

옥내 환경에서 무선 전송을 위한 동기식 디지털 이중화 방식

정회원 박 창 환*, 고 요 한*, 박 경 원**, 전 원 기**, 백 종 호**, 이 석 필***,
종신회원 조 용 수*

A Synchronous Digital Duplexing Technique for Wireless Transmission in Indoor Environments

Chang Hwan Park*, Yo Han Ko*, Kyung Won Park**, Won Gi Jeon**, Jong Ho Paik**,
Seok Pil Lee*** *Regular Members*, Yong Soo Cho* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 무선 전송 시스템에서 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식을 사용하여 상향링크 신호와 하향링크 신호를 동시에 전송하면서 자원의 효율을 높이고 자원 할당의 유연성을 향상시킬 수 있는 디지털 이중화 방식으로 SDD(Synchronous Digital Duplexing) 방식을 제안한다. SDD 방식은 상·하향링크 신호를 동시에 송·수신하기 위해 상호 레인지(mutual ranging) 과정을 통하여 AP(access point)와 각 SS(subscriber station), SS와 다른 SS 사이의 상호 시간 동기 정보와 상호 채널 정보를 획득한다. 획득한 정보는 전송시간 선택 및 CS 삽입 여부 판단, CS 길이 설정, FFT 구간 재설정 등에 이용된다. 제안된 SDD 방식이 무선채널에서 사용되는 기존의 이중화 방식인 TDD(Time Division Duplexing), FDD(Frequency Division Duplexing)와 비교하여 옥내 환경에서 적합한 이중화 방식임을 확인한다.

Key Words : SDD, OFDM, TDD, FDD, Zipper, 상호 레인지

ABSTRACT

In this paper, we propose a new digital duplexing scheme, called SDD(Synchronous Digital Duplexing), which can increase data efficiency and flexibility of resource by transmitting uplink signal and downlink signal simultaneously. In order to transmit uplink data and downlink data simultaneously, the proposed SDD obtains mutual informations between AP(access point) and each SSS(subscriber station), SS and other SSSs by mutual ranging procedure. These informations are used for selection of transmission time, decision of CS insertion, setting of CS length, and FFT duration resetting, etc. It is shown that the proposed SDD is appropriate for duplexing scheme in indoor environments over the conventional TDD(Time Division Duplexing) and FDD(Frequency Division Duplexing).

※ 본 연구는 KETI와 한국과학재단(R01-2008-000-10406-0) 지원으로 이루어졌습니다.

* School of Electrical & Electronic Engineering, Chung-Ang University, KOREA(yscho@cau.ac.kr)

** Advanced Mobile Technology Research Center, Korea Electronics Technology Institute, KOREA

*** Broadcasting · Communication Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute, KOREA

논문번호 : KICS2008-01-026, 접수일자 : 2008년 01월 14일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 15일

I. 서 론

현재 통신시스템의 이중화(duplexing) 방식으로 FDD(Frequency Division Duplexing), TDD(Time Division Duplexing), Zipper 방식 등이 있다. FDD 방식은 이중화 지연(duplexing delay)이 작고 상·하향링크의 순시적인 채널 변화에 쉽게 적응할 수 있어 고속 이동하는 단말에 적합하지만, 보호대역(guard band)을 필요로 하며 상·하향링크 주파수 대역의 크기가 미리 정해지기 때문에 유연성이 낮고 별도의 상·하향 RF 부가 필요하다는 단점이 있다. TDD 방식은 상·하향링크의 비대칭적인 자원할당은 가능하지만, TTG(Transmit/Receive Transition Gap)와 RTG(Receive/Transmit Transition Gap)를 필요로 하며 전파지연 등에 의해 커버 영역이 감소하며 고속의 이동속도를 지원하기 어렵다는 단점이 있다[1]. 이와 달리 유선 통신의 VDSL 시스템에 사용되는 Zipper 방식은 보호대역을 필요로 하지 않으며, 디지털 이중화(digital duplexing) 방식으로 상·하향링크의 자원을 반송파 단위로 할당하여 비대칭적인 자원할당이 가능하다. 그러나 Zipper 방식에서는 상·하향링크간 직교성(orthogonality)을 유지하기 위하여 추가적인 보호구간 CS(Cyclic Suffix)를 사용하여 NEXT(Near End CrossTalk)와 FEXT(Far End CrossTalk)를 극복한다[2][3]. 디지털 이중화 방식으로 ODD(Orthogonal Division Duplexing)와 OFDD(Orthogonal Frequency Division Duplexing) 방식이 최근에 연구 중이며, 이들은 Zipper와 유사한 이중화 방식으로 효율적인 상·하향링크 자원 할당과 짧은 이중화 지연(duplexing delay)으로 보다 정확한 AMC(Adaptive Modulation and Coding)를 가능하게 하여 주파수 효율을 증가시킨다^{[4][5]}. 그러나 이와 같이 OFDM 심볼내에서 상·하향링크의 송·수신이 동시에 이루어지는 경우, 다중 사용자의 상·하향링크 신호 사이에 수신 시간차에 따른 심각한 간섭이 발생하여 수신 기법만으로는 극복하기 힘들다.

본 논문에서는 이들 이중화 방식의 단점을 극복하기 위하여 SDD(Synchronous Digital Duplexing) 방식을 제안한다. 유선 통신에 사용되는 Zipper 방식에서는 서로 다른 사용자의 송신신호가 RFI(Radio Frequency Interference) 형태로 간섭을 야기하기 때문에 다른 사용자의 송신신호를 제어할 수 없어 최대 길이의 CS를 사용하여 직교성을 유지한다. 무선 통신에서 사용될 SDD 방식에서는 다른 사용자가 송신한 신호를 수신한 후 분석을 통하여 송신신호의 정보를

획득할 수 있기 때문에 전송시간 선택 및 CS 삽입 여부 판단, CS 길이 설정, FFT 구간 재설정 등을 통해 간섭없이 데이터 검출이 가능하다. 제안하는 SDD 방식은 다중 사용자간 시간 동기화를 위하여 상호 레인징 과정을 필요로 하는데, 이는 적은 수의 사용자가 존재하며 각 사용자의 이동성이 크지 않고 새로운 사용자의 유입이 빈번하지 않은 옥내 환경에 효율적으로 적용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 이중화 방식인 TDD와 FDD, VDSL에서 사용되는 Zipper 방식에 대하여 장·단점을 살펴본다. III장에서는 본 논문에서 제안하는 SDD 방식을 설명한다. 또한 SDD 방식을 적용하기 위해 필요한 상호 레인징 절차, 전송시간 설정, 최적의 CS를 삽입하기 위한 절차, FFT 구간 재설정 방법 등을 설명한다. IV장에서는 SDD와 무선에서 사용되는 기존의 이중화 방식들에 대한 자원 효율을 비교한다. V장에서는 모의실험을 통해 제안된 SDD 방식의 성능을 검증하며, VI장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 기존의 이중화 방식

현재 통신 시스템에서 가장 많이 사용되고 있는 전형적인 이중화 방식으로는 FDD와 TDD, 유선 통신 VDSL에서 사용되는 Zipper 방식 등이 있다.

