

# WRAN 응용을 위한 하향링크 무선전송 방식 : OFDMA 상황인식 시스템에서의 적응 부채널 할당 및 고정 빔 형성 기법

준희원 김정주\*, 고상준\*, 종신회원 장경희\*

## DL Radio Transmission Technologies for WRAN Applications : Adaptive Sub-channel Allocation and Stationary Beamforming Algorithms for OFDMA CR System

JungJu Kim\*, SangJun Ko\* Associate Members, KyungHi Chang\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 현재 진행 중인 IEEE 802.22 WRAN의 Functional Requirements를 분석하고, 제시된 Requirements를 만족시키는 하향링크 프레임 구조를 제안한다. 제안된 하향링크 프레임 구조는 WRAN 각 채널 환경하에서의 상황인식 적응 Traffic Channel에 의한 Rate Control을 수행하여 전송 효율을 극대화시키며, 이를 위한 하향링크와 상향링크의 Signaling Overhead를 계산한다. 그리고, 하향링크의 프리앰블을 이용한 시간, 주파수 동기 및 셀 ID 탐색 성능을 분석하고, 프리앰블 또는 Pilot에 의한 환경 적응적 채널 추정 방법과 동적채널할당(Dynamic Channel Allocation)을 결합한 고정 빔형성(Stationary Beamforming) 알고리즘을 제안한다. 또한, 모의 실험을 통하여 이와 같이 제안된 무선 채널 환경에서 적응 부채널 할당 기능을 고려한 상황인식 하향링크 프레임 구조가 IEEE 802.22 WRAN 시스템의 요구사항을 만족시킴을 검증한다.

Key Words : WRAN, OFDMA, cognitive radio, frame structure, sub-channel

### ABSTRACT

In this paper, we analyze functional requirements of the IEEE 802.22 WRAN, and propose a downlink 프레임 structure satisfying the requirements. The proposed downlink 프레임 structure maximizes the transmission efficiency by adopting the cognitive radio to assign the sub-channel by reflecting the channel environment of WRAN. We also calculate the signalling overhead for both downlink and uplink, and analyze the performances of time synchronization, frequency synchronization and cell identification based on the 프리앰블 in downlink and suggest the channel estimation method through 프리앰블 or pilot. As a final result, the stationary beamforming (SBF) algorithm with dynamic channel allocation(DCA) is proposed. The proposed OFDMA downlink 프레임 structure with channel adaptive sub-channel allocation for cognitive radio applications is verified to meet the requirements of IEEE 802.22 WRAN, by computer simulations.

\* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신연구실 (khchang@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-12-518, 접수일자 : 2006년 12월 30일, 최종논문접수일자 : 2006년 2월 27일

## I. 서론

급속히 발전하는 다양한 형태의 무선 통신 기술들은 일상 생활에서 더욱 밀접하게 사용되고 있다. 제 2 세대의 디지털 셀룰라 시스템과 Wideband CDMA 기술에 근간한 제 3 세대 IMT-2000 시스템 등의 최근 10 년간 디지털 무선 통신의 급격한 발달은 일반 사용자들에게 많은 정보를 손쉽게 어디서나 이용할 수 있는 기회를 주었다. 그리고 이보다 빠른 데이터를 Packet 영역에서 전송하는 WiBro 및 차세대 무선 통신 시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는 상태이다. 하지만 현재 거의 모든 주파수가 할당 되어 있고, 특히 낮은 주파수 대역은 사용할 수 있는 여지가 거의 없다. 전파 자원은 국가의 무형자산으로서 자원이 한정되어 있는 반면에 이에 대한 수요가 급증하면서 전파 자원의 가치가 점점 높아지고 있기 때문이다.

이와 같이 한정된 전파 자원을 효율적으로 이용하기 위하여 미국을 비롯한 선진 국가에서는 국가적인 차원에서 이를 효율적으로 이용하기 위한 기술을 개발하고, 이를 토대로 전파 정책을 수립하기 위한 활동이 활발하게 진행되고 있으며, 종래의 전파 정책이 정부가 정책을 세우고 이를 관리하는 Command-and-Control 위주였다면 향후의 전파 정책은 Open Spectrum 정책으로 전환될 것으로 전망된다<sup>[1-4]</sup>.

기존에 사용하는 전파 자원의 이용 효율을 향상시키기 위하여 최신의 무선통신기술을 활용하여 전파 자원의 이용 효율을 극대화 하고자 하는 방안으로 상황인식(Cognitive Radio) 기술이 Joseph Mitola III에 의하여 제안되었다. 그리고 현재 국제 표준화 단체인 IEEE 802.22 WRAN(Wireless Regional Area Network)에서는 상황인식 기술을 접목시킨 이동성이 없는 고정 환경에서의 통신 시스템에 대한 회의가 진행 중에 있다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는 현재 상황인식기술을 바탕으로 진행 중인 IEEE 802.22 WRAN의 Functional Requirements를 분석하고, 제시된 Requirements를 만족시키는 하향 링크 프레임 구조를 제안한다. 제안된 하향 링크 프레임 구조는 WRAN 각 채널 환경하에서의 상황인식 적응 Traffic Channel에 의한 Rate Control을 수행하여 전송 효율을 극대화시키며, 이를 위한 하향 링크와 상향 링크의 Signaling Overhead를 계산한다. 그리고, 하향 링크의 프리앰블을 이용한 시간, 주파수 및 셀 ID 탐색 성능을 분석하

고, 프리앰블 또는 Pilot에 의한 채널 추정 방법과 동적채널할당(Dynamic Channel Allocation)를 결합한 고정 빔형성(Stationary Beamforming) 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 모의 실험을 통하여 이와 같이 제안된 채널 환경에 따른 적응 자원 할당 기능을 고려한 OFDMA 상황인식 하향 링크 프레임 구조는 IEEE 802.22 WRAN 시스템의 요구사항을 만족시킴을 검증한다.

본 논문에서 제안된 내용의 일부는 IEEE 802.22 WRAN 11월 회의에 기고되어, 주요한 Baseline Proposal의 하나로 고려되고 있다<sup>[6]</sup>.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 상황인식(Cognitive Radio) 시스템에 대하여 설명하고, III 장에서는 상황인식 시스템을 위하여 제안된 시스템 파라미터, Duplexing, Multiple Access, Resource Management 및 적용 가능 기술과 이를 바탕으로 무선채널 환경에서 적응 부채널 할당 기능을 고려한 OFDMA 상황인식 하향 링크 프레임 구조에 대해 알아본다. 그리고, IV 장에서는 모의 실험을 통하여 제안된 프리앰블을 이용한 시간, 주파수 동기 및 셀 ID 탐색 성능과 채널 환경에 따른 자원 할당 기법 및 하향 링크 프레임 구조에 대한 성능을 분석하며, V 장에서는 결론을 도출한다.

## II. 상황인식(Cognitive Radio) 시스템

전세계적으로 전파자원에 대한 수요가 민간 및 공공 분야에 걸쳐 확산됨에 따라 전파자원 확보 경쟁이 심화되고 있으며, 향후 유비쿼터스 환경이 도래하면 주파수 부족현상은 더욱 심화될 것으로 예상된다. 세계 각국은 정부의 광범위한 규제와 계획에 의존하는 기존 주파수 관리 정책으로는 기술과 시장의 급격한 변화에 적절한 대응에 있어 한계와 주파수 부족 현상이 더욱 심화됨에 따라 주요 선진국을 중심으로 시장기반 주파수 관리제도를 도입하거나 강화하려는 추세에 있다.

