

인지 무선 기반의 시/공간 동적 스펙트럼 접근 웨이브폼 구현

음 수 빈*

Implementation of Cognitive Radio Based Space-Time Dynamic Spectrum Access Waveform

Soo Bin Um*

요 약

본 논문은 시간과 공간상의 유휴대역을 식별하고 동적으로 활용하는 시/공간 동적 스펙트럼 접근 기법의 웨이브폼에 대해 기술한다. SDR 플랫폼에 구현된 웨이브폼은 공간 차원의 활용성을 확보하기 위해 사용되는 능동형 위상배열 안테나와 연동하여 송수신 기능을 비롯한 동적 스펙트럼 접근 관련 주요 기능을 주관한다. 물리계층, Link/MAC계층, 응용계층으로 나뉘어진 웨이브폼의 검증을 위해 MATLAB 기반의 시뮬레이터를 구현하였으며, 주요 기능에 대한 동작성 확인은 야외 무선환경에 구축한 실 환경 테스트베드 기반의 시험을 통해 수행한다.

Key Words : Cognitive Radio, Dynamic Spectrum Access, Space Domain, Software Defined Radio, Phased-array Antenna

ABSTRACT

This paper describes waveform of Space-Time Dynamic Spectrum Access (ST-DSA) scheme whose main idea is to detect and utilize frequency voids across the space and time domain. Implemented on a SDR platform, ST-DSA waveform interfaces with active phased-array antenna used for exploiting space domain, and it controls main functions including T/Rx and DSA. Consisting of Physical Layer, Link/MAC Layer, and Application Layer, ST-DSA waveform is verified by implementing MATLAB based simulator. It is also verified by deploying outdoor test-bed, on which several tests are performed to ensure real environmental operability of the main functions of the waveform.

I. 서 론

5세대 이동통신 기술이 도래함에 따라 요구되는 모바일 트래픽 양과 무선 기기의 숫자가 폭발적으로 증가하고 있으며, 이에 따른 주파수 자원의 수요도 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 그러나 전파특성이 비교적 양호한 6GHz 이하의 대역은 거의 포화된 상태이며, 그 이상의 새로운 주파수 대역을 확보하

는 일 또한 어려워 현재 사용 중인 주파수 대역을 최대한 효율적으로 활용하고자 하는 연구가 조명받고 있는 시점이다.

인지 무선(Cognitive Radio) 기술은 이와 관련한 대표적인 연구 분야로, 무선 환경을 인지할 능력을 갖춘 단말이 변화하는 무선 환경에 적응하며 주파수 효율성과 생존성을 포함한 네트워크 성능요소를 최적화하는 개념이다^[1]. DSA(Dynamic Spectrum Access)는

* First and Corresponding Author : Agency for Defense Development, sbum1989@add.re.kr, 정희원
논문번호 : 201902-472-D-RN, Received February 21, 2019; Revised May 3, 2019; Accepted May 22, 2019

이러한 인지 무선 개념을 한층 구체화한 형태로, 특정 주파수를 사용하도록 허가받은 주 사용자(Primary User) 단말과 허가받지 못한 부 사용자(Secondary User) 단말이 공존하는 네트워크 구조에서, 주 사용자가 주파수를 활용하지 않는 시간에 부 사용자 단말이 이를 탐지하고 해당 주파수에 동적으로 접근하여 활용할 수 있도록 한다.

인지 무선 및 동적 스펙트럼 접근 관련 요소 기술 연구는 크게 두 갈래로 수행되어왔다. 하나는 무선 환경을 인지하기 위한 방법으로써의 스펙트럼 센싱에 대한 연구로, 주 사용자로의 영향성을 최소화하기 위해 높여야하는 정밀성과 무선 환경 데이터의 실시간성 및 장치의 휴대성을 보장하기 위해 낮춰야하는 복잡도의 trade-off가 주요 쟁점이다²⁻⁵¹. 다른 하나는 Link/MAC 계층과 관련한 연구로, 스펙트럼 센싱 및 주파수 접근을 구현하기 위한 단말 간 효율적인 매체 접근/공유 방법과 센싱으로 획득한 무선 환경 정보의 전파를 위한 프로토콜이 주된 연구주제이다⁶⁻¹⁰¹.

동적 스펙트럼 접근 개념을 실제 무선 통신 시스템으로 구현하고자 하는 노력도 지속되어왔다. 가장 두드러진 움직임 중 하나인 IEEE 802.22 표준은 TV Whitespace 대역 기반의 고정형 무선 광역망(WRAN: Wireless Regional Area Network)에서 공간적으로 이격된 지역 사이에서 사용되지 않는 유휴 주파수 대역의 공유 사용을 목적으로 수립되었다^{11,121}. 군 통신 환경에서의 적용을 위한 시도도 있었는데, 대표적으로 미국 방위고등연구계획국(DARPA)의 XG (neXt Generation) 프로젝트가 있다. XG 프로젝트에서는 온톨로지 언어인 CoRaL (Cognitive Policy Radio Language)을 기반으로 정의된 정책에 준용하여 동작하는 정책형 무선기 시스템을 개발하였다^{13,141}.