그림 1에 도시한 FDD 방식은 서로 다른 두 개의 주파수 대역을 사용하여 상·하향링크 신호가 동시에 송·수신되는 이중화 방식이다. FDD 방식은 이중화 지연이 없고, 보호 대역의 할당으로 인접 대역 간 간섭에 강건하다. 그러나 자원 할당이 유연하지 못하고, 두 개의 오실레이터(oscillator)와 정교한 RF 필터(RF filter), 듀플렉서(duplexer) 등의 사용으로 하드웨어 비용이 커진다는 단점이 있다. 또한 할당된 보호대역 만큼 자원 효율이 감소되는 단점이 있다. 그림 1에 도시한 FDD 방식의 주파수 영역 자원 할당과 심볼 구조로부터 한 프레임 내의 자원량(the

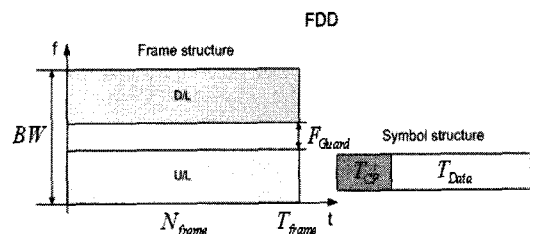


그림 1. FDD 방식의 프레임 및 심볼 구조

amount of resource)은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{FDD} = (BW - F_{Guard})(T_{frame} - N_{Sym} T_{CP}) \quad (1)$$

여기서 C_{FDD} 는 FDD 방식의 자원량을 나타내며, BW 는 사용하는 전체 대역, F_{Guard} 는 보호 대역, T_{frame} 은 한 프레임의 길이, N_{Sym} 은 한 프레임에서의 OFDM 심볼수, T_{CP} 는 CP(cyclic prefix) 길이를 나타낸다.

그림 2에 도시한 TDD 방식은 동일한 주파수 대역에서 서로 다른 시간에 상·하향링크 신호를 송수신하는 방식이다. 상·하향링크 신호 전송이 동일한 대역으로 이루어지기 때문에 상향링크 과정에서 추정된 채널정보를 하향링크 신호 전송에 이용하거나 하향링크 과정에서 추정된 채널정보를 상향링크 신호 전송에 이용할 수 있다. 또한 상·하향링크 전송을 OFDM 심볼 단위로 조절할 수 있기 때문에 비대칭적 전송이 가능하며, 전체 주파수 대역에 걸쳐 전송이 이루어지기 때문에 OFDM 방식 전송시 적절한 부채널 할당에 의하여 주파수 다이버시티(frequency diversity) 이득을 얻을 수 있다. 그리고 오실레이터 등의 하드웨어를 상향링크와 하향링크에서 공유할 수 있고 튜블렉서 등도 사용되지 않기 때문에 FDD 방식에 비해 비용 절감이 가능하다. 하지만 TDD 방식은 프레임 동기가 일치하지 않을 경우 상·하향링크 간 간섭이 발생하는 단점이 있다. 또한 상·하향링크가 반복되는 주기인 프레임의 길이가 길어지면 상향링크와 하향링크 사이에 긴 이중화 지연이 발생한다. 이러한 이중화 지연은 MAC(Medium Access Control)과 ARQ(Automatic Repeat reQuest)의 전송 지연에 영향을 준다. 또한 이중화 지연은 상·하향링크 간 채널의 시변효과를 초래하여 상향링크에서 추정된 채널정보를 하향링크 신호 전송에 이용하거나 하향링크에서 추정된 채널정보를 상향링크 신호 전송에 이용하는 경우에 성능열화가 발생한다. 그림 2에 도시한 TDD 방식의 주파수 영역 자원 할당과 심볼 구조로부터 한 프레임 내의 자원량은 다음과

같이 주어진다.

$$C_{TDD} = BW(T_{frame} - (N_{Sym} T_{CP}) - T_{TTG} - T_{RTG}) \quad (2)$$

여기서 C_{TDD} 는 TDD 방식에서 한 프레임 내의 전체 자원량이고, T_{TTG} 와 T_{RTG} 는 상·하향링크 사이에 보호 시간을 나타낸다. 이와 같이 TDD 방식에서 한 프레임 내의 전체 자원량은 보호 시간에 반비례하기 때문에, 앞서 설명한 이중화 지연과 trade-off 관계에 있다.

그림 3에 도시한 Zipper 방식은 VDSL에 사용되는 이중화 방식으로서 FDD 방식에서와 같이 상·하향링크 신호의 전송이 동시에 이루어지나, FDD와 달리 두 개의 고정된 RF chain을 사용하지 않고 기저대역(baseband)에서 디지털적으로 이중화하는 방식이다. 또한 Zipper 방식은 FDD 방식에서와 같이 이중화 지연이 짧으면서, FDD와 달리 상·하향링크 자원 할당이 부반송파 단위로 이루어져 자원 할당의 유연성이 더 높다. Zipper 방식의 경우 상·하향링크 신호의 송수신이 하나의 OFDM 심볼 내에서 이루어지고 다중 사용자의 자원이 적교 할당되지 않기 때문에 NEXT와 FEXT가 발생한다. 이를 제거하기 위해 OFDM 심볼에 추가적인 보호 구간으로 CS를 삽입하고, Pulse Shaping, Windowing 등을 사용하여 ISI와 ICI로 인한 성능열화를 극복한다. 하지만 Zipper 방식에서는 CS의 사용으로 자원 효율이 저하되는 단점이 있다. 하드웨어 측면에서도 2개의 FFT를 사용하기 때문에 TDD 방식과 비교하여 비용이 증가하는 단점이 있다. 그림 3에 도시한 Zipper 방식의 주파수 영역 자원 할당과 심볼 구조로부터 한 프레임 내의 자원량은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{Zipper} = BW(T_{frame} - N_{Sym}(T_{CP} + T_{CS})) \quad (3)$$

여기서 C_{Zipper} 는 Zipper 방식에서 한 프레임 내의 전체 자원량을 나타내며, T_{CS} 는 CS의 길이를 나타낸다.

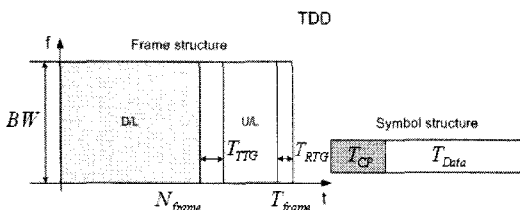


그림 2. TDD 방식의 프레임 및 심볼 구조

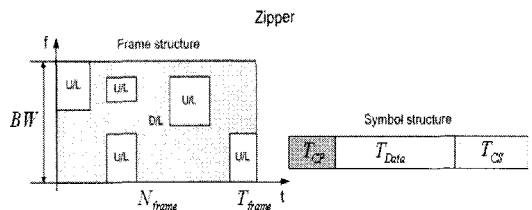


그림 3. Zipper 방식의 프레임 및 심볼 구조

Ⅲ. 제안된 SDD 방식

그림 4는 본 논문에서 제안하는 SDD 방식의 주파수 영역과 시간 영역에서의 심볼 구조를 나타낸다. 주파수 영역에서는 OFDMA를 사용하여 AP의 하향링크 신호와 SS의 상향링크 신호를 부반송파 단위로 할당한다. 그리고 시간영역에서는 CP와 데이터로 시간 영역 심볼을 구성한다. 채널 지연 및 상호 시간 지연으로 ISI와 ICI가 발생하는 경우에는 CP, 데이터, CS로 시간영역 심볼을 구성한다.

그림 5는 SDD 방식의 순서도를 나타낸다. 그림 5에 나타낸 바와 같이, SDD 방식에서 초기 동기화 과정은 기존 방식에서의 마찬가지로 프레임 검출과 시간 동기화, 주파수 동기화로 구성된다. 초기 동기화 과정에서는 프리앰블(preamble)이나 훈련 심볼(training symbol)을 전송하여 자기 상관(auto-correlation), 또는 상호 상관(cross-correlation)을 이용하여 각 SS에서 하향링크 프레임 검출을 수행하고, 하향링크 시간 동기화 및 주파수 동기화를 수행한다. 초기 레인징 과정은 초기 동기화 과정이 완료된 후 수행되며 이 과정을 통해 AP와 SS간 상향링크 시간 동기화 및 주파수 동기화를 수행하여 AP와 각 SS간의 시간 동기 정보 및 채널 정보를 추정한다. 초기 레인징 과정에서는 CP와 레인징 코드로 이루어진 OFDM 심볼에 CS를 삽입하여 초기 레인징 심볼로 사용할 수 있고, CP와 레인징 코드, 레인징 코드와 CS로 이루어진 연속된 2개의 OFDM 심볼을 사용하여 초기 레인징 심볼[6]로 사용할 수도 있다.