2002년 6월 FCC 의장 Powell은 새로운 전파관리체계를 수립하기 위해 ‘Spectrum Policy Task Force’를 구성, 10월에는 ‘Broadband Migration III : New Directions in Wireless Policy’를 발표하는 등 주파수의 이용효율을 극대화하는 새로운 주파수 관리의 필요성을 제시하여 수요자 중심의 스펙트럼 관리 정책의 수립을 권고하였다.

현재 미국 연방 통신 위원회(FCC)는 SDR 다음 단계로 900 MHz, 2.4 GHz, 5 GHz 대에 상황인식

기술 도입을 추진하고 있고, TV 방송 일부 주파수 대에도 상황인식 적용을 검토하고 있다. 이로써 주파수 부족 문제를 많이 완화할 수 있는 계기가 되었다<sup>3-4)</sup>.

상황인식(Cognitive Radio) 기술은 주파수 대역 Sensing을 통하여 순시적으로 비어 있거나 사용되지 않고 있는 대역의 경우, 기존의 시스템에 간섭 신호를 발생시키지 않는 범위내에서 이를 사용하는 기술로서, 현재 연구되고 있는 차세대 무선 이동통신 기술과 더불어 사용될 수 있는 개념이다.

이를 전파 자원에 응용하기 위해서는 전파의 이용 스펙트럼을 관측하고, 스펙트럼 정보로부터 Spectrum Hole(또는 White Space)를 찾아야 한다<sup>1)</sup>.

Spectrum Sensing의 목표는 우선 사용자(Primary User)의 주파수 사용 현황을 감지하는 것이다. Cognitive Radio 사용의 기본 조건이 주파수 공유이지만 우선 사용자한테는 간섭을 주어서는 안되기 때문에 가장 중요한 기술이라고 할 수 있다.

그림 1은 Dynamic Spectrum Access 즉, 상황인식 시스템이 Spectrum Sensing을 통하여 우선사용자와의 간섭을 피하기 위해 비어 있는 주파수 대역을 검출 하면서 통신을 하고 있는 모습을 나타내고 있다.

2003년 12월에 FCC NPRM에서 주파수 공유 사용 가능성이 언급된 이후, 이를 현실적인 시스템으로 개발하려는 노력이 2004년 8월부터 시작되어 2004년 11월에 IEEE 802.22 WRAN(Wireless Regional Area Network) 첫 모임을 가졌다. 이후 활발히 표준화를 진행하여 2006년 초 첫 번째 초안 작성을 목표로 하고 있다.

IEEE 802.22 WRAN은 기지국을 기점으로 고정된 회사의 빌딩이나 가정집으로의 이동성이 없는 고정환경에서의 망을 구축함으로써 현재 유선으로 서비스 되고 있는 ADSL/Cable 모뎀을 무선으로 대체하면서 시스템용량을 증가시키는 것에 목적을

가지고 있다.

IEEE 802.22 WRAN의 목표는 상황인식 기술을 기반으로 TV 주파수 대역을 사용하고, 이 기술을 바탕으로 WRAN 시스템을 구축하는데 있다. 표 1은 IEEE 802.22 WRAN의 물리 계층(PHY) 요구 사항을 나타낸다<sup>5)</sup>.

표 1. IEEE 802.22 WRAN 물리 계층 요구 사항

항 목	Value
범위	33 km 이상
인구 밀도	1.25 person / km <sup>2</sup>
Cell Type	Multi Cell
주파수 재 사용률	1
주파수 대역	TV Band (6, 7, 8 MHz)
주파수 효율	Minimum 0.5 bps/Hz
	Maximum 5 bps/Hz
전송 속도	Downlink 1.5 Mbps
	Uplink 384 kbps

### III. 제안된 상황인식 하향링크 프레임 구조

본 절에서는 이동성이 없는 고정환경에서 현재 유선으로 제공되는 Cable / ADSL 서비스를 무선으로 제공하기 위하여 IEEE 802.22 WRAN에서 진행되고 있는 상황인식(Cognitive Radio) 시스템의 요구 조건에 부합하는 하향링크 프레임 구조를 제안한다.

하향 링크 프레임 구조를 제안하기 위하여 Duplexing 및 Multiple Access Scheme을 정하고 IEEE 802.22 WRAN 채널 모델을 고려한 시스템 파라미터 산출, Control 채널 및 채널 환경에 따른 3 가지의 부채널 할당 기법을 제안하며, 이에 따른 Overhead도 정량적으로 계산한다.

마지막으로 제안된 프레임 구조의 주파수 효율을 구함으로써 제안된 상황인식 시스템을 위한 하향링크 프레임 구조가 IEEE 802.22 WRAN 시스템에 적합하다는 것을 보인다.

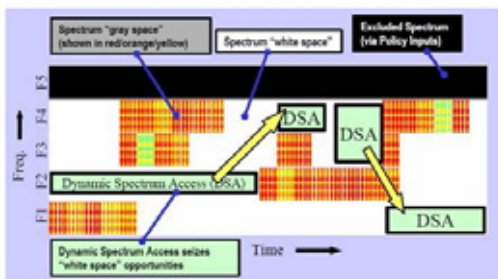


그림 1. Dynamic Spectrum Access

#### 3.1 Duplexing & Multiple Access

Duplexing 방식으로는 크게 FDD(Frequency Division Duplex)와 TDD(Time Division Duplex) 방식이 있다. FDD 방식은 UL와 DL가 서로 다른 주파수 대역을 사용하며, 이들 주파수 대역의 간격은 상호 간격을 무시할 수 있을 만큼 충분히 크다.

FDD 방식은 UL과 DL이 서로 다른 주파수 대역을 사용하므로 TDD 시스템의 보호시간이 필요없다. 이로 인하여 시간 지연 확산이 비교적 크고

High Vehicular Speed를 제공해야 하는 Macro-Cell에 주로 이용된다. TDD 방식은 UL과 DL가 같은 주파수 대역을 공유하지만, 시간을 달리함으로써 구분된다. TDD 방식은 한 프레임을 구성하는 UL 및 DL의 슬롯 수를 조정함으로써 비대칭적인 데이터 전송률을 가지는 서비스를 제공할 수 있으며, 채널의 Reciprocity 특성에 의하여 UL 및 DL의 채널 추정을 따로 할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다. 그러나, TDD 시스템은 Round Trip Time으로 인한 Guard Time이 필요하며, 전력 문제로 인하여 Micro Cell이나 Hot-Spot과 같은 셀에 주로 사용된다. IEEE 802.22 WRAN에서는 33 km 이상의 큰 지역에서의 서비스를 요구하기 때문에 본 논문은 FDD 방식을 기반으로 연구를 진행한다.

OFDM 방식은 높은 전송 효율과 간단한 채널 등화 방식 때문에, 4 세대 이동통신 시스템에 적용하기에 적절한 방식중의 하나로서 주목 받고 있다.

OFDM-FDMA 방식은 각 사용자마다 서로 다른 서브 채널을 할당하기 때문에, Intra Cell 안에서는 MAI(Multiple Access Interference)가 없으며, 각 사용자의 요구 전송을 및 채널 상황에 따라 각 사용자에게 할당하는 서브 채널의 수 및 Modulation Level을 효과적으로 변경시킬 수 있으므로, Adaptive Loading에 유리하다. OFDMA 시스템은 셀 간 간섭에 의하여 성능에 많은 영향을 받으므로 셀 간 간섭을 최소화시키기 위하여 Frequency Hopping 방식이나 Safety Channel 및 동적 채널 할당기법을 OFDMA 시스템에 접목시키고 있다. OFDMA 방식은 많은 수의 부반송파를 사용할 경우 적합하기 때문에 시간 지연 확산(Time Delay Spread) 이 비교적 큰 넓은 지역의 셀을 갖는 무선 통신 시스템에 효율적으로 적용되며, High Vehicular 시스템에 적합한 특징을 지닌다. 따라서, 본 논문은 OFDM-FDMA 방식을 기반으로 연구를 진행 한다.