그러나 대부분의 연구들이 시간 영역에서의 주파수 활용에만 집중할 뿐, 공간 영역에서의 동적 스펙트럼 접근 방안과 이를 구현한 웨이브폼에 대한 연구는 미비한 상황이다. 본 논문에서는 자체 제작한 능동형 위상배열 안테나를 활용하여 빔 지향성을 통한 공간 차원의 활용성을 창출하고, 주파수를 포함한 웨이브폼 매개변수를 폭 넓게 전환할 수 있는 SDR 플랫폼과 연동하여 시간과 공간상의 유휴대역을 활용하는 시/공간 동적 스펙트럼 접근(Space-Tim-e Dynamic Spectrum Access: ST-DSA)¹⁵¹ 웨이브폼을 제안한다. 제시된 웨이브폼의 주요 기능은 MATLAB 기반의 시뮬레이터와 야외 무선환경에 구축한 실 환경 테스트베드 기반의 시험을 통해 검증된다.

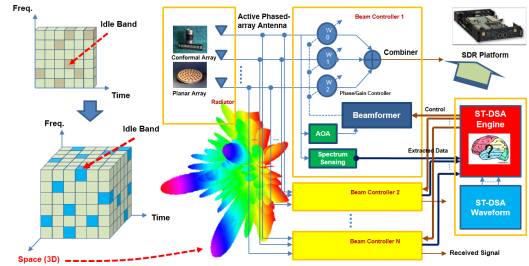


그림 1. ST-DSA 기술 개념도
Fig. 1. Concept of ST-DSA

본 논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서는 시/공간 동적 스펙트럼 접근(이하 ST-DSA) 기술의 개요에 대해 소개한다. 3장에서는 ST-DSA 웨이브폼의 설계 및 구현 결과와 시뮬레이터에 대해 기술하며, 4장에서는 ST-DSA 기술을 검증하기 위한 실 환경 테스트베드 및 시험 결과를 보여준다. 최종적으로 5장에서는 본 논문의 내용을 정리하며 결론을 맺는다.

II. 시/공간 동적 스펙트럼 접근 기술 개요

본 장에서는 ST-DSA 기술에 대해 개략적으로 소개한다. ST-DSA 기술은 능동형 위상배열 안테나와 SDR 플랫폼을 이용하여 시간과 공간상의 유휴대역을 동적으로 식별/활용하여 주파수 자원의 재활용률을 극대화하는 시스템을 목표로 개발되었다. ST-DSA 기술은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 원하는 공간에 빔을 형성할 수 있고 블라인드 재밍 신호에 대한 널링 기능을 가진 능동형 위상배열 안테나 및 빔형성 모듈 기술, 송수신 주파수와 전송 매개변수를 동적으로 전환하고 공간/주파수 스펙트럼 센싱을 수행할 수 있는 SDR 플랫폼 기반의 ST-DSA 웨이브폼, 공간/주파수 스펙트럼 센싱 데이터 및 운용 데이터에 기반하여 유휴 채널과 전송 매개변수를 도출하는 ST-DSA 엔진이 이에 해당한다. 본 논문에서는 ST-DSA 웨이브폼의 설계 및 구현 결과에 대해 기술한다.

2.1 네트워크 구성

ST-DSA 시스템의 네트워크 구조는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. ST-DSA 시스템은 송수신 채널을 최대 두 개까지 형성할 수 있는 단말인 MCN (Multi-Channel Node) 한 대와 송수신 채널을 한 개만 형성할 수 있는 SCN (Single-Channel Node) 두 대의 네트워크로 구성된다.

MCN은 능동형 위상배열 안테나가 장착되어 최대

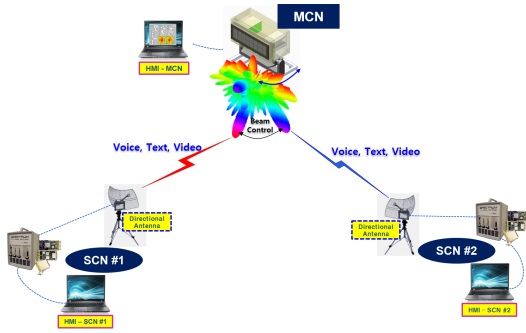


그림 2. ST-DSA 시스템의 네트워크 구조
Fig. 2. Network Architecture of ST-DSA System

두개의 빔을 형성할 수 있으며, 이와 연동하여 운용되는 SDR 플랫폼은 각 빔당 하나씩 최대 두 개의 송수신 채널을 동시 운용할 수 있다. MCN은 동시에 두 대의 SCN과 통신할 수 있으며, ST-DSA 엔진을 탑재하여 운용 초기 단계의 채널 설정을 주관하고 통신 채널 및 동적 스펙트럼 접근 여부를 결정한다.

SCN은 지향성 안테나와 한 개의 통신 채널을 형성할 수 있는 SDR 하드웨어로 구성되며, MCN의 주도하에 MCN과 통신을 수행할 수 있다.

2.2 단말 구조

본 장절에선 ST-DSA 시스템을 구성하는 각 단말의 하드웨어 및 소프트웨어 구조에 대해 기술한다.

2.2.1 Multi-Channel Node

MCN은 송수신 모듈을 포함한 능동형 위상배열 안테나와 자체 제작한 SDR 플랫폼인 송수신기 하우징, 트래픽 전송을 위한 응용 프로그램과 MCN 송수신기의 제어 인터페이스를 제공하는 HMI (Human-Machine Interface) PC로 구성된다.

송수신기 하우징은 플랫폼 제어와 ST-DSA 엔진 구현을 위해 OPENVPX SBC RIOV-2473 보드를 활용하며, Real-time OS인 Greens Hills Integrity를 기반으로 SCA 구조 하에 웨이브폼을 관리/운용한다.

