5. 랜덤 액세스를 하는 단말을 위해 zero-padding 구간을 삽입한 OFDMA 심볼

zero-padding 구간을 생성함으로써 데이터 전송을 위한 OFDMA 심볼보다 짧은 길이의 심볼 구조를 가질 수 있다.

그림 4와 같이 일반적인 OFDMA 심볼 구조로 랜덤 액세스를 할 때 큰 타이밍 오차를 가지는 단말이 존재하는 경우 타이밍 오차에 의한 심볼간의 간섭으로 직교성이 깨지게 된다. 그러나 그림 5와 같이 zero-padding 구간을 삽입한 OFDMA 심볼 구조를 이용하여 랜덤 액세스를 수행하면 타이밍 오차가 있어도 FFT 구간 내에서 직교성을 유지하며 다른 사용자에게도 심볼간의 간섭이나 부반송파간의 간섭을 일으키지 않는다. 이 논문에서는 랜덤 액세스를 위하여 그림 3과 같이 짧은 길이를 가지는 OFDMA 심볼을 사용하는 것을 제안한다.

III. 일반적인 OFDMA 전송 방법

OFDMA 시스템의 블록도는 그림 6과 같다. 길이가 L 인 변조된 신호벡터를 \mathbf{S} , L 개의 데이터를 $N(N \geq L)$ 개의 부반송파로 할당하는 $(N \times L)$ 행렬을 \mathbf{M} 이라고 할 때, 길이 N 의 부반송파에 할당된 신호 \mathbf{X} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}\mathbf{S} \quad (1)$$

송신기에서는 부반송파에 할당된 신호를 N point IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)한다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{Q}^H \mathbf{X} \quad (2)$$

식 (2)에서 \mathbf{Q} 는 길이 N 의 DFT(Discrete Fourier Transform) 행렬이며 \mathbf{Q}^H 는 \mathbf{Q} 의 복소 전치

(Hermitian Transpose) 행렬이다. 이 신호에 길이 K 의 순환전치 구간을 붙여서 길이 $N+K$ 의 OFDMA 심볼 벡터 $\tilde{\mathbf{x}}$ 을 생성한다.

$$\tilde{\mathbf{x}}(i) = \begin{cases} x(i+N) & (i < 0) \\ x(i) & (i \geq 0) \end{cases} \quad (-K \leq i < N) \quad (3)$$

순환전치 구간 K 이하의 지연확산을 가지는 다중경로를 통과한 후 순환전치 구간을 제거한 뒤의 수신된 데이터 $r(i)$ 는, $h(k) (0 \leq k \leq K)$ 를 다중경로 채널, $w(i)$ 를 백색잡음 및 간섭이라고 할 때, 다음과 같이 표현된다.

$$r(i) = \sum_{k=0}^K \tilde{\mathbf{x}}(i-k)h(k) + w(i) \quad (0 \leq i < N) \quad (4)$$

식 (4)를 벡터 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{r} = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{w} \quad (5)$$

식 (5)에서 \mathbf{r} 는 길이 N 의 수신 벡터, $\tilde{\mathbf{x}}$ 는 길이 $N+K$ 의 송신 벡터, \mathbf{w} 는 길이 N 의 잡음 벡터이며, $\tilde{\mathbf{C}}$ 는 $(N \times (N+K))$ 채널행렬로서 다음과 같다.

$$\tilde{C}(i, j) = \begin{cases} h(i-j) & (j \leq i \leq j+K) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (0 \leq i < N, -K \leq j < N) \quad (6)$$

식 (5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (7)$$

식 (7)에서 $(N \times N)$ 행렬 \mathbf{C} 는 다음과 같다.

$$C(i, j) = \begin{cases} \tilde{C}(i, j) + \tilde{C}(i, j-N) & (j > N-K) \\ \tilde{C}(i, j+K) & \text{otherwise} \end{cases} = \begin{cases} h(\text{mod}(i-j, N)) & 0 \leq \text{mod}(i-j, N) \leq K \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (0 \leq i < N, 0 \leq j < N) \quad (8)$$

행렬 \mathbf{C} 는 순환특성을 가지는 $(N \times N)$ 행렬이므로 다음과 같이 다시 쓰여 질 수 있다^[4].

$$\mathbf{C} = \mathbf{Q}^H \mathbf{H} \mathbf{Q} \quad (9)$$

식 (9)에서 \mathbf{H} 는 주파수축의 채널응답값을 가지는 $(N \times N)$ 대각선 행렬이다. 식 (7)의 수신 데이터를 FFT를 통해서 주파수축으로 보내면 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{W} \quad (10)$$