### 3.2 시스템 파라미터

본 절에서는 OFDMA/FDD 기반의 프레임 구조를 구성하기 위하여 가장 기초적인 시스템 파라미터를 계산한다. 표 2는 IEEE WRAN에서 제시한 Channel Model을 나타낸다. 본 논문에서는 Max Delay Spread를 Channel Model Profile C를 기준으로 하여 35 usec으로 가정한 후 시스템 파라미터를 계산한다<sup>5, 7)</sup>.

표 3은 35 usec을 기준으로 시스템 파라미터를 정리한 것이다. 시스템 BW 6, 7, 8 MHz에 대하여

표 2. IEEE 802.22 WRAN 채널 모델

PROFILE A	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
Excess delay	0	3 usec	8 usec	13 usec	18 usec	23 usec
Relative amplitude	0	-7 dB	-15 dB	-22 dB	-24 dB	-19 dB
Doppler frequency	0	0.1 Hz	2.5 Hz	0.1 Hz	0.1 Hz	0.07 Hz
PROFILE B	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
Excess delay	-3 usec	2 usec	4 usec	7 usec	11 usec	15 usec
Relative amplitude	-8 dB	-7 dB	-22 dB	-15 dB	-20 dB	-20 dB
Doppler frequency	0.1 Hz	0.1 Hz	2.5 Hz	0.1 Hz	0.07 Hz	0.07 Hz
PROFILE C	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
Excess delay	-2 usec	5 usec	10 usec	24 usec	33 usec	33 usec
Relative amplitude	-9 dB	-10 dB	-14 dB	-24 dB	-16 dB	-16 dB
Doppler frequency	0.1 Hz	0.1 Hz	2.5 Hz	0.1 Hz	0.1 Hz	0.1 Hz
PROFILE D	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
Excess delay	-2 usec	5 usec	10 usec	22 usec	0 to 80 usec	0 to 80 usec
Relative amplitude	-10 dB	-12 dB	-18 dB	-25 dB	-30 to +10 dB	-30 to +10 dB
Doppler frequency	0.1 Hz	0.1 Hz	2.5 Hz	0.1 Hz	0.1 Hz	0.1 Hz

표 3. System Parameters

Parameters	Values		
System BW (MHz)	6	7	8
Sampling Frequency (f <sub>s</sub> , MHz)	8	8	8
Sample Time (T <sub>s</sub> , ns)	125	125	125
FFT Size (N <sub>FFT</sub> )	2048	2048	2048
Subcarrier Frequency Spacing (kHz)	3.91	3.91	3.91
Useful Symbol Time (ns)	256	256	256
Guard Time (ns)	64	64	64
OFDMA Symbol Time (ns)	320	320	320

동일한 Sampling Frequency 8 MHz를 사용하였다. 이 때 Sample Time은 125 ns, FFT Size는 2048, 서브캐리어 간격은 3.91 kHz, OFDMA Symbol Time은 320 us으로 각 6, 7, 9 MHz 시스템 BW에 대하여 동일함을 알 수 있다.

### 3.3 Modulation & Coding

본 절에서는 IEEE 802.22 WRAN에서 요구되는 주파수 효율을 만족하기 위한 Modulation과 Channel Coding 기법에 대하여 설명한다. 표 4는 본 논문에서 사용한 Modulation과 Channel Coding을 나타낸다<sup>7-9)</sup>.

Modulation은 Spread BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM 및 256 QAM, Channel Coding은 현재 IEEE 802.16 WMAN에서 사용되고 있는 CTC(Convolutional Turbo Code)를 사용하며, Coding rate은 1/2, 1/3, 3/4, 5/6 및 7/8을 사용한다.

IEEE 802.22 WRAN에서 요구되는 최소 및 최대 주파수 효율은 각각 0.5 bps/Hz와 5 bps/Hz이다. 이를 만족하기 위해서는 Upper Bound가 256 QAM Modulation에 7/8 Coding rate이며, Lower Bound는 QPSK Modulation에 1/2 Coding rate이 된다.

표 4. 시스템 파라미터

Modulation	Channel Coding [CFC (Convolutional Turbo Code)]
256 QAM	7/8
64 QAM	5/6
16 QAM	3/4
QPSK	2/3
Spreaded BPSK + 1/3 (for Broadcast & Multicast Message)	

16개의 남은 서브캐리어를 이용한 Broadcast 및 Multicast Message 전송시에는 Spreaded BPSK Modulation에 1/3 Coding rate를 사용한다.

### 3.4 Resource Management

본 절에서는 IEEE 802.22 WRAN을 위한 Resource Management에 대하여 설명한다. 상황인식 기술은 지속적으로 Spectrum Sensing을 통하여 비어 있는 주파수 대역을 검출한 후 대역을 이동하여 통신을 한다.

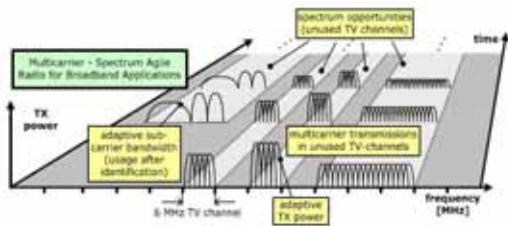


그림 2. Resource Management

그림 2는 IEEE 802.22 WRAN을 위한 Resource Management의 예를 표현한 것이다. 요구되는 사용자의 서비스에 따라 Spectrum Sensing을 통하여 우선 사용자와의 간섭을 피하면서 비어 있는 주파수 대역을 찾고 적응적으로 Power 및 서브캐리어를 조정할 수 있으며, 하나의 채널 또는 그 이상의 채널을 동시에 사용할 수 있다.

### 3.5 Capable Technologies

본 절에서는 Control Channel 및 하향링크 Throughput을 증가시키기 위한 채널 환경별 서브채널 Mode, 그리고 이동성이 없는 고정환경이란 장점을 이용한 Stationary Beamforming을 제안한다. 그리고, 위에서 언급한 Spectrum Sensing, Control Channel 그리고, Traffic Channel을 고려한 하향링크 프레임구조를 제안한다.

#### 3.5.1 프리앰블

그림 3은 본 논문에서 제안한 시간 영역에서의

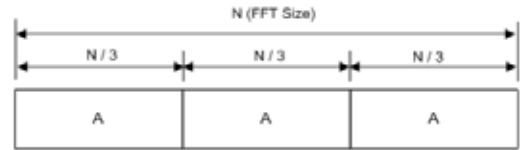


그림 3. 프리앰블 Structure

프리앰블 구조를 나타낸다. 프리앰블은 IEEE 802.16 WMAN에서 사용되고 있는 구조를 사용하였다. 이 구조는 3개의 서브 캐리어 간격마다 프리앰블 Sequence를 삽입하고, 나머지 구간에는 0을 채워넣는 간단한 구조를 가지면서, 시간 영역에서 3번 반복되어 큰 복잡도 없이 효율적인 동기 성능을 나타낸다. 본 논문에서는 프리앰블을 이용하여 시간, 주파수 동기, 셀 ID 탐색 및 채널 추정을 수행한다. 그리고, CPE(Consumer Premise Equipment) 즉, 사용자가 프리앰블을 이용하여 채널 상태를 측정하여 CSI (Channel State Information)를 기지국(Base Station)에 feedback 한다. 기지국은 feedback된 CSI를 바탕으로 제안된 부채널 방법을 결정한다<sup>[7-9]</sup>.