ST-DSA 엔진은 유휴 공간/주파수 탐지, 정책을 반영한 채널 활용성 판단, 후보 공간/주파수 결정, 전송 매개변수 최적화, 경험값 저장 및 분석 등의 기능을 수행한다. ST-DSA 엔진은 그 기능에 따라 인식&정책 엔진, 인지&추론 엔진, 학습&정책 엔진으로 구분된다. MCN은 능동형 위상배열 안테나를 제어하는 빔형성 모듈과 응용/MAC/기저대역/RF 계층으로 이루어진 웨이브폼, ST-DSA 엔진이 상호 작용하는 구조로 동작한다.

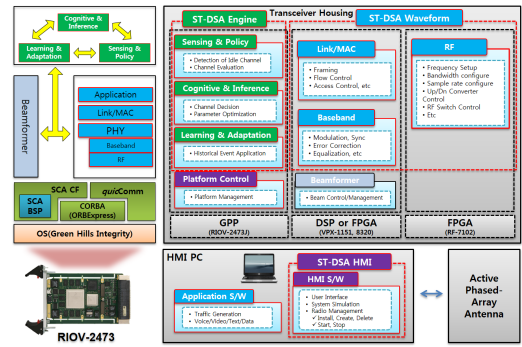


그림 3. ST-DSA 단말 구조
Fig. 3. Transceiver Architecture of ST-DSA

MCN은 두 대의 SCN과 동시 통신이 가능하여야 하며, 이를 위해선 안테나 뿐만 아니라 송수신기 차원에서 두 개의 웨이브폼을 별도로 탑재/운용할 수 있는 하드웨어 자원이 확보되어야 한다. 이를 위해 웨이브폼 구현을 위한 보드는 두 개씩 할당하였다. MCN의 웨이브폼은 MAC계층/기저대역 처리 및 위상배열 안테나 제어를 위한 SSP (Spectrum Signal Processing) 社의 DSP 보드 VPX-8320 2EA와 FPGA 보드 VPX-1151 2EA, RF 신호처리를 위한 SSP社의

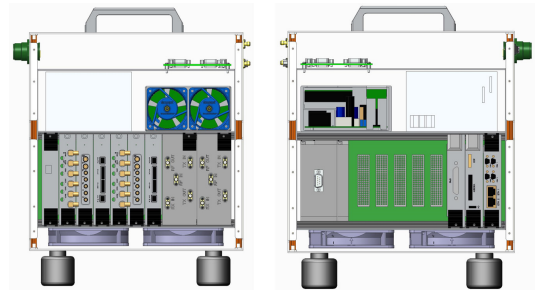


그림 4. 송수신기 하우징 하드웨어 형상
Fig. 4. Hardware Configuration of Transceiver Housing

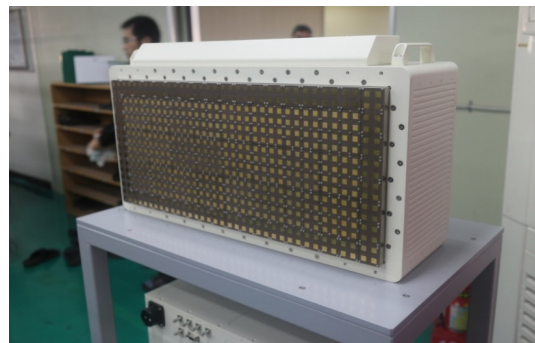


그림 5. 능동형 위상배열 안테나
Fig. 5. Active Phased-Array Antenna

FPGA 보드 RF-7102 2EA에 나뉘어 구현된다. 각 보드들은 PCI express 버스를 통해 서로 연결되어 보드 간 고속 데이터 연동이 가능하도록 하였다.

2.2.2 Single-Channel Node

SCN은 지향성 안테나와 SSP社의 SDR 플랫폼인 SDR-7115, MCN과 마찬가지로 송수신기 운용을 위한 HMI PC를 가진다.

SDR-7115의 동작 구조는 MCN의 송수신기 하위징과 기본적으로 동일하며, RIOV-2473 보드에서 운용되는 Green Hills Integrity 운영체제와 SCA 구조하에 웨이브폼을 관리한다. SCN은 ST-DSA 엔진 중 유희 주파수 탐지, 정책을 반영한 채널 활용성 판단 기능을 수행하는 인식&정책 엔진만 포함하며, 주파수 채널과 전송 매개변수 결정 등의 주요 기능은 MCN에 위임한다. 지향성 안테나를 장착한 SCN은 별도의 빔형성 모듈을 필요로 하지 않으며, 웨이브폼과 ST-DSA 엔진의 상호 작용으로 동작한다.

SCN은 MCN과 달리 한 개의 통신채널을 위한 웨이브폼만 탑재하면 되어, VPX-8320, VPX-1151, RF-7102 보드를 1EA씩만 활용하는 송수신기 구조를 가진다.

III. 시/공간 동적 스펙트럼 접근 웨이브폼

ST-DSA 시스템은 TDD/FDD 두 종류의 웨이브폼으로 운용 가능하다. 본 논문에서는 단일반송파(Single Carrier) 기반의 FDD 웨이브폼 설계 및 구현 결과를 중점적으로 기술한다. ST-DSA FDD 웨이브폼은 물리계층, Link/MAC계층, 응용계층으로 나눌 수 있다.

3.1 물리계층

ST-DSA FDD 웨이브폼의 주파수 운용 및 채널 구성은 그림 6과 같다. 전체 운용대역은 약 400 MHz의 Guard-band를 두고 Low-band (LB)와 High-band (HB)로 구분되며, 두 대역은 각 단말에서 송신 채널군과 수신 채널군으로 운용된다. MCN은 LB를 송신 채널군으로, HB를 수신 채널군으로 활용하며, SCN은 반대의 조합으로 채널을 운용한다. LB와 HB는 각각 대역폭 1.53125 MHz의 채널 192개와 176개로 구성되며, 채널 간 중심주파수 간격은 대역폭과 동일하다.