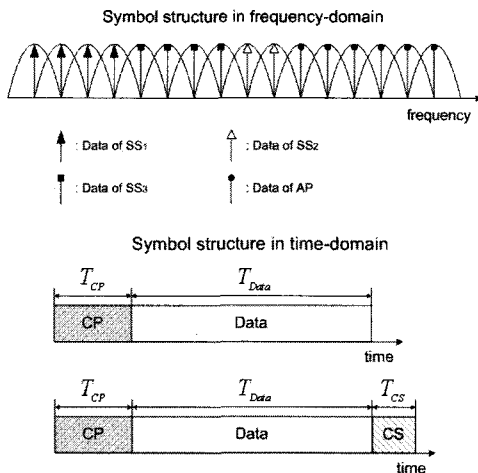


그림 4. SDD 방식의 주파수 영역과 시간 영역에서의 심볼 구조

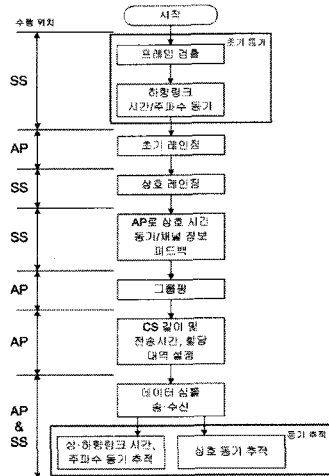


그림 5. SDD 방식의 순서도

제안하는 상호 레인징 과정은 위와 같은 기존의 초기 레인징 과정이 완료된 후 수행된다. 상호 레인징 과정에서는 각 SS가 다른 SS와 시간 동기 정보를 획득하지 않은 시점에서 SS간에 이루어지기 때문에 초기 레인징과 같은 방법으로 상호 레인징 심볼이 구성된다. 그리고 상호 레인징 과정에서는 SS의 상호 레인징 심볼을 구분하기 위해 각각의 SS를 시간으로 구분하여 상호 레인징 심볼을 전송하는 방식, 각각의 SS를 주파수로 구분하여 상호 레인징 심볼을 전송하는 방식, 각각의 SS를 위상으로 구분하여 상호 레인징 심볼을 전송하는 방식, 각각의 SS를 코드로 구분하여 상호 레인징 심볼을 전송하는 방식 등을 사용할 수 있다. 상호 레인징 과정에서 추정된 상호 시간 동기 정보와 각 링크간의 채널 정보는 AP로 피드백된다. AP는 모든 SS로부터 획득한 상호 시간 동기 정보와 각 링크간의 채널 정보를 이용하여 자원 효율을 최대화하고 시스템 전체 수율을 최대화하기 위해 전송시간 설정 및 CS 삽입여부 판단, CS 길이 설정, FFT 구간 재설정 등을 한다.

3.1 상호 레인징 기법

그림 6은 SDD 방식에서의 상호 레인징 심볼의 예를 나타낸다. 그림 6에 나타낸 바와 같이, 상호 레인징 심볼은 AP와 모든 SS사이에서 발생할 수 있는 지연시간 차에 따른 ISI와 ICI를 방지할 수 있도록 구성되어야 한다. 상호 레인징 심볼은 각 SS에서 서로 다른 SS간의 지연시간 및 채널 추정에 사용되는 데, 이때 추정된 상호 지연시간 및 상호 채널은 모든 SS에 대하여 독립적이므로 상호 레인징 심볼의 구성은 각 SS를 구분할 수 있도록 구성되어야 한다.

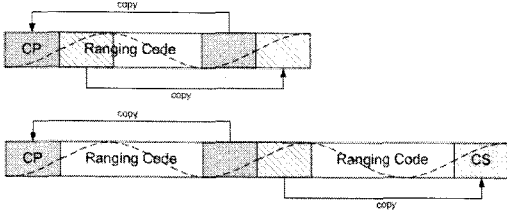


그림 6. SDD 방식의 순서도

각각의 상호 레인징 심볼에 동일한 코드 $C(k)$ 를 사용하여 BPSK 변조하고, 각 SS를 구분하기 위해 주파수 영역 신호를 고유 위상으로 위상 회전을 시킨 레인징 심볼은 주파수 영역과 시간 영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$X_i(k) = C(k)e^{-j2\pi \frac{m(i-1)}{N}k}, \quad (4)$$

where $k \in [0, \dots, N-1], i \in [1, \dots, N_{ss}]$

$$x_i(n) = c(n - m(i-1)) \quad (5)$$

여기서 N_{ss} 는 SS의 개수를 나타내고, i 는 SS의 번호를 나타내며, m 은 각 SS간의 위상 차이 인덱스를 나타낸다. 이때 m 은 왕복지연시간(round trip delay)과 채널의 최대 지연 $\tau_{Channel}$ 보다 커야한다 ($m > 2RTD + \tau_{Channel}$). 위상 회전이 이루어진 주파수 영역 신호의 IFFT 이후 시간 영역 신호 $x_i(n)$ 은 $c(n)$ 이 $m(i-1)$ 만큼 환형 이동된 신호와 같다.

각 SS에서 송신한 상호 레인징 심볼은 다음 수식과 같이 서로 다른 채널을 경험하고 다른 SS에 수신된다.

$$y_j(n) = \sum_{i=1}^{N_{ss}} x_i(n - T_{i,j}) \otimes h_{i,j}(n) + w_j(n), \text{ for } i \neq j \quad (6)$$

여기서 $y_j(n)$ 와 $w_j(n)$ 은 j 번째 SS에 수신된 시간영역 신호와 AWGN을 나타내고, \otimes 은 컨볼루션을 나타낸다. $h_{i,j}(n)$ 과 $T_{i,j}$ 는 i 번째 SS와 j 번째 SS사이의 채널 임펄스 응답과 지연시간을 나타낸다. 수신신호의 주파수영역 표현은 다음과 같다.

$$Y_j(k) = \sum_{i=1}^{N_{ss}} X_i(k)H_{i,j}(k)e^{-j2\pi \frac{T_{i,j}k}{N}} + W_j(k), \text{ for } i \neq j \quad (7)$$

수신신호로부터 상호 시간 동기 정보와 각 링크간의 채널 정보를 얻기 위하여 다음과 같이 송신 신호 $C(k)$ 로 나누면 각 SS에 대한 주파수 영역 채널 정보를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{H}_j(k) &= Y_j(k)/C(k) \\ &= \sum_{i=1}^{N_{ss}} H_{i,j}(k)e^{-j2\pi \frac{(m(i-1) + T_{i,j})k}{N}} + W_j(k)/C(k) \\ &= \sum_{i=1}^{N_{ss}} H_{i,j}(k)e^{-j2\pi \frac{(m(i-1) + T_{i,j})k}{N}} + \bar{W}_j(k), \text{ for } i \neq j \end{aligned} \quad (8)$$

식 4에 주어진 바와 같이 각 SS에 서로 다른 위상 $e^{-j2\pi m(i-1)k/N}$ 를 곱하여 전송하였기 때문에 $\hat{H}_j(k)$ 를 IFFT를 취하게 되면 시간 영역에서 각 신호의 채널응답에 $m(i-1)$ 와 $T_{i,j}$ 의 합 만큼의 지연이 다음 수식과 같이 발생된다.

$$\hat{h}_j(n) = \sum_{i=0}^{N_{ss}} h_{i,j}(n - (m(i-1) + T_{i,j})) + \tilde{w}_j(n), \text{ for } i \neq j(9)$$

이때 각 SS는 서로 다른 SS의 고유 위상회전에 해당하는 환형 이동을 알고 있기 때문에, 추정된 채널 응답 $\hat{h}_j(n)$ 으로부터 $m(i-1)$ 을 제외한 환형 이동을 탐색하여 상호 지연시간을 추정할 수 있다.