#### 3.5.2 Sub-channel Mode

본 절에서는 제한된 전력 내에서 하향링크 Throughput을 향상시키기 위한 채널 환경에 따른 Sub-channel Mode를 제안한다. 채널 모델은 ITU-R M.1225 Channel Model을 기반으로 Best Medium & Worst Channel Environments 3가지로 구분하였으며, 제안된 각 채널 환경에 따른 효율적인 Sub-channel Mode를 가진다.

Sub-channel Mode는 Band-type AMC, Scattered AMC 및 Diversity Mode로 구분되며, 이 중 Band-type AMC와 Scattered AMC는 동적채널할당기법 (Dynamic Channel Allocation)을 고려한 AMC 구조를 가지며, Diversity Mode는 랜덤 채널 할당을 고려한 AMC 구조를 가진다<sup>[12-15]</sup>.

##### 3.5.2.1 Band-type AMC

그림 4와 5는 ITU-R M.1225 Ped-A 3km/h 채널 환경에서 각각 주파수 영역의 채널 변화와 시간 및 주파수 영역에서의 채널 변화를 측정할 것이다. 그림 4에서는 ITU-R M.1225 Ped-A 3 km/h와 같은 채널 환경에서 주파수 영역의 채널 변화가 연속된 60개의 서브 캐리어에서도 변화가 적음을 볼 수 있다. 그러므로, 사용자가 기지국에 feedback 해야 할 CSI 량이 적으므로 동적 채널 할당의 수행이 가능하다. 그림 5에서는 이동성이 없는 고정환경이기



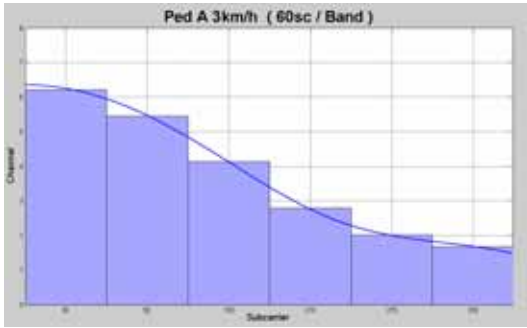


그림 4. ITU-R M.1225 Ped-A 3 km/h 채널 환경 (1)

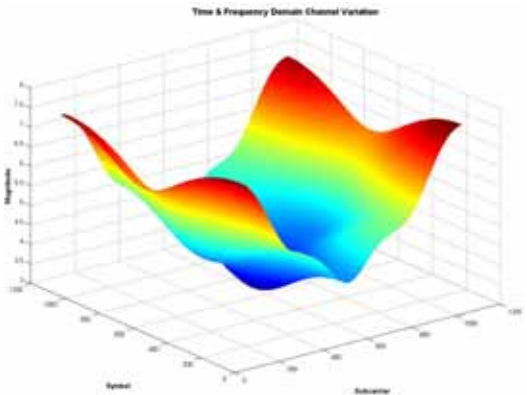


그림 5. ITU-R M.1225 Ped-A 3 km/h 채널 환경 (2)

때문에 시간 영역에서의 채널 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

본 논문에서는 그림 4, 5와 같은 채널 환경을 Best Channel Environment로 가정하고, 이와 같은 환경에서는 Band-type AMC 부채널 할당 기법을 사용하는 것을 제안한다.

그림 6은 본 논문에서 제안한 Band-type AMC 구조를 나타낸다. Band-type AMC 부채널 구조의 가장 기본적인 단위는 BIN으로서, 주파수 영역에서 15개의 연속된 서브 캐리어가 모여서 구성된다. 제안된 Band-type AMC 구조에서는 두 종류의 BIN 구조를 사용한다. BIN 1은 15개의 연속된 데이터 서브 캐리어가 모여서 구성되고, BIN 2는 14개의 데이터 서브 캐리어와 채널 추정을 위한 1개의 Pilot 서브 캐리어로 이루어진다.

그리고, 주파수 영역에서 4개의 연속된 BIN 즉, 60 개의 연속된 서브 캐리어가 모여서 하나의 Band를 이루며, 전체 24개의 Band로 구성된다. 사용자는 Band 단위로 CSI를 기지국에 feedback하고, 요구하는 서비스에 따라 한 Band 또는 그 이상을 사용한다. 이로써 Multi-user Diversity 이득 및 Implicit

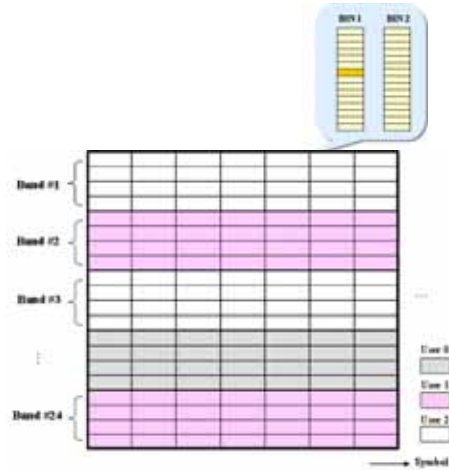


그림 6. Band-type AMC 부채널 구조

Frequency Diversity 이득을 얻음으로 시스템의 Throughput 및 주파수 효율을 향상시키는 장점을 가진다.

### 3.5.2.2 Scattered AMC

그림 7은 ITU-R M.1225 Veh-A 3 km/h 채널 환경에서 각각 주파수 영역의 채널 변화를 나타낸 것이다. 그림 4의 ITU-R M.1225 Ped-A 3 km/h 채널 환경보다 주파수 영역에서 채널이 좀 더 빠르게 변하는 것을 알 수 있다. 하지만 주파수 영역의 채널 변화가 연속된 30개의 서브 캐리어에서도 변화가 적음을 볼 수 있다. 그러므로, Band-type AMC와 마찬가지로 동적 채널 할당의 수행이 가능하다. 시간 영역에서의 채널 변화는 이동성이 없는 고정환경이기 때문에 그림 5에서처럼 많이 변하지 않는다.

본 논문에서는 그림 7과 같은 채널 환경을 Medium Channel Environment로 가정하고, 이와 같은 환경에서는 동적 채널 할당을 고려한 Scattered AMC 부채널 할당 기법을 제안한다.

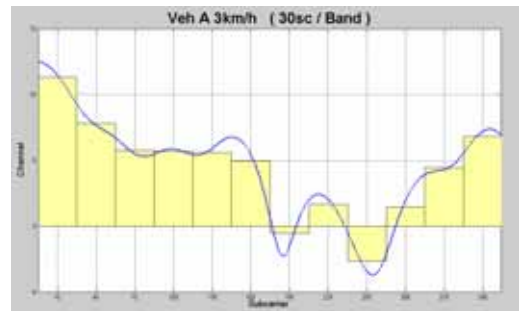


그림 7. ITU-R M.1225 Veh-A 3 km/h 채널 환경

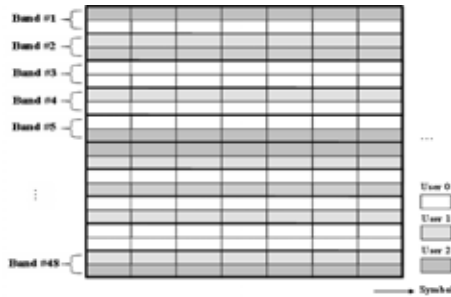


그림 8. Scattered AMC 부채널 구조

그림 8은 본 논문에서 제안한 Scattered AMC 부채널 구조를 나타낸다. Band-type AMC 와 마찬가지로 기본단위로 15개의 연속된 서브 캐리어로 이루어진 BIN 구조를 가진다. 그리고, Band-type AMC와는 다르게 주파수 영역에서 2개의 연속된 BIN, 즉 30개의 연속된 서브캐리어가 모여서 하나의 Band를 이루며, 전체 48개의 Band로 구성된다. 사용자는 Band 단위로 CSI를 기지국에 feedback 하고, 요구하는 서비스에 따라 Band 별로 할당하는 Band-type AMC 부채널 구조와는 다르게 BIN 별로 할당한다. 이로써 Multi-user Diversity 이득 및 Frequency Diversity 이득을 얻음으로 시스템의 Throughput 및 주파수 효율을 향상시키는 장점을 가진다.