그림 7은 ST-DSA 웨이브폼 물리계층의 전체 기능 블록도와 주요 매개변수를 나타낸다. 각 기능 블록들은 SDR 플랫폼에 탑재된 VPX-8320, XMC-1151,

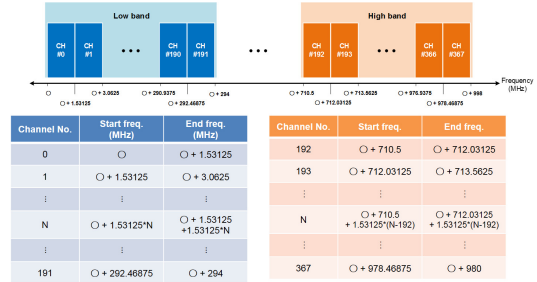


그림 6. 운용 대역 및 채널 구성
Fig. 6. Operation Band and Channel Structure

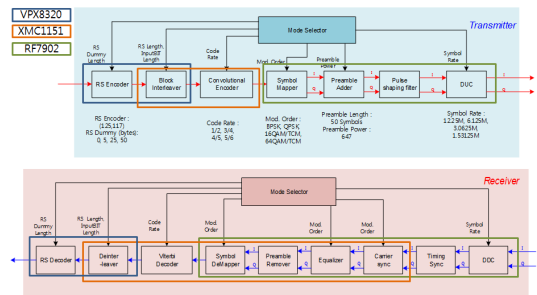


그림 7. 물리계층 블록도
Fig. 7. Block Diagram of Physical Layer

RF-7102 보드에 나뉘어 실장되었다. 먼저 송신 단계에서는 입력 데이터 비트를 RS Encoder와 Convolutional Encoder를 통하여 부호화 한다. 부호화 성능을 향상시키기 위해 Block Interleaver를 함께 사용한다. RS Encoder로는 RS(255,247)^[16]을 Shortening^[17-18]하여 구현한 RS(125,117)을 사용하고, Convolutional Encoder는 각 웨이브폼 모드에 따라 1/2, 3/4, 4/5, 5/6 의 부호율을 사용한다. 부호화된 비트 데이터는 각 웨이브폼 모드에 따라 BPSK, QPSK, 16-QAM/TCM, 64-QAM/TCM 변조 방식을 사용하여 변조 되고, 각 프레임의 앞에 50개의 심볼 길이를 갖는 Preamble이 더해진다. 변조된 데이터는 Pulse Shaping Filter를 거쳐 DUC 블록을 통해 IF 신호로 출력된다. 수신 단계에서는 수신된 IF 신호가 DDC 블록을 통과하여 기저대역의 신호로 변환된다. 변환된 신호는 Timing Recovery, Carrier Recovery를 수행한 후, 채널에 의한 왜곡을 보상하기 위해 Equalizer 기능을 수행한다. Equalizer를 통과한 신호는 Preamble이 제거되고, 양자화 수행결과를 각각의 Threshold 값에 따라 판별하여 복조된다. 복조된 비트 신호는 Viterbi Decoder, Block Deinterleaver, RS Decoder를 통과하여 원래의 신호로 복원된다.

ST-DSA 웨이브폼 물리계층은 4개의 서로 다른 대

표 1. ST-DSA 웨이브폼 모드
Table 1. Transmission Mode of ST-DSA Waveform

Mode	RS Code	CC Rate	Modulation	Data Rate (kbps)
1	(125,117)	1/2	BPSK	$670 \times n^*$
2		3/4		$1,005 \times n$
3		4/5		$1,120 \times n$
4		5/6		$1,170 \times n$
5		1/2	QPSK	$1,340 \times n$
6		3/4		$2,010 \times n$
7		4/5		$2,240 \times n$
8		5/6		$2,340 \times n$
9		1/2	16-QAM	$2,800 \times n$
10		16-TCM		$4,140 \times n$
11		4/5	16-QAM	$4,480 \times n$
12		5/6		$4,680 \times n$
13		1/2	64-QAM	$4,020 \times n$
14		3/4		$6,030 \times n$
15		4/5		$6,720 \times n$
16		64-TCM		$7,020 \times n$

* $n \in \{1, 2, 4, 8\}$

역폭을 지원하며, 전송 매개변수 조합을 통해 16개의 웨이브폼 모드를 지원한다. 대역폭은 1.53125 MHz의 채널 단위를 1/2/4/8개를 묶어서 형성할 수 있으며, 16개의 웨이브폼 모드와 독립적으로 할당한다. 표 1은 전송 매개변수 조합에 따른 웨이브폼 모드와 대역폭에 따른 전송속도를 보여준다. n은 대역폭을 형성하는 채널 수를 의미하는 매개변수로, 이 수치에 비례하여 전송률이 증가함을 확인할 수 있다.

물리계층에서 송신하는 프레임 구조는 그림 8의 위쪽과 같이 나타낼 수 있다. 각 프레임의 입력 데이터는 n개의 RS Code 블록으로 부호화되고, 해당 블록에 Convolutional 부호화가 이루어진다. 이 데이터들은 변조 방식에 따른 심볼로 매핑되고, Preamble이 더해져서 프레임을 이루게 된다. 그림 8의 아래쪽은 공간/주파수 스펙트럼 센싱 구현을 위해 관리하는 M개 단위의 슈퍼 프레임 구조를 보여주며, 마지막 구간에서 공간/주파수 스펙트럼 센싱이 수행된다. 단말 간 제어 채널을 형성하고 유희대역 정보를 공유하는 채널 설정 단계에선 슈퍼 프레임 형성 없이 preamble과 하나의 물리계층 프레임만 구성하여 통신한다.