3.2 SDD 방식에서 AP와 각 SS의 OFDM 심볼 전송시간

SDD 방식은 AP와 각 SS의 OFDMA 심볼 전송 시간에 따라 Scheme 1과 Scheme 2, Scheme 3(Scheme 3-1, Scheme 3-2)로 구분된다. 그림 7은 SDD 전송시간을 설명하기 위한 예로써 반경 R인 셀 내에서 한 개의 AP와 세 개의 SS가 존재하는 간단한 실내 환경을 나타낸다.

그림 8은 그림 7의 셀 내 환경에서 Scheme 1 전송시간 사용시 AP와 각 SS의 송·수신 시간을 나타낸다. 본 절에서 기술하는 Scheme에서는 모두 채널

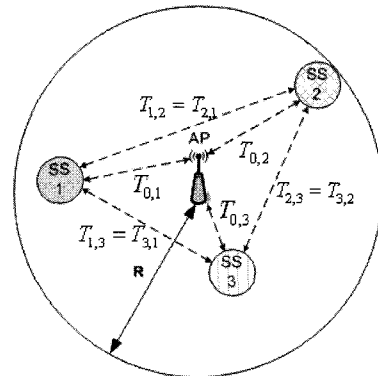


그림 7. 반경 R인 셀 내에서 하나의 AP와 세 개의 SS가 존재하는 실내 환경

임펄스 응답 길이는 CP 길이와 동일하다고 가정하였고, 모든 심볼에 최대 상호 지연 시간 차이만큼의 CS를 삽입하였다. 그리고 AP의 인덱스는 아래첨자를 0으로 표현하였다. 그림 8에 나타낸 바와 같이, Scheme 1은 각 SS에서 AP로부터 거리에 따른 시간 차이만큼 절대기준시간에서 앞당겨 송신하는 방식으로 모든 상향링크 데이터 심볼은 동일한 시간에 AP에 수신되고, AP의 하향링크 심볼은 다른 SS의 상향링크 심볼보다 항상 늦게 각 SS에 수신된다. 셀 반경을 $R(m)$ 이라고 하였을 때, Scheme 1에서 발생할 수 있는 지연시간 차이는 최소 0에서 최대 $2T$ ($T = R \times 3.3ns$)이다.

그림 9는 그림 7의 셀 환경에서 Scheme 2 전송 시간 사용시 AP와 각 SS의 송·수신 시간을 나타낸다. 그림 9에 나타낸 바와 같이, Scheme 2는 각 SS가 AP의 신호를 수신한 시간에 동기를 맞추어 상향링크 심볼을 송신하는 방식이다. 이때, AP에 수신되는 SS의 상향링크 신호는 AP와 SS 사이에 발생하는 전파지연 시간의 두 배에 해당하는 시간 차이를 발생시키고, 각 SS는 AP의 하향링크 신호가 다른 SS의 상향링크 신호보다 항상 빨리 수신된다. Scheme 2에서 발생할 수 있는 지연 시간 차이는 최소 0에서 최대 $4T$ 이다.

그림 10은 그림 7의 셀 환경에서 Scheme 3 전송 시간 사용시 AP와 각 SS의 송·수신 시간을 나타낸다. 그림 10에 나타낸 바와 같이, Scheme 3은 AP와 각 SS에서의 최대 지연시간 차이를 고려하여, AP와 각 SS에서의 최대 지연시간을 최소로 하도록 가변적으로 전송시간을 변화하여 송신하는 방식이다.

Scheme 3은 최대 지연시간 차이를 최소로 하기 위한 방식에 따라 Scheme 3-1과 Scheme 3-2로 나눌 수 있다.

Scheme 3-1은 모든 가능한 전송시간을 고려하여 셀 내에 존재하는 AP와 각 SS에서 발생하는 최대 지연시간 차이를 최소로 하는 전송시간을 찾는 방법이다. Scheme 3-1은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T^{TA} = \underset{\vec{T}}{\operatorname{argmin}} \{f(\vec{T})\}, \quad (10)$$

$$\text{where } T^{TA} = [T_0^{TA}, \dots, T_{N_{SS}}^{TA}], \vec{T} = [\vec{T}_0, \dots, \vec{T}_{N_{SS}}]$$

여기서 T^{TA} 는 Scheme 3-1에서의 추정된 전송시간을 나타내는 벡터이고, $f(\vec{T})$ 는 \vec{T} 의 시간만큼 앞당겨 전송하였을 때 AP와 각각의 SS에서 발생하는 최대 지연시간 차를 나타내는 함수이다. 그리고 T_i^{TA} 은

추정된 AP 혹은 SS에서의 전송시간, \vec{T}_i 는 임의의 전송시간을 나타낸다. Scheme 3-1은 임의의 전송시간으로 구성된 벡터 \vec{T} 의 값을 변화시키면서 AP와 각 SS에서 발생하는 최대 지연시간 차를 나타내는 함수 $f(\cdot)$ 를 최소로 하는 전송시간을 찾는 방법이다. Scheme 3-1의 계산 복잡도는 SS의 개수가 N_{SS} 일 때, 각 \vec{T} 벡터마다 $(N_{SS}+1)!$ 만큼의 계산횟수가 필요하다. 즉, Scheme 3-1은 \vec{T} 벡터와 SS의 개수가 증가하면 복잡도는 크게 증가한다.

Scheme 3-2는 셀 내에 존재하는 AP와 각 SS에서 수신되는 AP와 각 SS신호의 최대 지연시간을 고려하여 이를 최소화 하는 전송시간을 찾는 방법으로 각 SS의 전송시간을 독립적으로 찾는 방법이다. Scheme 3-2는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i^{TA} = T_{0,j} - (T_i^{\max} + T_i^{\min})/2, \quad (11)$$

$$\text{where } T_i^{\max} = (T_{i,j} - T_{0,j})_{\max},$$

$$T_i^{\min} = (T_{i,k} - T_{0,k})_{\min},$$

$$i, j, k \in \{1, \dots, N_{SS}\}, i \neq j, i \neq k$$

여기서 T_i^{TA} 는 Scheme 3-2 방법에 의해 추정된 i 번째 SS에서의 전송시간 값을 나타내고, $T_{0,j}$ 는 AP와 j 번째 SS 사이의 지연시간 값, $T_{i,j}$ 는 i 번째 SS와 j 번째 SS사이의 지연시간 값을 나타낸다. T_i^{\max} 는 Scheme 1 방식 적용시 i 번째 SS에서 다른 SS로 신호를 송신하였을 때 다른 SS에서 수신되는 AP 신호와의 지연시간차 중 가장 큰 값을 나타내고, T_i^{\min} 는 Scheme 1 방식 적용시 i 번째 SS에서 다른 SS로 신호를 송신하였을 때 다른 SS에서 수신되는 AP 신호와의 지연시간차 중 가장 작은 값을 나타낸다. Scheme 1의 전송 방식에서 모든 SS의 신호가 항상 AP의 신호보다 먼저 수신되기 때문에 각 SS의 전송시간을 $(T_i^{\max} + T_i^{\min})/2$ 만큼 늦춤으로써 AP와 각 SS에서 발생하는 최대 지연시간차를 줄일 수 있다. 셀 반경을 R 이라고 하였을 때, Scheme 3에서 발생할 수 있는 지연 시간 차이는 최소 0에서 최대 $2T$ 이다.