식 (10)에서 $\mathbf{R} = \mathbf{Q}\mathbf{r}$, $\mathbf{X} = \mathbf{Q}\mathbf{x}$, $\mathbf{W} = \mathbf{Q}\mathbf{w}$ 이다. 주파수축의 간섭 및 잡음 벡터 \mathbf{W} 의 분산을 나타내는 대각선 행렬을 Σ 라고 하며 완전한 채널 추정을 가정할 때, 채널보상된 길이 N 의 벡터 \mathbf{Y} 는 식 (11)과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}^H \Sigma^{-1} \mathbf{R} \quad (11)$$

수신기에서는 식 (12)에서와 같이 할당된 부반송파로부터 데이터를 추출한다.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \quad (12)$$

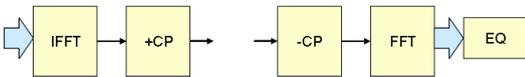


그림 6. OFDMA 시스템

IV. 랜덤 액세스를 위한 Zero-Padding 기법

4.1 Zero-Padding 생성 방법

랜덤 액세스 할 때, 타이밍 오차가 최대 M 만큼 될 수 있다고 하자. 타이밍 오차가 있을 때에는 OFDMA 심벌이 뒤로 밀려 직교성이 깨지게 된다. 직교성을 유지하기 위해서는 OFDMA 심벌 \tilde{x} 의 마지막 M 개의 샘플을 아래와 같이 0이 되도록 하여 OFDMA 심벌이 짧은 구간을 가지는 것과 같은 효과를 가지게 한다.

$$x(i) = 0 \quad (N - M \leq i < N) \quad (13)$$

식 (13)은 IFFT 후에 하게 되면 OFDMA의 직교성이 상실되므로 데이터 생성 과정에서 행하여 OFDMA의 형태를 유지할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서 SC-FDMA(Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) 기술을 활용한다. SC-FDMA 시스템의 블록도는 그림 7과 같이 OFDMA 시스템에서 주파수축에서 데이터를 할당하

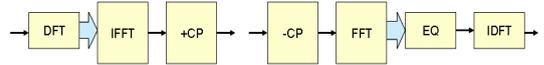


그림 7. SC-FDMA 시스템

기 전 DFT를 수행한다⁵⁾.

길이 L 의 전송 벡터를 \mathbf{S} 라고 할 때 zero-padding을 위해서는 \mathbf{S} 를 다음과 같이 정의한다.

$$s(l) = 0 \quad (L - ML/N \leq l < L) \quad (14)$$

L point DFT를 수행하여 평균전력이 1인 주파수축 신호를 만든다.

$$\mathbf{S} = \tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{s} \quad (15)$$

식 (15)에서 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 는 길이 L 의 DFT 행렬이다. L 개의 데이터를 N 개의 부반송파로 할당하는 $(N \times L)$ 행렬을 \mathbf{M} 이라고 할 때, 길이 N 의 부반송파 할당된 신호 \mathbf{X} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}\mathbf{S} \quad (16)$$

송신기에서는 부반송파 할당된 신호를 길이 N 의 IFFT를 한다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{Q}^H \mathbf{X} \quad (17)$$

이 신호에 길이 K 의 순환전치 구간을 붙여서 길이 $N+K$ 의 OFDMA(SC-FDMA) 심벌 벡터 \tilde{x} 를 생성한다.

$$\tilde{x}(i) = \begin{cases} x(i+N) & (i < 0) \\ x(i) & (i \geq 0) \end{cases} \quad (-K \leq i < N) \quad (18)$$

식 (16)에서 연속적인 부반송파 할당을 하는 경우 시간축 신호 \mathbf{S} 가 보간(interpolation)되어 \mathbf{X} 가 되는 과정은 \mathbf{S} 를 up-sampling한 후 보간필터와 circular convolution을 시키는 것이다. 이 때 보간된 중간값들은 식 (13)과 같이 원하는 구간에서 0이 되지는 않지만 0을 보간한 것이므로 0에 근사한 값을 얻을 수 있다. 보간된 중간값들도 식 (13)을 근사적으로 만족시키기 위해서는 보간의 꼬리 부분을 줄여야 한다. 이를 위해서는 주파수축에서 윈도우 기법을 사용할 수 있다⁵⁾.