ST-DSA 웨이브폼의 물리계층은 빔 포인팅 및 공

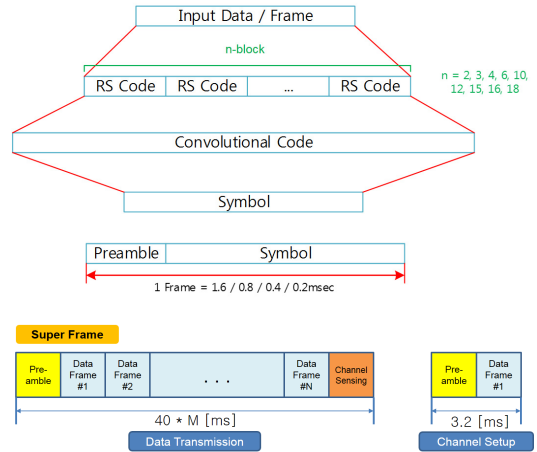


그림 8. 물리계층 프레임 구조
Fig. 8. Frame Format of Physical Layer

간/주파수 스펙트럼 센싱, 데이터 통신 단계를 지원한다. 빔 포인팅은 운용 초기 단계에 각 단말이 서로의 위치를 알 수 없는 상황에서 MCN의 위상배열 안테나 빔 방향을 SCN 단말이 위치하는 곳으로 정렬하기 위한 절차이다. 이를 위해 물리계층은 현재 방향에서의 수신 신호 세기, 수신 신호 Duration 정보 등을 빔형성 모듈에 제공한다. 공간/주파수 스펙트럼 센싱은 향후 데이터 통신에 활용할 유희 채널을 탐지/식별하기 위한 기능으로, 물리계층은 유희 채널을 결정하기 위해 필요한 공간/주파수 센싱 정보를 ST-DSA 엔진에 제공하여 역할을 수행한다. 그림 9는 빔 포인팅, 스펙트럼 센싱, 데이터 통신과 같은 운용 단계에 따라 스위치를 전환하며 해당 운용을 선택적으로 지원하도록 동작하는 하드웨어 기능 구조를 보여준다.

운용 초기에 단말이 빔 포인팅 단계로 동작하는 경우는 그림 10의 빔 포인팅 프로토콜에 따른다. 먼저 SCN #1(#2)이 사전에 약속된 주파수 fB(fC)를 이용하여 tp만큼의 시간 동안 Tone 신호를 송출하고,

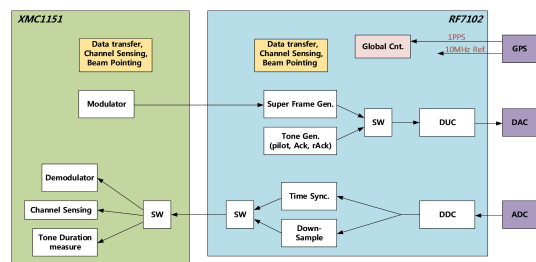


그림 9. 스펙트럼 센싱 및 빔 포인팅을 위한 물리계층 처리
Fig. 9. Physical Layer Process for Spectrum Sensing and Beam Pointing

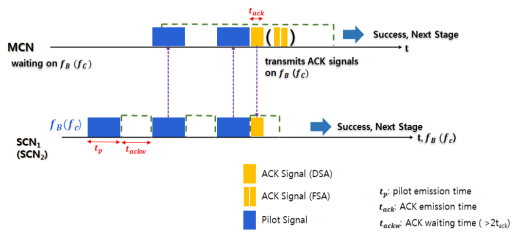


그림 10. 빔 포인팅 프로토콜
Fig. 10. Protocol for Beam Pointing

MCN은 빔형성 모듈을 통해 빔을 조향하면서 신호 세기가 가장 높게 들어온 방향을 찾는다. 이 과정을 그림 9의 처리 구조에서 보면, SCN의 물리계층은 Tone Gen.에서 출력된 Tone 신호가 DAC로 출력되도록 스위치를 동작시키고, MCN에선 수신된 신호가 ADC를 통해 Down-Sampling 후 Channel Sensing 블록으로 전달되어 신호 세기 측정이 이뤄지도록 스위치를 동작시킨다. 앞서 Tone 신호를 보낸 SCN은 이후 tackw 만큼의 시간동안 MCN의 ACK를 기다리는데, 들어오지 않을 경우 ACK가 올 때까지 Tone 신호를 반복적으로 송신한다. MCN의 빔형성 모듈이 신호 세기가 가장 높게 측정된 빔 방향을 찾게되면 Tone Gen. 블록을 통해 ACK 신호를 보내게 되는데, 이때 스위치가 Tone Gen. 블록을 선택하도록 동작하여 ACK 신호로 하여금 DUC를 거쳐 DAC로 출력되도록 한다. ACK 신호를 수신한 SCN은 스위치를 조정하여 Down-Sampling후 Tone Duration Measure 블록으로 전달되도록 한다. 측정된 신호의 Duration에 따라 이후 사전에 결정된 주파수로만 운용할 수 있는 고정 스펙트럼 접근(Fixed Spectrum Access: FSA)과 유희 주파수를 동적으로 식별하여 활용할 수 있는 동적 스펙트럼 접근(DSA) 중 하나로 동작하게 된다. FSA/DSA 운용 여부는 단말 전원 인가 후 HMI PC를 통해 사용자가 선택하도록 되어있다. FSA로 운용하게 될 경우 빔 포인팅 이후 사전에 HMI PC를 통해 설정한 주파수를 이용하여 데이터 통신 단계로 돌입하며, DSA로 운용할 경우 데이터 통신을 위한 유희 채널 식별을 위해 스펙트럼 센싱 단계로 접어들게 된다.