3.3 CS 삽입 여부 판단 및 CS 길이 설정

SDD 방식은 OFDMA를 사용하여 상·하향링크 신호를 동시에 전송하는 방법으로, 각 수신신호 사이의 상호 시간 차이로 인해 ISI와 ICI가 발생할 수 있다. 하지만 SDD 방식에서 상호 시간 차이가 발생하더라도 ISI와 ICI가 발생하지 않는 경우가 존재한다

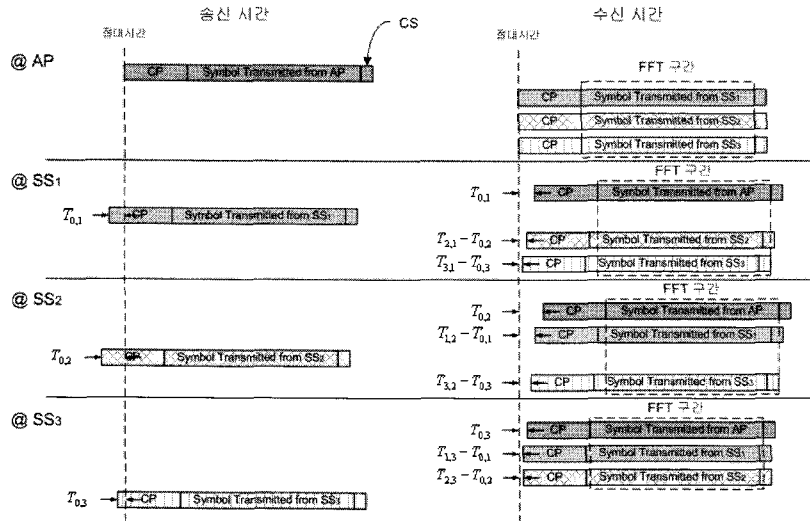


그림 8. SDD Scheme 1 전송시간 사용시 AP와 각 SS에서의 송신 시간과 수신 시간

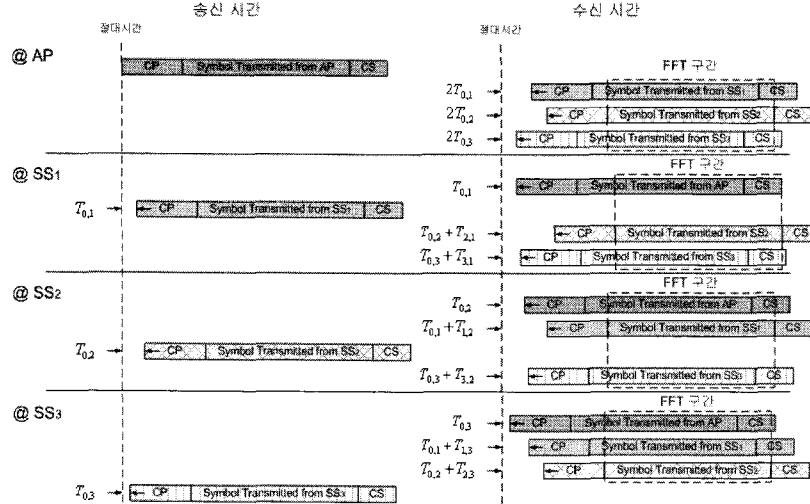


그림 9. SDD Scheme 2 전송시간 사용시 AP와 각 SS에서의 송신 시간과 수신 시간

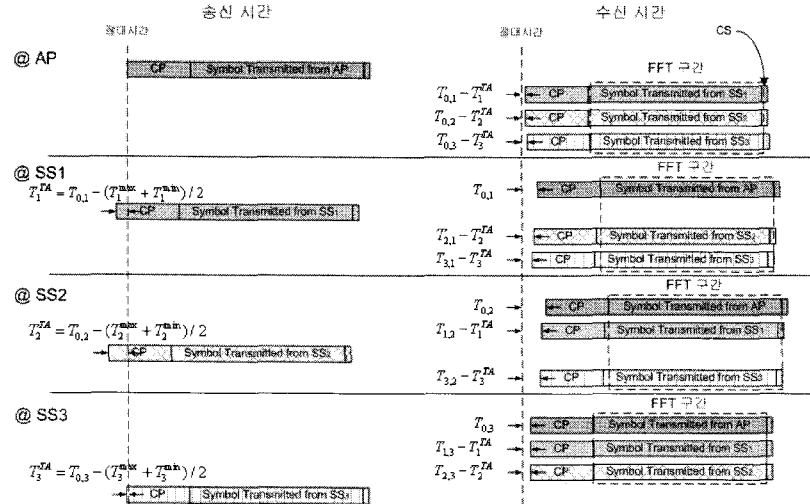


그림 10. SDD Scheme 3 전송시간 사용시 AP와 각 SS에서의 송신 시간과 수신 시간

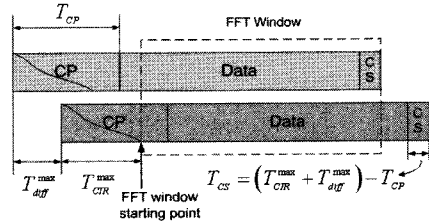
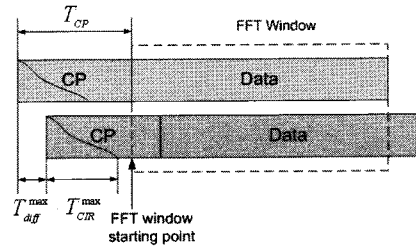
다. 이러한 경우에는 CS를 삽입하지 않아도 된다. 따라서 SDD 방식에서는 CS의 삽입 여부를 판단하는 기준이 필요하다. CS의 삽입 여부를 판단하는 기준은 Case 1과 Case 2의 두 가지로 구분하여 정의한다. 두 Case는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Case 1: } T_{CP} &\geq T_{CIR}^{\max} + T_{diff}^{\max} \\ \text{Case 2: } T_{CP} &< T_{CIR}^{\max} + T_{diff}^{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 T_{CP} 는 CP 길이를 나타내고, T_{CIR}^{\max} 은 셀 내의 AP와 SS, SS와 다른 SS사이의 채널 임펄스 응답 길이 중 길이가 가장 긴 값을 나타내며, T_{diff}^{\max} 는 셀 내 최대 상호 시간지연 차이를 나타낸다. Case 1의 경우 채널 지연으로 인해 발생하는 이전 심볼의 영향과 상호 시간 지연으로 인해 발생하는 다른 심볼의 영향이 CP 구간 내에 포함되기 때문에 CS 없이 OFDMA 심볼의 직교성을 유지할 수 있다. Case 2의 경우에는 채널 지연으로 인해 발생하는 이전 심볼의 영향과 상호 시간 지연으로 인해 발생하는 다른 심볼의 영향이 CP 구간 내에 포함되지 않기 때문에 OFDMA 심볼의 직교성을 유지하기 위해 $(T_{CIR}^{\max} + T_{diff}^{\max} - T_{CP})$ 만큼의 CS를 삽입해야 한다. 즉, Case 1의 경우에는 CS 길이가 0이기 때문에 AP와 각 SS는 CP와 데이터로 OFDMA 심볼을 구성하여 송수신 한다. Case 2의 경우에는 CS 길이가 $(T_{CIR}^{\max} + T_{diff}^{\max} - T_{CP})$ 가 되고, AP와 각 SS는 CP, 데이터, CS로 OFDMA 심볼을 구성하여 송수신 한다.