3.5.2.3 Diversity

그림 9는 ITU-R M.1225 Veh-B 3 km/h 채널 환경에서 각각 주파수 영역의 채널 변화를 나타낸 것이다. 그림 4, 7과는 달리 채널이 빠르게 변하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 채널이 빠르게 변하는 경우에 동적 채널 할당을 고려할 경우 feedback 해야 하는 CSI 량이 너무 많아지는 단점으로 인해 오히려 시스템 용량을 감소시킨다. 그림 9와 같은 채널 환경을 Worst Channel Environment로 가정하고 랜덤 채널 할당을 수행하는 Diversity 부채널 할당 기법을 제안한다<sup>8-10)</sup>.



그림 9. ITU-R M.1225 Veh-B 3 km/h 채널 환경

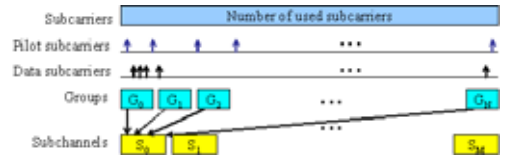


그림 10. Diversity 부채널 구조

그림 10은 본 논문에서 제안한 Diversity 구조를 나타낸다. Diversity 부채널 할당 기법은 IEEE 802.16 WMAN의 O-FUSC 구조를 사용한다.

주파수 영역에서 160개의 고정된 위치를 가지는 Pilot 서브 캐리어를 사용하며, 데이터 서브 캐리어를 48개의 그룹으로 구성한 다음 각각의 그룹에서 하나씩의 서브 캐리어를 순차적으로 가져와 30개의 부채널을 구성한다. 이로써 Multi-user Diversity 및 Frequency Diversity 이득을 얻음으로 시스템의 Throughput 및 주파수 효율을 향상시키는 장점을 가진다.

표 5. DL & UL Overhead

	Best Channel Environment	Medium Channel Environment	Worst Channel Environment
Resource Allocation Mode	Band-type AMC	Scattered AMC	Diversity
Typical Delay Spread	0.4 us (Ped-A)	4 us (Ped-B, Veh-A)	20 us (Veh-B) ~
FFT Size	2048	2048	2048
Used SC	1456	1456	1456
Remaining SC	16	16	16
SC / BIN	15	15	×
BIN / Band	4	2	×

표 5는 Best, Medium 및 Worst 채널 환경에 따른 부채널 할당 기법과 파라미터를 정리한 것이다. ITU-R M.1225 채널 모델을 기반으로 Best, Medium 및 Worst Channel Environments인 경우 Typical Delay Spread는 각각 0.4, 4, 20 us을 가짐을 알 수 있다.

3.5.2.4 Channel Estimation

그림 11은 본 논문에서 제안한 Channel Estimation의 한 예를 나타낸다.

Pilot은 각 BIN에서 3, 8, 13 번째 서브 캐리어에 순환되며 위치하게 된다. 그림 5에서 나타나듯이 시간 영역에서는 채널의 변화가 미비하기 때문에 5 심볼 간격을 두고 Pilot을 위치시킨다. 이는 Shadowing 또는 갑작스런 기후 변화 등을 고려한 것이고, IEEE 802.16에서와 같이 처음에 고정 환경을 고려한 시스템에서 점차 이동성이 추가된 802.16e로

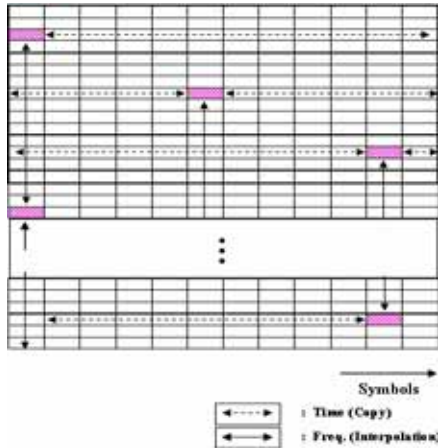


그림 11. Channel Estimation

변할 수도 있기 때문에 Pilot 기반의 Channel Estimation 기법도 제안한다.

Channel Estimation은 시간 영역에서는 Copy, 주파수 영역에서는 Interpolation을 통하여 수행한다.

표 6. DL & UL Overhead

항 목	Value
Band-type AMC	DL 2 Symbols
	UL 2 Symbols
Scattered AMC	DL 3 Symbols
	UL 5 Symbols
Diversity	DL 2 Symbols
	UL 1 Symbols

### 3.5.2.5 DL & UL Overhead

표 6는 본 논문에서 제안한 부채널 할당 방법에 따른 DL 및 UL의 Overhead를 정량적으로 계산한 것이다. Overhead 계산은 IEEE 802.16 WMAN의 DL-MAP 정보와 CQI bits를 이용한다<sup>7-9)</sup>.

Overhead 계산 시 12개의 CPE, 1/2 Turbo + 2 Repetition 코딩 및 QPSK 변조를 고려하였다. Scattered AMC의 경우 48개의 Band로 구성되어 있어 Band-type과 Diversity 부채널 할당 기법보다 전송되는 정보량이 많으므로 Overhead가 다른 부채널 할당 기법에 대하여 높게 나옴을 알 수 있다. 이 때 MAP Size는 사용자의 수에 따라 변할 수 있다.

### 3.5.3 고정 빔 형성 기법

본 절에서는 특정 사용자 내에 동일한 전송률을 보장할 수 있는 서브 채널들이 존재할 경우, 특정 서브 채널을 특정 사용자에게 할당할 경우 다른 사

용자에게 미치는 영향을 고려하여 서브 채널들을 할당하고, 이를 고정 빔 형성 기법을 통하여 전송함으로써, 기존 서브 채널 할당 기법과 비교하여 시스템 하향 링크의 Throughput 및 Outage Probability를 향상시키는 이동성이 없는 고정 환경의 장점을 이용한 고정 빔 형성 기법(Stationary Beamforming)을 제안한다.

그림 12는 본 논문에서 제안한 고정 빔 형성 기법(Stationary Beamforming)의 순서도를 나타낸다.

이동성이 없는 고정환경의 장점을 이용한 고정 빔 형성 기법은 동적 채널 할당기법을 결합한 자원의 효율적 사용을 최대화 시킬수 있고 별도의 UL feedback 정보를 필요로 하지 않기 때문에 시스템 하향링크의 Throughput 및 Outage Probability를 향상시킬 수 있다.