스펙트럼 센싱 단계에서 MCN 단말은 능동형 위상 배열 안테나를 활용하여 공간/주파수 스펙트럼 센싱을 수행한다. 공간/주파수 스펙트럼 센싱을 위해 빔 포인팅으로 획득한 SCN의 방향 (ϕ_{SCN}, ψ_{SCN})을 중심으로, 안테나의 조정 가능한 최소 방향각($\Delta\phi$)과 최소 양각($\Delta\psi$) 간격의 격자점으로 이루어진 센싱 공간을 고려한다. 스펙트럼 센싱은 모든 격자점에서 수행 가

능하며, 빔의 직진성과 한정된 시간 자원을 고려하여 센싱 순서는 그림 11과 같이 SCN의 방향과 그 주변을 우선적으로 수행하는 나선형을 이루도록 하였다. 이와 같은 빔 조향 센싱 방법은 본 시스템에서 제안한 고유의 방법으로, 통신하고자 하는 단말(SCN)의 방향을 우선적으로 활용함으로써 능동형 위상배열 안테나의 빔 이득을 최대한 이용함과 동시에 단말 간 변위가 발생할 경우의 대응을 신속히 할 수 있는 장점이 있다. 특정 격자점에서의 스펙트럼 센싱 시 센싱 신호는 그림 9의 ADC로부터 수신되는데, 이때 스위치는 RF-7102에서 Down-sampling된 신호를 선택하여 XMC-1151에 구현된 채널 센싱 블록으로 전달되도록 동작한다. 채널 센싱 블록에서 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환된 공간/주파수 스펙트럼 센싱 데이터는 이후 ST-DSA 엔진에 전달되어 유희 채널을 식별하는

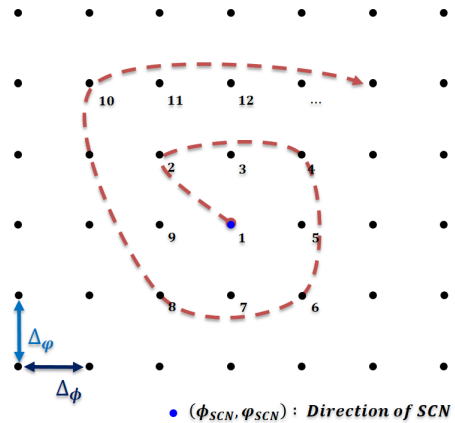


그림 11. 공간/주파수 스펙트럼 센싱 개념도
Fig. 11. Concept of Spatial/Spectral Sensing

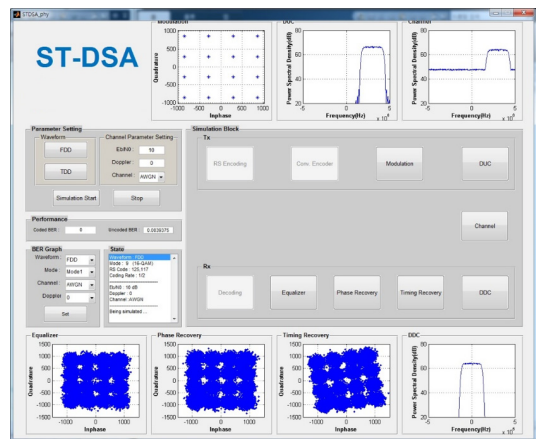


그림 12. MATLAB 기반의 물리계층 시뮬레이터
Fig. 12. Physical Layer Simulator with MATLAB

표 2. 채널 설정 매개변수
Table 2. Channel Setup Parameter

Parameter	Contents
TREQ	Transmitting Time for SETUP_REQ
TLISTEN_LB	Listening Time for SETUP_REQ
TLISTEN_HB	Listening Time for SETUP_RES
NTCL_LB	Number of Available Channel in Low-band
NTCL_HB	Number of Available Channel in High-band
MAXTCL_LB	Maximum Number of Channel in Low-band
MAXTCL_HB	Maximum Number of Channel in High-band

데에 활용된다.

데이터 통신 단계에서 송신 신호는 XMC-1151에서 변조되고 RF-7102에서 프레임으로 구성되어 DAC를 거쳐 송출되도록 스위치를 동작시킨다. 해당 데이터를 수신한 단말은 ADC와 DDC를 거쳐 RF-7102에서 시간 동기를 맞추고, XMC-1151에서 복조되도록 스위치를 동작시킨다.

ST-DSA 웨이브폼 물리계층은 MATLAB 기반으

로 구현한 시뮬레이터를 통해 검증하였다. 그림 12는 물리계층 시뮬레이터의 GUI를 보여준다. TDD/FDD 두 가지 웨이브폼의 물리계층을 확인할 수 있도록 구현되었으며, FDD 웨이브폼에 대해선 좌측부분에 전송 매개변수 설정을 위한 항목과 성능을 확인할 수 있는 항목으로 구성되어 있다. 전송 매개변수 설정 항목에서는 표 1에 명시된 16개의 웨이브폼 모드 중 하나를 선택함으로써 전송률, 채널 부호화율, 변조 방식을 변경할 수 있다. 전송 매개변수 설정 후 설정창 우측에서 채널 매개변수(Eb/No, 도플러 효과, 채널 분포)를 설정 할 수 있다. 모든 매개변수 설정이 끝난 후 시뮬레이션을 시작하게 되면 각 블록의 그래프에서 성상 및 스펙트럼을 확인 할 수 있으며, 좌측 창에서 BER을 확인 할 수 있다. 그림 13은 AWGN 및 Rayleigh 채널 환경에서의 시뮬레이션을 통한 FDD 웨이브폼의 BER 성능을 보여준다.