3.4 FFT 구간 재설정

SDD 방식에서 CS 삽입 여부 판단 및 CS 길이 설정 후에 ISI와 ICI의 영향없이 데이터 신호의 검출이 가능하다. 하지만 이를 위해서는 정확한 FFT 구간 재설정을 해야한다. FFT 구간 재설정은 식 (12)의 두 Case에 따라 구분된다. CS를 삽입하지 않은 식 (12)의 Case 1의 경우에 AP와 각 SS에서는 수신 신호 중에서 가장 먼저 들어온 신호의 데이터 시작 위치에 맞춰 FFT 윈도우 시작 위치를 설정한다. CS를 삽입해야하는 식 (12)의 Case 2의 경우에 AP와 각 SS의 FFT 윈도우 시작 위치는 수신된 신호중 가장 먼저 들어온 신호의 데이터 시작 위치에서 삽입한 CS 길이인 T_{CS} 길이만큼 늦춘 위치가 된다. AP와 각 SS는 FFT 구간 재설정이 이루어진 후에 FFT 윈도우 시작 위치에서 FFT를 취하면, ISI와 ICI의 간섭없이 데이터 신호의 복원이 가능하다.



(a) Case 1 (b) Case 2

그림 11. Case 1과 Case 2인 경우의 FFT 윈도우 시작 위치

IV. 각 이중화 방식의 자원 효율 비교

SDD 방식은 상·하향링크에서 동시 전송이 가능하기 때문에 이중화 지연이 없고, MAC과 ARQ 등의 제어정보 전송시 지연이 작기 때문에 효율적인 전력제어와 AMC 적용이 용이하다. 또한 자원 할당이 부반송파 단위로 이루어져 효율적인 자원 할당이 가능하며, 특히 비대칭 데이터 전송에 적합하다. 그리고 그림 4에서 나타낸 바와 같이 직교 자원 할당으로 상·하향 심볼 사이에 간섭이 존재하지 않는다. 또한 SDD 방식은 최적의 CS 길이를 설정하여 자원 효율을 감소로 최소화 할 수 있다. 또한 상호 레인징 심볼을 사용하기 때문에 자원 효율을 저하시킬 수 있지만 SDD 방식은 셀 반경이 작고 각 사용자의 이동성이 적은 옥내 환경을 고려하기 때문에 상호 레인징 과정이 긴 주기로 수행될 수 있다. 따라서 SDD 방식에서 상호 레인징 심볼에 의한 자원 효율 저하는 무시할 수 있다. 한 프레임 내에서 SDD 방식의 자원량은 식 (13)과 같이 표현된다. 여기서 C_{SDD} 는 한 프레임 내에서 SDD 방식의 전체 자원량을 나타내고, N_{sym} 은 한 프레임에서의 OFDMA 심볼수, T_{CP} 와 T_{CS} 는 각각 CP와 CS 길이를 나타낸다. C_M 은 상호 레인징 주기, T_M 은 상호 레인징 심볼의 시간을 나타낸다. 상호 레인징 심볼은 전체 프레임에서 첫 번째 프레임에만 존재하기 때문에, 상호 레인징 심볼 주기가 길 경우 상호 레인징 심볼에 의한 자원량 감소는 무시할 수 있다.

$$C_{SDD} = \frac{BW(M_M(T_{frame} - N_{Sym}(T_{CP} + T_{CS})) - T_M)}{M_M} \approx BW(T_{frame} - N_{Sym}(T_{CP} + T_{CS})), \quad (13)$$

where $M_M = C_M/T_{frame}$, $C_M \gg T_{frame}$, $C_M \gg T_M$

$$CE_{FDD} = \frac{C_{FDD}}{C_{Ideal}} = \frac{(BW - F_{Guard})(T_{frame} - N_{Sym}T_{CP})}{BW \times T_{frame}} = \frac{(20 - 3.75)(100 - 0.8(100/4))}{20 \times 100} = 0.65 \quad (14)$$

$$CE_{TDD} = \frac{C_{FDD}}{C_{Ideal}} = \frac{BW(T_{frame} - (N_{Sym}T_{CP}) - T_{TTG} - T_{RTG})}{BW \times T_{frame}} = \frac{20 \times (100 - (100/4)0.8 - 5.132 - 5)}{20 \times 100} = 0.7 \quad (15)$$

$$CE_{SDD} = \frac{C_{SDD}}{C_{Ideal}} \approx \frac{BW(T_{frame} - N_{Sym}(T_{CP} + T_{CS}))}{BW \times T_{frame}} = \frac{20 \times (100 - (100/4)(0.8 + 0))}{20 \times 100} = 0.8 \quad (16)$$

$$CE_{SDD} = \frac{C_{SDD}}{C_{Ideal}} \approx \frac{BW(T_{frame} - N_{Sym}(T_{CP} + T_{CS}))}{BW \times T_{frame}} = \frac{20 \times (100 - (100/4.132)(0.8 + 0.132))}{20 \times 100} = 0.77 \quad (17)$$

표 1. 이중화 방식의 자원 효율 비교를 위한 파라메타

Parameters	Value
셀 반경, SDD 전송시간	20 m, Scheme 1
대역(BW)/FFT size	20 MHz/64
보호 대역(guard band)	3.75 MHz
보호 구간 길이(CP)	0.8 us
OFDM 심볼 길이	3.2 us
프레임 길이, TTG/RTG	0.1 ms, 5us/5us
사용 부반송파(파일럿, DC 포함)	52

표 2. 모의실험 환경

Parameters	Value
셀 반경, SDD 전송시간	20 m, Scheme 1
대역(BW)/FFT size	20 MHz/64
보호 구간 길이(CP)	0.8 us
OFDM 심볼 길이	3.2 us
프레임 길이, TTG/RTG	0.1 ms, 5us/5us
반송파 주파수(fc), SS의 수	5 GHz, 3
사용 부반송파(파일럿, DC 포함)	52
$T_{1,2}=T_{2,1}$, $T_{1,3}=T_{3,1}$, $T_{2,3}=T_{3,2}$	3, 2, 2 samples

표 1은 FDD, TDD, SDD 방식들의 자원 효율을 비교하기 위하여 사용된 파라미터를 보여준다. 제안된 SDD 방식은 옥내 환경을 고려하기 때문에 실내 무선랜에 사용되는 IEEE 802.11a의 파라미터를 사용하였다. SDD 방식은 무선에서의 전송방식이기 때문에 유선에서 사용되는 이중화 방식인 Zipper의 자원 효율은 비교하지 않았다.

표 1의 파라미터를 이용하여 계산한 FDD, TDD, SDD 방식의 자원 효율은 식 (14)-(17)과 같다. CE_{FDD} , CE_{TDD} , CE_{SDD} 는 각각 FDD와 TDD, SDD 방식의 자원 효율을 나타낸다. 식 (16)은 식 (12)의 Case 1에 해당하는 경우 SDD 방식의 자원 효율을 나타낸다. 따라서 CS 길이는 0이 된다. 식 (17)은 식 (12)의 Case 2에 해당하는 경우 SDD 방식의 자원 효율을 나타낸다. 이때 CS 길이는 최대 지연 시간 차이($2T=0.132\mu s$)를 고려하여 설정하였다.