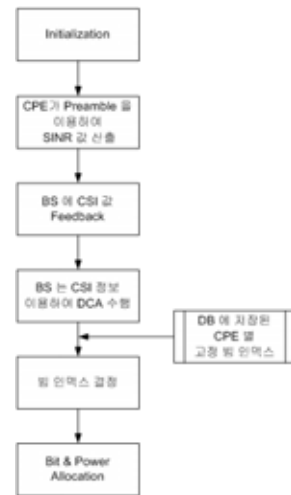


그림 12. 고정 빔 형성 기법 (Stationary Beamforming)

### 3.6 프레임 구조

본 절에서는 앞서 제안한 Control 및 Traffic 채널 등을 고려하여 하향링크 프레임 구조를 제안한다.

그림 13은 제안된 하향링크 프레임 구조를 나타낸다. 전체 하향 링크 프레임 구조는 크게 수퍼 프레임, 프레임, 슬롯의 3가지로 구성된다. 96ms 단위의 수퍼 프레임은 19.2 ms의 길이를 가진 5개의 프레임으로 이루어지며, 한 프레임은 4.8ms의 길이를 가지는 4개의 슬롯으로 구성된다. 한 슬롯은 15개의 심볼로 구성되며, 프레임에서 첫 번째 슬롯은 1개의 심볼로 구성된 프리앰블과 사용자의 수에 따라 변할 수 있는 FCH & MAP Message, 그리고 데이터 심볼로 채워진다. 첫 번째 슬롯을 제외한 나



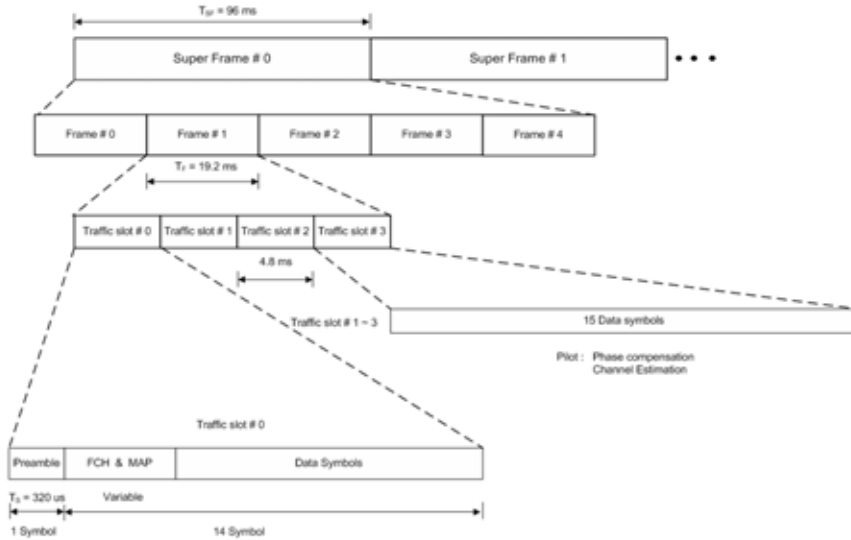


그림 13. 제안된 하향링크 프레임 구조 (1)

머지 슬롯은 데이터 심볼로만 구성된다. 슬롯 단위로 Data 심볼 구간에 위치한 Pilot Sub-carrier를 이용하여 채널 추정 및 위상을 보상한다. 그리고 프레임 단위로는 각 사용자가 첫 번째 슬롯에 위치한 Preamble OFDM Symbol을 이용하여 모든 Sub-groups의 SINR 값을 측정하고 이 값을 기지국에 feedback하여 채널의 상태를 파악한 다음 Band-type AMC, Scattered AMC 및 Diversity 부채널 할당기법 중의 하나를 선택한다. 이 때, 본 논문에서 고려하고 있는 환경은 이동성이 없는 고정환경이기 때문에 각 사용자에 대한 채널은 거의 변하지 않는다고 가정하고, Best, Medium & Worst Channel Environments에 대한 구분은 Device를 Turn On할 때 채널 Magnitude의 Variance 값을 측정하여 한번 보낸 다음 각 기지국의 Database에 저장하는 것으로 가정한다.

수퍼 프레임 단위로는 다른 RF 채널에 대하여 Spectrum Sensing을 수행한다. Sensing 주기는 수퍼 프레임 단위로 가정하고, 주기는 수퍼 프레임의 N 배 수로써 상황에 따라 MAC에서 N 값을 조정하는 것을 가정한다. 1개의 Traffic 슬롯 동안 1개의 RF 채널에 대하여 Sensing을 수행한다. 그래서 프레임 #0~#4와 Overhead가 포함된 Traffic 슬롯을 제외한 #1~#3까지의 조합으로 총 15개 RF 채널에 대하여 Spectrum Sensing을 수행할 수 있다.

그림 14는 Control 채널 및 Band-type AMC, Scattered AMC Diversity 부채널을 포함한 전체 하

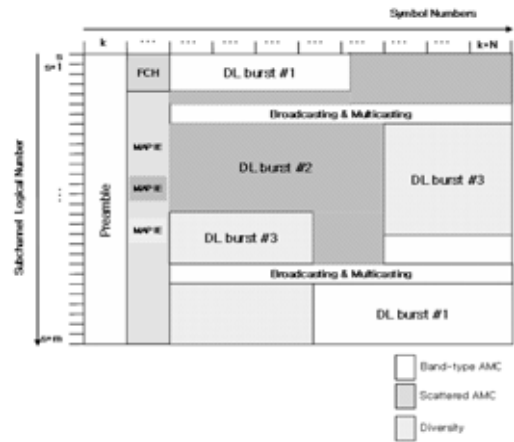


그림 14. 제안된 하향링크 프레임 구조 (2)

향 링크 프레임 구조를 나타낸다. 처음에는 동기 추정, Cell 탐색 및 SINR 추정을 위한 프리앰블 한 심볼이 전송되고, 이어서 FCH & MAP Message가 전송된다. 그리고 Band-type AMC, Scattered AMC 및 Diversity 부채널을 혼용하여 쓰며, 16개의 남은 Subcarrier를 이용하여 Broadcast & Multicast Message도 2부분으로 나누어 Diversity 이득을 얻기위한 구조를 가지는 것을 제안한다.

### 3.7 주파수 효율

본 절에서는 앞서 제안한 Control 채널 및 Pilot Overhead를 고려하여 하향 링크의 주파수 효율을 계산한다.

표 7. 주파수 효율

Spectral Efficiency (bps/Hz (3GPP))	Band-type AMC Mode	Scattered AMC Mode	Diversity Mode
Upper Bound (256 QAM + 78 Code rate)	5 (30.03)	4.83 (28.98)	4.96 (29.75)
Middle Bound (64 QAM + 3/4 Code rate)	3.217 (19.307)	3.105 (18.63)	3.187 (19.125)
Lower Bound (QPSK + 1/2 Code rate)	0.715 (4.29)	0.69 (4.14)	0.708 (4.25)
Extra Lower Bound	0.119 (0.715)	0.115 (0.69)	0.118 (0.708)

표 7은 Band-type AMC, Scattered AMC 및 Diversity 부채널 할당 기법에 따라 IEEE 802.22 WRAN에서 요구되는 주파수 효율에 맞는 Upper Bound와 Lower Bound를 나타낸다. 시스템 BW는 6MHz를 기준으로 ( )의 값은 Pilot 및 Control Channel을 고려한 경우의 주파수 효율을 나타낸다. 표 7에서 알 수 있듯이 각 부채널 모드에 따라 Overhead 및 Pilot에 의한 차이로 약간의 차이를 보이고는 있지만 현재 IEEE 802.22 WRAN에서 요구되는 최대, 평균 그리고 최소 주파수 효율은 각 5, 3, 0.5 bps/Hz를 거의 만족함을 보인다. 마지막으로 Extra Lower Bound는 본 논문에서 제안한 16 개의 남은 Sub-carrier를 이용하여 Broadcast & Multicast Message 용으로 사용될 때의 주파수 효율을 구한 것이다.