3.2 Link/MAC계층

Link/MAC계층은 각 단말이 공간/주파수 스펙트럼 센싱을 통해 획득한 무선환경 정보와 이를 바탕으로 도출한 유휴 주파수 채널 정보를 교환하고, 단말 간 공통으로 사용 가능한 데이터 통신 채널을 확립하는데 주도적인 역할을 수행한다. Link/MAC계층 운용은 채널 설정 단계와 데이터 통신 단계의 두 가지 방식으로 구분된다. 채널 설정 단계는 채널 정보 교환, 채널 선택, 채널 광고의 세 단계로 세분화되며, 단말 간 사전에 약속된 제어 채널 없이 수행되는 특징을 가진다¹⁰⁾.

채널 정보 교환 단계에선 각 단말이 사용 가능한 유휴 주파수 채널 정보를 교환한다. MCN은 송신 채널군 LB에서 각 SETUP_ROUND 동안 자신이 사용 가능한 모든 채널에 대해 TREQ 시간 동안 SETUP_REQ 신호를 송신하고, 수신 채널군 HB에서

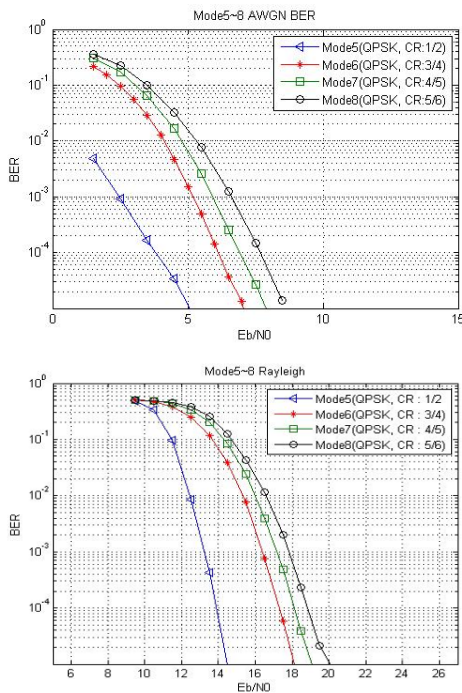


그림 13. AWGN/Rayleigh 채널 환경에서의 BER 성능
Fig. 13. BER Performances in AWGN/Rayleigh Channels

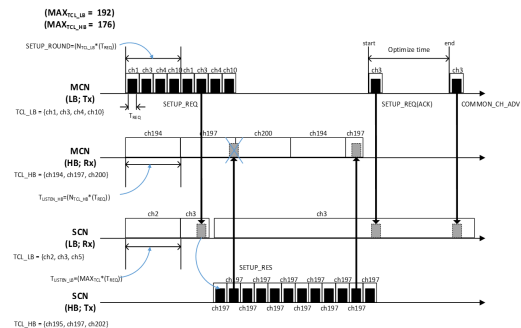


그림 14. 채널 설정 단계
Fig. 14. Channel Setup Phase

사용 가능한 모든 채널에 대해 T_{LISTEN_HB} 시간동안 SCN #1, SCN #2의 SETUP_RES 신호를 기다린다. SCN #1과 SCN #2는 LB의 사용 가능한 모든 채널에 대해 MCN의 신호를 수신하며 수신에 성공했을 시 MCN과 공통으로 사용 가능한 HB의 채널 중 가장 낮은 숫자의 채널을 사용하여 SETUP_RES를 송신한다. SCN으로부터 SETUP_RES를 수신한 MCN은 해당 SCN과 공통으로 사용 가능한 LB의 채널 중 가장 낮은 숫자의 채널을 활용하여 SETUP_REQ(ACK) 신호를 송신한다.

채널 선택 단계는 MCN에 탑재된 ST-DSA 엔진이 MCN이 획득한 로컬 유휴 공간/주파수 채널 정보와 채널 정보 교환 단계를 통해 획득한 SCN의 유휴 주파수 채널 정보에 기반하여 데이터 채널에 활용할 공간/주파수 채널 및 전송 매개변수를 도출하는 과정으로, 성능지표들의 다목적 적합도 함수를 최적화하는 PSO (Particle Swarm Optimization) 알고리즘으로 구현하였다.

채널 광고 단계에선 앞서 결정된 데이터 채널 및 전송 매개변수 정보가 SCN에게 광고된다. MCN은 SETUP_REQ(ACK) 신호를 송신했던 것과 같은 채널에서 데이터 채널 및 전송 매개변수 정보가 포함된 COMMON_CH_ADV 신호를 송신하며, 이를 수신한 SCN과 함께 데이터 통신 단계에 돌입한다.

데이터 통신 단계에서의 단말들은 채널 설정 단계에서 결정된 주파수 및 전송 매개변수를 바탕으로 데이터 통신을 수행한다. CRC 오류검출과 슈퍼 프레임 구조를 이용한 주기적인 스펙트럼 센싱을 통해 현재 운용 중인 주파수 채널 및 예비 주파수 채널에서의 무선환경 변화를 탐지한다. 현재 운용 중인 주파수 채널에서 무선환경 변화가 감지되면, 예비 주파수 채널로 변경하는 채널 이동 동작을 수행한다. 예비 주파수 채널에 변화가 탐지되면 ST-DSA 엔진이 동작하여 유휴 주파수 채널 중 새로운 예비 주파수 채널을 도출한다.