V. 모의실험

본 절에서는 본 논문에서 제안된 SDD 방식의 성능을

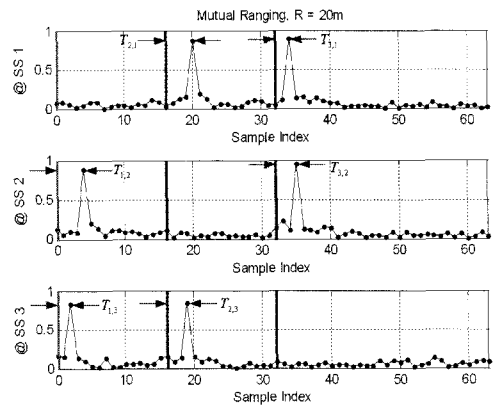
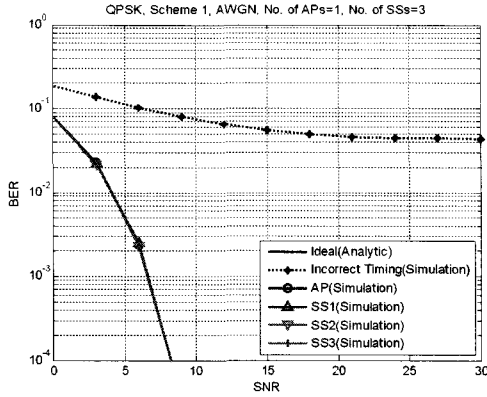


그림 12. SDD 방식에서 상호 시간 동기를 탐색하는 과정

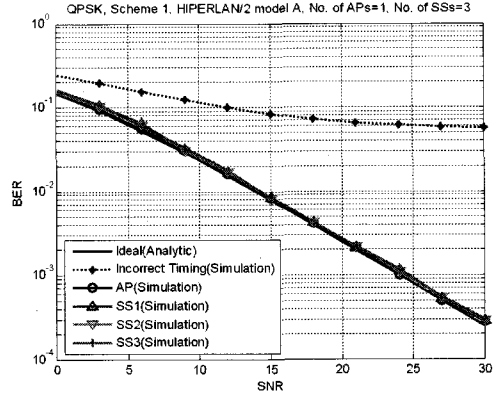
모의실험을 통하여 분석한다. 본 모의실험에서 사용한 AP와 각 SS의 배치구조는 그림 7과 같다. 표 2는 모의실험에 사용된 파라미터를 보여준다.

그림 12는 식 4의 상호 레인징 심볼을 이용하여 각 SS에서 다른 SS와의 상호 시간 동기를 탐색하는 과정을 보여준다. 각 SS에서 다른 SS와의 상호 지



(a) AWGN 채널

그림 13. SDD 방식의 BER 성능



(b) HIPERLAN/2 모델 A 채널

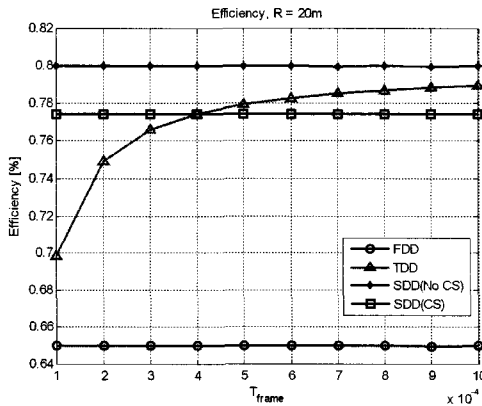


그림 14. 프레임 길이 변화에 따른 효율 변화

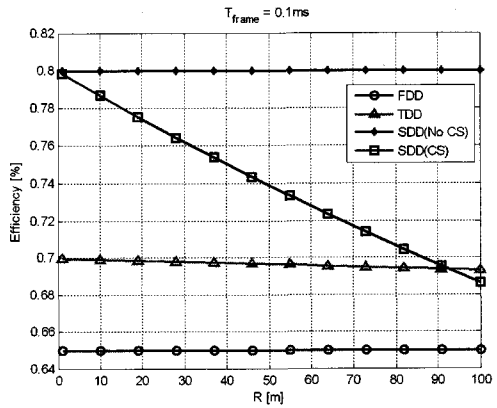


그림 15. 셀 반경 변화에 따른 효율 변화

연시간은 다른 SS의 고유 위상회전 정보에 따른 시간 영역 채널 임펄스 응답의 환형 이동에 대해(SS₁ = 0, SS₂ = 16, SS₃ = 32) 추가적으로 발생한 환형 이동을 추정함으로써 구할수 있다. 그림 12로부터 SS₁은 SS₂와의 지연시간을 3 샘플, SS₃와의 지연시간을 2 샘플로 추정하고, SS₂는 SS₁과의 지연시간을 3 샘플, SS₃와의 지연시간을 2 샘플로 추정하며, SS₃는 SS₁과의 지연시간을 2 샘플, SS₂와의 지연시간을 2 샘플로 추정함을 알 수 있다. 표 3에 주어진 지연시간과 비교하여 각 SS에서 다른 SS에 대한 지연시간을 정확히 추정하였음을 확인할 수 있다.

그림 13(a)와 13(b)는 각각 AWGN 채널 환경과 최대지연이 400nsec인 HIPERLAN/2 모델 A 채널 환경[8]에서 SDD 방식의 BER 성능을 보여준다. 그림 13에서 알 수 있듯이, 초기 레인징 이후에 각 SS에서 선택된 전송시간에 신호를 전송하나 FFT 시작점을 재설정하지 않고 한 심볼 내에서 상·하향링크

신호를 동시에 송·수신하는 경우에 BER 성능에서 오차마루(error floor)가 발생됨을 알 수 있다. 따라서 상호 레인징 과정에서 취득한 정보를 이용하여 각 SS에서 FFT 시작점을 정확히 재설정해야하고, 재설정된 FFT 시작점에서 신호를 검출하는 경우에는 이론적인 BER 성능과 일치함을 확인할 수 있다.

그림 14는 프레임 길이 변화에 따른 FDD, TDD, SDD 방식의 자원 효율 변화를 보여준다. 그림 14에서 알 수 있듯이, FDD 방식은 보호 대역이 고정적이기 때문에 프레임 길이가 변하여도 자원 효율 변화가 없고, TDD와 SDD 보다 자원 효율이 낮다. 하지만 TDD 방식은 프레임 길이가 변하게 되면 TTG와 RTG로 인한 자원 효율 감소의 비율이 작게되어 전체 자원 효율이 증가한다. SDD 방식은 CS의 사용 여부에 따라 자원 효율이 다르지만, 프레임 길이가 변하더라도 자원 효율 변화가 없다. 따라서 상호 시간 지연과 상호 채널 지연이 CP구간 내에 포함되

는 경우에는 CS를 사용하지 않아도 ISI와 ICI가 발생하지 않고, 이 경우의 자원 효율이 FDD와 TDD보다 높다. 하지만 CS를 사용하는 경우에는 프레임 길이가 증가함에 따라 TDD의 자원 효율보다 SDD의 자원 효율이 작아진다. 프레임 길이가 0.4ms보다 작은 경우에는 SDD 방식의 자원 효율이 높지만, 프레임 길이가 0.4ms보다 큰 경우에는 TDD 방식의 자원 효율이 높아진다. 하지만 TDD 방식은 프레임 길이가 길어지면 이중화 지연이 커지는 단점이 있다.