4.2 Zero-Padding 구간을 가지는 신호의 수신

식 (13)을 만족하는 OFDMA 신호를 생성하였다 고 가정하였을 때, 첫 OFDMA 심벌의 경우 이전 심벌이 존재하지 않으며 뒤따라오는 OFDMA 심벌의 경우는 앞의 OFDMA 심벌도 식 (13)을 만족하므로 식 (18)은 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}(i) &= \begin{cases} 0 & (-K-M \leq i < 0) \\ \tilde{x}(i) & (0 \leq i < N-M) \\ 0 & (N-M \leq i < N) \end{cases} \\ &= \begin{cases} x(i+N) & (i < 0) \\ x(i) & (i \geq 0) \end{cases} \quad (-K-M \leq i < N) \end{aligned} \quad (19)$$

$K+M$ 이하의 타이밍 오차 및 지연확산을 가지는 다중경로를 통과한 후 순환전치 구간을 제거한 뒤의 수신된 데이터 $r(i)$ 는, $h(k) (0 \leq k \leq K+M)$ 를 다중경로 채널, $w(i)$ 를 백색잡음 및 간섭이라고 할 때, 다음과 같이 표현된다.

$$r(i) = \sum_{k=0}^{K+M} \tilde{x}(i-k)h(k) + w(i) \quad (0 \leq i < N) \quad (20)$$

식 (20)을 벡터 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{r} = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{w} \quad (21)$$

식 (21)에서 \mathbf{r} 은 길이 N 의 수신 벡터, $\tilde{\mathbf{x}}$ 는 길이 $N+K+M$ 의 송신 벡터, \mathbf{w} 는 길이 N 의 잡음 벡터이며, $\tilde{\mathbf{C}}$ 는 $(N \times (N+K+M))$ 채널행렬로서 다음과 같다.

$$\tilde{C}(i,j) = \begin{cases} h(i-j) & (j \leq i \leq j+K+M) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (0 \leq i < N, -K-M \leq j < N) \quad (22)$$

식 (22)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (23)$$

식 (23)에서 $(N \times N)$ 행렬 \mathbf{C} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C(i,j) &= \begin{cases} \tilde{C}(i,j) + \tilde{C}(i,j-N) & (j > N-K-M) \\ \tilde{C}(i,j+K) & \text{otherwise} \end{cases} \\ &= \begin{cases} h(\text{mod}(i-j,N)) & 0 \leq \text{mod}(i-j,N) \leq K+M \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (0 \leq i < N, 0 \leq j < N) \end{aligned} \quad (24)$$

행렬 \mathbf{C} 는 순환 특성을 가지는 $(N \times N)$ 행렬이므로 다음과 같이 다시 쓰여 질 수 있다^[4].

$$\mathbf{C} = \mathbf{Q}^H \mathbf{H} \mathbf{Q} \quad (25)$$

식 (25)에서 \mathbf{H} 는 주파수축의 채널응답값을 가지는 $(N \times N)$ 대각선 행렬이다. 식 (23)의 수신 데이터를 FFT를 통해서 주파수축으로 보내면 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{W} \quad (26)$$

주파수축의 간섭 및 잡음 벡터 \mathbf{W} 의 분산을 나타내는 대각선 행렬을 Σ 라고 할 때 다음과 같은 MMSE(Minimum Mean Square Error) 방법을 사용하여 등화를 한다.

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \Sigma)^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{R} \quad (27)$$

수신기에서는 등화 전, 혹은 후에 부분송파 할당의 역작용을 한다.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Y} \quad (28)$$

등화 및 부분송파로부터의 데이터 추출이 이루어지면 IFFT를 통해서 데이터를 추출한다.

$$\mathbf{z} = \tilde{\mathbf{Q}}^H \mathbf{Z} \quad (29)$$

V. 실험 및 토의

실험에서는 큰 타이밍 오차가 있는 환경에서 랜덤 액세스를 할 때 일반적인 OFDMA 전송을 하는 경우와 zero-padding을 적용한 OFDMA 전송에서의 BER(Bit Error Rate) 성능을 확인하였다. FFT 구간은 1024이고 순환전치 구간은 64이며 사용자는 32개의 부분송파를 사용하였다. 두 방법의 데이터 전송량을 일치시키기 위하여 일반적인 OFDMA 전송의 경우 32개의 부분송파에 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조된 심볼을 매핑하고, 제안된 방식에서는 DFT 전 단에서 16개에 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 심볼과 16개의 zero-padding 구간을 삽입하여 DFT 변조 후 32개의 부분송파에 매핑한다. 실험은 일반적인 OFDMA 방식과 제안된

방식에서 각각 타이밍 오차가 없는 경우, 타이밍 오차가 존재하는 경우에 대해 이루어진다. 실험에서 사용한 변수는 표 1과 같다.