본 논문에서 제안된 상황인식 시스템을 위한 하향 링크 프레임 구조는 요구되는 Maximun, Average 그리고 최소 주파수 효율을 거의 만족하는 성능을 보임을 알 수 있다.

#### IV. 모의 실험을 통한 성능 분석

표 8은 본 논문에서 사용한 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 현재 진행 중인 IEEE 802.22 WRAN을 고려하여 Carrier Frequency는 617 MHz로 설정하였고, 이동성이 없는 고정 환경이지만 Shadowing 등에 따른 시간 영역에서의 채널 변화를 고려

표 8. Simulation Parameters

Parameters	Value
Carrier Frequency (MHz)	617
Sampling Frequency (MHz)	8
Sample Time	125
FFT Size	2048
Sub-carrier Spacing (kHz)	3.91
Useful Symbol Timing (us)	256
Guard Time (us)	64
OFDMA Symbol Time (us)	320

하여 속도는 3 km/h를 고려한다<sup>[5, 7]</sup>.

#### 4.1 시간, 주파수 동기 및 셀 ID 탐색 성능 분석

시간 영역에서 3번 반복되는 구조를 가지는 프리엠블을 이용하여 시간, 주파수 동기 및 셀 ID ID 탐색 성능을 ITU-R M.1225 Ped-B 3 km/h 채널 환경에서 분석한다<sup>[11]</sup>.

그림 15는 Symbol Timing Offset Estimation 성능을 ITU-R M.1225 Ped-B 3 km/h 채널 환경에서 Detection, Missing 및 False Alarm Probability로 나타낸 것이다. SNR 2 dB 이상 부터는 Detection, Missing 및 False Alarm Probability가 각각 98 %, 0 %, 2 %의 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다.

그림 16은 AWGN 및 ITU-R M.1225 Ped-B 3 km/h 채널 환경에서 Frequecy Offset Estimation 성능을 MSE(Mean Square Error)로 나타낸 것이다. SNR 2 dB 이상부터는 10<sup>-4</sup> 이하의 MSE를 가지는 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다.

그림 17은 단일 셀 환경에서의 완벽한 심볼 타이밍 오프셋 및 반송파 주파수 오프셋 추정 성능을

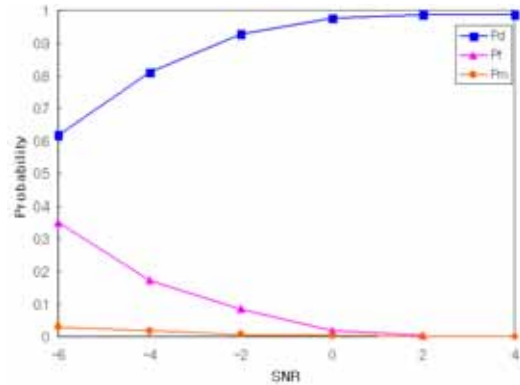


그림 15. Symbol Timing Offset Estimation

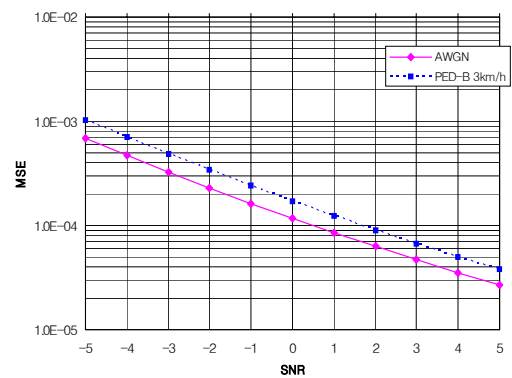


그림 16. Carrier Frequency Offset Estimation

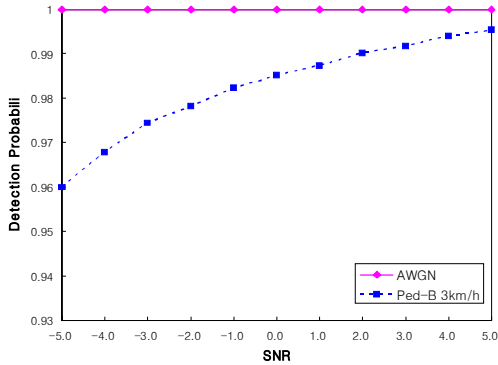


그림 17. Cell ID Identification

가정하고, AWGN 및 ITU-R M.1225 Ped-B 3 km/h 채널 환경에서 Detection Probability로 셀 ID 탐색 성능을 나타낸다. AWGN 채널 환경하에서는 낮은 SNR에서도 100 %, ITU-R M.1225 Ped-B 3 km/h 채널 환경하에서는 SNR 0 dB 이상부터는 98.5%의 Detection Probability를 가짐을 알 수 있다.

#### 4.2 Sub-channel 별 Traffic Channel 성능 분석

그림 18은 본 논문에서 제안한 Best, Medium 및 Worst 채널 환경에서 Band-type AMC, Scattered AMC 및 Diversity 부채널 할당 기법에 따른 Data-path 성능을 QPSK, 16 QAM 및 64 QAM 변조 방식에서 보인 것이다. QPSK 변조에서 Band-type AMC 부채널 할당 기법과 Scattered AMC 및 Diversity 부채널 할당 기법과 비교시 PER  $10^{-2}$ 에서 각각 약 0.3, 0.8 dB 정도의 성능 차이를 가지고 있음을 알 수 있다. Band-type AMC 부채널 할당 기법은 Max Delay Spread 0.4 us을 가지는 채널

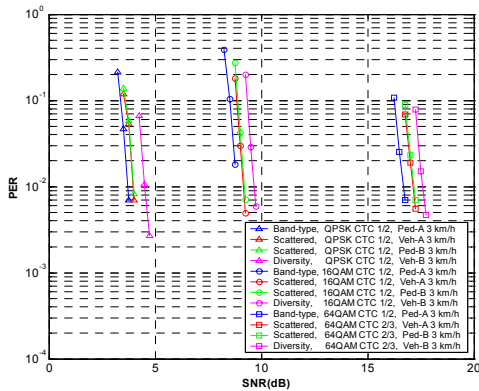


그림 18. 하향링크 Data-path 성능(1)

환경이고, Scattered AMC 및 Diversity 부채널 할당 기법은 각각 Max Delay Spread 4 us, 20 us을 가지는 점점 Frequency Selective한 환경을 가지는 채널을 사용하기 때문에 성능에 있어 차이가 남을 알 수 있다.

그림 18은 ITU-R M.1225 Veh-B 채널 환경 및 IEEE 802.22 WRAN 채널 모델에서 Diversity 부채널 할당 기법의 성능을 QPSK 및 16 QAM 변조 방식에서 보인 것이다. IEEE 802.22 WRAN 채널 모델의 경우 표 2에서 나타났듯이 Max Delay Spread 13~60 us을 가진다. 이는 ITU-R M.1225 Veh-B와 유사한 Delay Spread를 가지기 때문에 Worst Channel Environments로 가정하고 Diversity 부채널 할당 기법을 적용한다. 만약 Worst Channel Environments에서 Band-type AMC 및 Scattered AMC 부채널 할당 기법과 같은 동적 채널 할당을 고려할 경우 사용자가 feedback 해야하는 CSI 량이 너무 많아지는 단점으로 인해 오히려 시스템 용량을 감소시킨다. QPSK 변조에서 IEEE WRAN B 채널을 기준으로 PER  $10^{-2}$ 에서 WRAN A, ITU-R M.1225 Veh-B 및 WRAN C 채널 모델과 비교시 각각 약 0.2, 0.3 그리고 0.8 dB 정도의 성능 차이를 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 19는 본 논문에서 제안한 Pilot을 기반으로 한 Channel Estimation과 Pilot 없이 프리앰블을 사용한 Channel Estimation의 성능을 ITU-R M.1225 Veh-B 3km/h 채널 환경에서 QPSK 변조, CTC 1/2 Coding Rate에 Diversity 부채널 할당 기법을 적용하여 비교한 것이다.