그림 15는 셀 반경 변화에 따른 FDD, TDD, SDD 방식의 자원 효율 변화를 보여준다. 그림 16에서 알 수 있듯이, FDD 방식은 셀 반경과 관계없이 자원 효율이 일정하고, TDD와 SDD 보다 자원 효율이 낮다. 하지만 TDD 방식은 셀 반경이 커지게 되면 round trip delay이 커지게 되어 TTG의 길이가 증가하여 자원 효율이 감소된다. SDD 방식은 CS의 사용 여부에 따라 자원 효율이 다르다. CS를 사용하지 않는 경우에는 셀 반경에 상관없이 자원 효율이 일정하지만, CS를 사용하는 경우에는 셀 반경이 증가하면 심볼의 직교성을 유지하기 위해 추가해야 하는 CS의 길이가 증가해 자원 효율이 감소한다. 셀 반경이 약 90m이하인 경우에는 SDD 방식의 자원 효율이 TDD 방식의 자원 효율보다 높지만, 셀 반경이 90m이상인 경우에는 TDD 방식의 자원 효율이 SDD 방식의 자원 효율보다 높아진다. 따라서 SDD 방식은 셀 반경이 작은 옥내 무선 환경에서 가장 높은 자원 효율을 갖는 것을 알 수 있다. 이때 자원 효율은 셀 반경과 채널 임펄스 응답 길이 등에 따라 변한다.

VI. 결 론

본 논문에서는 적은 수의 사용자가 존재하며 각 사용자의 이동성이 적은 옥내 환경에 적합한 OFDM 기반의 디지털 이중화 방식 SDD를 제안하였다. SDD 방식은 기존의 이중화 방식인 FDD와 비교하여 보호 대역을 사용하지 않으며, 상향링크와 하향링크 신호를 부반송과 단위로 자원 할당하여 FDD 방식에 비해 자원 할당이 유연하다는 장점이 있다. 또한 TDD에 비해 상·하향링크의 신호 전송이 동시에 이루어져 이중화 지연이 작고 추가적인 보호 시간이 사용되지 않는 장점이 있다. SDD 방식과 유선 시스템에서의 전송 방식인 Zipper와 비교하여도 최적의 보호 구간 CS를 사용하기 때문에 자원 효율이 높은 장점이 있다. SDD 방식은 상호 레인징 과정에서 각

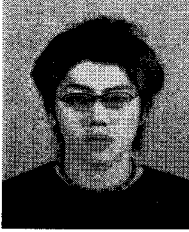
각의 SS가 서로 다른 SS와의 시간 동기 정보를 획득해야 하는 과정이 필요하므로 이동성이 크지 않거나 적은 수의 SS가 존재하는 옥내 환경에 적합하다. 모의실험을 통하여 분석함으로써 SDD 방식이 셀 반경이 작은 옥내 무선 환경에 적합한 이중화 방식임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] P. W. C. Chan, E. S. Lo, R. R. Wang, E. K. S. Au, V. K. N. Lau, R. S. Cheng, Ho Mow Wai, R. D. Murch, and K. B. Letaief, "The evolution path of 4G networks: FDD or TDD?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, pp. 42-50, Dec. 2006.
- [2] F. Sjöberg, R. Nilsson, M. Isaksson, P. Ödling, and P. O. Börjesson, "Asynchronous Zipper," *ICC'99*, vol. 1, pp. 231-235, Jun. 1999.
- [3] F. Sjöberg, M. Isaksson, R. Nilsson, P. Ödling, S. K. Wilson, and P. O. Börjesson, "Zipper: A Duplex Method for VDSL Based on DMT," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, Aug. 1999.
- [4] D. Steer, K. Teo and B. Kirkland, "Novel method for communications using orthogonal division duplexing of signals (ODD)," *VTC'2002*, vol. 1, pp. 381-385, Sept. 2002.
- [5] R. Kimura and S. Shimamoto, "An Orthogonal Frequency Division Duplex (OFDD) System Using an Analog Filter Bank," *WCNC'2007*, pp. 2275-2280, Mar. 2007.
- [6] IEEE Std. 802.16.e, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16*, Feb. 2006.
- [7] K. Zheng, G. Zeng, and W. Wang, "DFT-based Uplink Channel Estimation in MC-CDMA Systems," *ISSSTA'2004*, pp. 570-574, Aug. 2004.
- [8] J. Medbo and P. Schramm, "Channel models for HIPERLAN/2 in different indoor scenarios," EP BRAN 3ERI085B, ETSI, Sophia Antipolis, France, Mar. 1998.

박 창 환 (Chang Hwan Park)

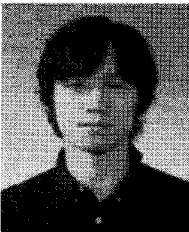
정회원



2005년 2월 중앙대학교 전자전
기공학부 졸업(학사)
2007년 2월 중앙대학교 전자전
기공학부 졸업(석사)
2007년 3월~현재 중앙대학교 전
자전기공학부 박사과정
<관심분야> 디지털 신호처리,
무 선모뎀, OFDM 모뎀 설계, MMR 시스템

고 요 한 (Yo Han Ko)

정회원



2005년 2월 중앙대학교 전자전
기공학부 졸업(학사)
2007년 2월 중앙대학교 전자전
기공학부 졸업(석사)
2007년 3월~현재 중앙대학교 전
자전기공학부 박사과정
<관심분야> 통신, OFDM, MIMO,
MMR

박 경 원 (Kyung Won Park)

정회원



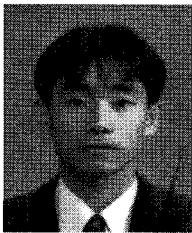
1999년 2월 중앙대학교 전기공
학과 공학사
2001년 2월 중앙대학교 전기공
학과 공학석사
2005년 2월 중앙대학교 전자전기
공학부 공학박사
2005년 1월~현재 전자부품연구원

선임연구원

<관심분야> 디지털 통신, OFDM 셀룰러/LAN 모뎀,
디지털 방송 및 통신융합 시스템

전 원 기 (Won Gi Jeon)

정회원



1994년 2월 중앙대학교 전자공학과
공학사
1996년 2월 중앙대학교 전자공학과
공학석사
1999년 8월 중앙대학교 전자공학과
공학박사
2001년 7월 중앙대학교 전자전기

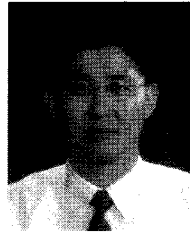
공학부 BK21 계약교수

2001년 8월~현재 전자부품연구원 책임연구원

<관심분야> OFDM 기반의 무선통신 시스템, 디지털
방송 및 통신융합 시스템

백 종 호 (Jong Ho Paik)

정회원



1994년 2월 중앙대학교 전기공
학과 공학사
1997년 2월 중앙대학교 전기공
학과 공학석사
2007년 8월 중앙대학교 전자전기
공학부 공학박사
1997년 1월~현재 전자부품연구원

모바일단말연구센터 센터장

<관심분야> 디지털 방송 시스템, 방송통신융합 시스템

이 석 필 (Seok Pil Lee)

정회원



1990년 2월 연세대학교 전기공
학과 졸업(공학사)
1992년 2월 연세대학교 대학원
전기공학과 졸업(공학석사)
1997년 2월 연세대학교 대학원
전기전자공학과 졸업(공학박사)
1997년~2002 대우전자 영상연구소

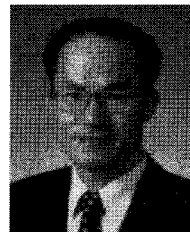
선임연구원

2002년~현재 KETI 디지털미디어연구센터 센터장

<관심분야> 디지털방송시스템, 실감오디오시스템, 디
지탈신호처리

조 용 수 (Yong Soo Cho)

중신회원



1984년 2월 중앙대학교 전자공
학과 졸업(학사)
1987년 2월 연세대학교 전자공
학과 졸업(석사)
1991년 2월 The University of
Texas at Austin 공학박사
1992년 3월~현재 중앙대학교

전자전기공학부 교수

2003년 8월~2007년 12월 TTA 휴대인터넷(와이브로)
프로젝트 그룹 무선접속 실무반 의장

<관심분야> 디지털통신, OFDM 모뎀 설계, MIMO-
OFDM 모뎀, MMR 시스템