표 1. 실험 변수

Parameter	Value
FFT Size	1024
Cyclic Prefix	64
Subcarriers Used	32
Zero-Padding Length	16
Subcarrier Mapping	Localized
Windowing	Not applied
Modulation	BPSK, QPSK
Channel	ITU-R Pedestrian A
Timing Offset	512

BER 성능을 확인하기 전에 먼저 제안하는 OFDMA 신호의 시간축 특성을 살펴보았다. 그림 8은 윈도잉을 적용하지 않았을 때의 시간축 신호 크기로 zero-padding 구간에서 보간된 값이 0에 근사한 것을 볼 수 있다. 그림 9는 7 개의 부반송파를 추가적으로 사용하여 윈도잉을 적용하였을 때의 신호 크기로, 윈도잉을 사용하지 않은 경우와 비교할 때 보간된 중간값들도 0에 근사한 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 윈도잉을 적용하면 식 (13)을 보다 근사하게 만족시킬 수 있으나 부반송파의 낭비가 있다.

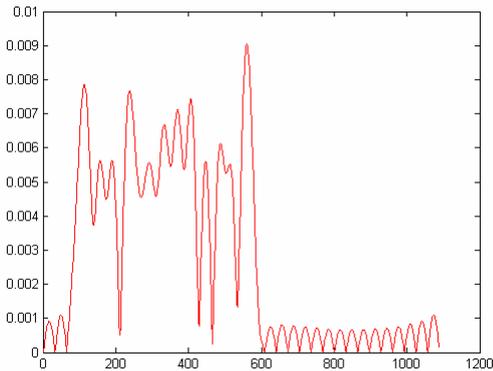


그림 8. Zero-Padding된 OFDMA 심벌의 시간축 신호 크기 (윈도잉 적용 안 하였을 때)

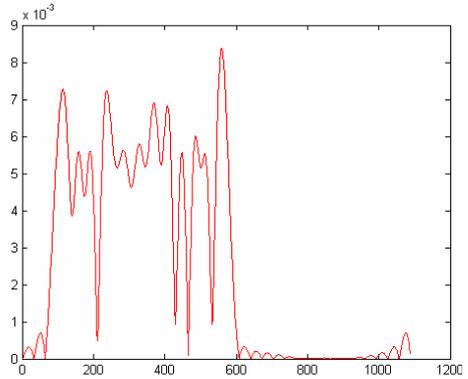


그림 9. Zero-Padding된 OFDMA 심벌의 시간축 신호 크기 (윈도잉 적용하였을 때)

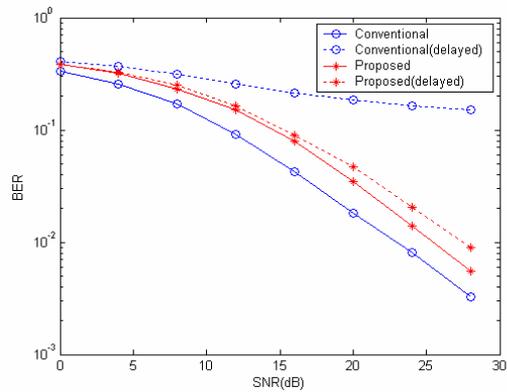


그림 10. 타이밍 오차에 의한 BER 성능

그림 10은 랜덤 액세스를 하는 경우 타이밍 오차에 의한 영향을 살펴본 것이다. 일반적인 전송 방식은 BPSK 변조 방식을 사용하고, 제안된 방식은 QPSK 변조 방식을 사용하였으므로 타이밍 오차가 없는 경우 두 전송방식의 BER 성능은 3dB가 차이가 발생한다. 큰 타이밍 오차가 존재하는 경우 일반적인 전송 방식은 성능 열화가 심각하게 발생하지만 zero-padding 구간을 가지는 제안된 방식은 성능 열화를 피할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결론

단말이 빈번한 주기적인 레인징 동작을 하지 않게 하기 위해서는 상향링크 OFDMA 시스템에서 랜덤 액세스를 할 때 타이밍 오차에 강건하도록 신호가 만들어져야 한다. 타이밍 제어 및 전력 제어가 장기간 동안 이루어지지 않았을 경우 타이밍 오차