그림 19에서 나타났듯이 Data 부반송파 대비 3 dB 부스팅 된 Pilot 채널 추정기법과 Pilot 없이 프리앰블을 3 dB 부스팅 한 후 채널 추정의 성능은

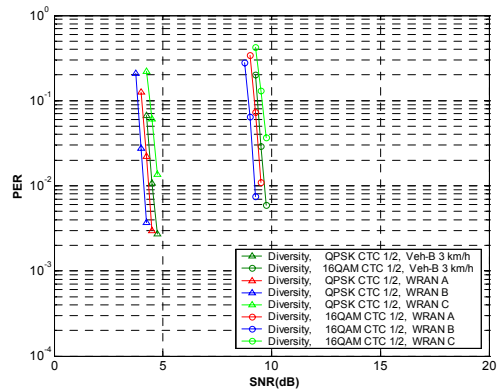


그림 19. 하향링크 Data-path 성능 (2)

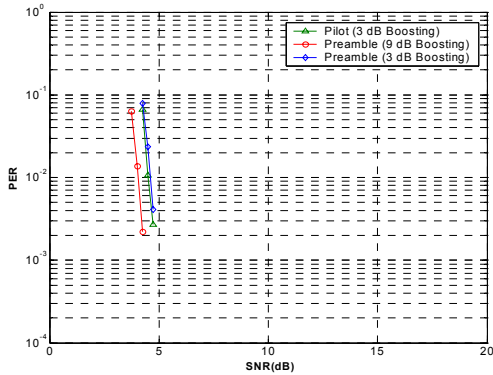


그림 20. Channel Estimation 성능 비교

거의 비슷하고, 프리앰블을 9 dB 부스팅 한 후 채널 추정의 경우 3 dB 부스팅 된 Pilot 및 프리앰블에 비하여 부스팅의 차이 때문에 약 0.5 dB의 성능 향상이 있음을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 이동성이 없는 고정환경에서 현재 유선으로 제공되는 Cable/ADSL 서비스를 무선으로 제공하기 위하여 현재 상황인식 기술을 기반으로 현재 진행중인 IEEE 802.22 WRAN의 Functional Requirements를 분석하고, 이에 적합한 시스템 파라미터, Duplexing, Multiple Access, Resource Management 및 Capable Technologies를 제안하였다. 그리고, 이를 바탕으로 무선채널 환경에서 적응 부채널 할당 기능을 고려한 OFDMA 상황인식 하향링크 프레임 구조를 제안하였다.

제안된 하향 링크 프레임 구조에서 채널의 상태를 측정하여 Best, Medium 및 Worst 채널 환경 3가지로 구분한 다음 각 채널 환경에 적합한 동적 채널 할당을 고려한 Band-type AMC 및 Scattered AMC 부채널 할당 기법 그리고 랜덤 채널 할당을 고려한 Diversity 부채널 할당 기법은 전송 효율을 극대화시키며, 이를 위한 하향 링크와 상향 링크의 Signaling Overhead를 계산하였다. 그리고, 하향 링크의 프리앰블을 이용한 시간, 주파수 동기 및 셀 ID 탐색 성능을 분석하고, 프리앰블 또는 Pilot에 의한 채널 추정 방법과 동적 채널 할당기법을 결합한 고정 빔 형성 기법을 제안하였다.

또한 모의 실험 결과를 통하여 이와 같이 제안된 무선채널 환경에서 적응 부채널 할당 기능을 고려한 OFDMA 상황인식 하향링크 프레임 구조가 IEEE

802.22 WRAN 시스템의 요구사항을 만족시킴을 알 수 있다.

본 논문에서 제안된 내용의 일부는 IEEE 802.22 WRAN 11월 회의에 기고되어, 주요한 Baseline Proposal의 하나로 고려되고 있다<sup>6)</sup>.

### 참고 문헌

- [1] J. Mitola, "Cognitive Radio for flexible mobile multimedia communications," Proc. of IEEE workshop on Mobile Multimedia Comm., Nov. 1999, pp. 3-10.
- [2] D. Cabric, S.M. Mishra, and R. Broderson, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," Proc. of Asilomar Conf. on Sig., Sys. & Comp., 2004.
- [3] FCC, Spectrum policy task force report, ET Docket No. 02-155, Nov. 2002.
- [4] FCC. ET Docket No. 03-322, "Notice of Rule Making and Order," Dec. 2003.
- [5] Carl Stevenson, "Functional requirements for the 802.22 WRAN standard," IEEE 802.22 draft. Sep. 2005.
- [6] IEEE 802.22-05/0108r0, WRAN PHY and MAC Proposal for TDD/FDD, Nov. 2005.
- [7] IEEE 802.22-04/0002r12, WRAN Reference Model, Sept. 2005.
- [8] IEEE P802.16 /2004 IEEE Standards for local and metropolitan area networks part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems.
- [9] IEEE P802.16e /D9-2004 IEEE Standards for local and metropolitan area networks part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems.
- [10] Telecommunications Technology Association, Specifications for 2.3GHz band Portable Internet Service Physical Layer, Dec. 2004.
- [11] 김정주, 노정호, 장경희, "OFDM/TDD 시스템을 위한 효율적인 동기 추정 및 셀 탐색 기법," 한국통신학회 논문지, 30권 No.9A, pp. 714-721, 2005. 09.
- [12] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, "Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA," IEEE Trans.

Wireless Commun., vol. 2, pp. 1150-1158, November 2003.

- [13] C.Y. Wong, R.S. Cheng, K.B. Letaief and R.D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation," IEEE J. Select Areas Commun., vol. 17, pp. 1747-1758, October 1999.
- [14] W. Rhee and J.M. Cioffi, "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation," Proc. IEEE Vehic. Technol. Conf.(VTC), vol. 2, pp. 1085-1089, Tokyo, Japan, May 2000.
- [15] 정재학, 장경희, 차인석, "Cognitive Radio에서의 다중 채널 자원 할당 기술," SK Telecom. Review, 15권 3호, pp. 467-476, 2005. 06.

김 정 주 (JungJu Kim)

준회원



2004년 2월 인하대학교 전자공학과(공학사)  
 2006년 2월 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)  
 2006년 1월~현재 POSDATA FLYVO R&D Center Associate  
 <관심분야> 4세대 이동통신 시스템, Cognitive Radio, UWB 및 WiBro 시스템 무선전송규격

고 상 준 (SangJun Ko)

준회원



2005년 2월 인하대학교 GIS 공학과(공학사)  
 2005년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정  
 <관심분야> 4세대 이동통신 시스템, Cognitive Radio, WiBro 시스템 무선 전송규격, Dynamic Resource Allocation

장 경 희 (KyungHi Chang)

중신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과(공학사)  
 1987년 2월 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
 1992년 8월 Texas A & M Univ., EE Dept.(Ph.D.)  
 1989년~1990년 삼성종합기술원

주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장(책임연구원)  
 2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수  
 <관심분야> 4세대 이동통신 및 3G LTE 무선전송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design