Link/MAC계층은 물리계층과 마찬가지로 MATLAB 기반으로 구현된 시뮬레이터를 통해 그 성능을 검증하였다. 그림 15는 Link/MAC계층 시뮬레이터의 GUI를 보여준다. 좌측 하단의 Start 버튼을 누르면 시뮬레이션이 시작되고, Stop 버튼을 누르면 시뮬레이션이 정지 된다. 시뮬레이션 동작하면 좌측 상단의 화면에서 각 단말 간 어떤 채널에서 데이터가 전송되고 있는지 확인할 수 있다. 좌측 하단의 상태표시창은 각각 LB와 HB에서의 MCN-SCN 간 공통된 유휴 주파수 채널, ST-DSA 엔진의 PSO 알고리즘을 통해 도출된 데이터 채널에 활용될 주파수 채널과 예비

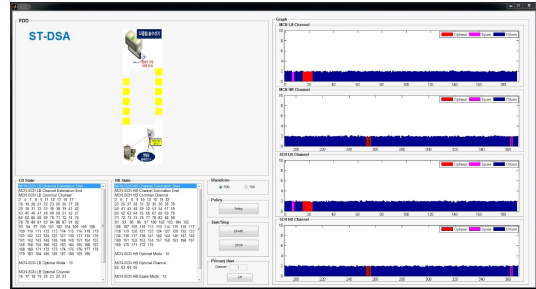


그림 15. MATLAB 기반의 Link/MAC계층 시뮬레이터
Fig. 15. Link/MAC Layer Simulator with MATLAB

주파수 채널, 그리고 웨이브폼 모드를 보여준다.

우측 화면에는 채널들에 대한 상태 정보를 그래프를 통하여 확인할 수 있다. 맨 위부터 차례대로 MCN이 관측한 LB 주파수 채널, MCN이 관측한 HB 주파수 채널, SCN이 관측한 LB 주파수 채널, SCN이 관측한 HB 주파수 채널이다. 가로축은 주파수 채널의 넘버링이며, 세로축은 채널 별 PSD 레벨을 뜻한다. PSO 알고리즘을 통해 도출된 최적의 주파수 채널과 예비 주파수 채널은 각각 빨간색과 분홍색으로 표시하였고, 그 외의 채널들은 파란색으로 표시하였다. 중앙 하단의 Primary User 창에서 특정 채널로의 주 사용자 등장 여부를 설정할 수 있고, 현재 사용 중인 채널에 등장하게 할 경우 즉시 예비 주파수 채널로 옮겨 가는 것을 확인할 수 있다.

3.3 응용계층

ST-DSA 웨이브폼의 응용계층은 MCN과 SCN과 연동 운용되는 HMI PC에 HMI 소프트웨어로 구현되며, 송수신기의 장치제어 및 상태 정보수집, 트래픽 송수신 어플리케이션 기능을 가진다. MCN을 위한 HMI 소프트웨어는 그림 16과 같이 GUI로 구현되었으며, 장치관리부와 어플리케이션부로 이루어져 있다. 장치관리부는 그림 16의 윗부분에 나타나며, 송수신기 운용 제어, 송수신기 상태 전시, 웨이브폼 수동 설정, 위상배열 안테나 제어 설정, 운용 로그 화면으로 이루어져 있다. 어플리케이션부는 그림 16의 아랫부분에 해당하며 영상 송수신, 음성 송수신, 문자 송수신, 파일/데이터 송수신 화면과 인터페이스로 이루어져 있다.

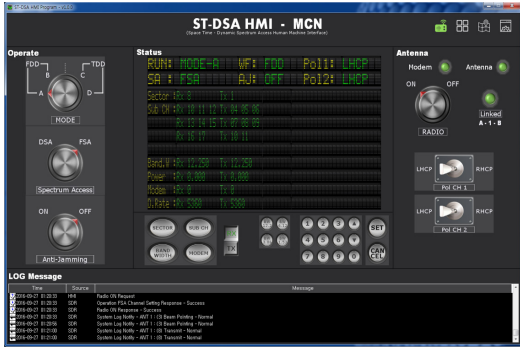


그림 16. GUI 기반의 MCN 전용 HMI 소프트웨어
Fig. 16. HMI Software for MCN implemented to GUI

IV. 실 환경 테스트베드 구축

본 장에서는 ST-DSA 웨이브폼의 주요 기능 검증을 위해 야외 무선환경에 구축한 테스트베드 및 시험 결과에 대해 기술한다. 본 테스트베드를 통해 시험하는 ST-DSA 웨이브폼의 주요 기능은 빔 포인팅, 스펙트럼 센싱, 채널 설정, 데이터 통신, 주 사용자 및 간섭신호 출현에 따른 채널 이동이다. 테스트베드의 구성도는 그림 17과 같다.

테스트베드의 구조는 그림 2에서 제시된 ST-DSA 네트워크 구조에서 무선환경 조성을 위한 모의신호 생성부와 신호 수집/측정/도시/분석을 위한 신호 수집부가 추가된 형태다. 모의신호 생성부는 무선환경 모의신호 및 간섭신호 생성을 위해 벡터 신호 생성기와 RF Source로 구성되며, 전방위 신호 송출을 위해 무지향성 안테나를 활용한다. 신호 수집부는 무선환경 모의신호 및 간섭신호, MCN/SCN 단말 신호 수집을 위해 스펙트럼 분석기와 전방위 신호 수집을 위해 무지향성 안테나가 구축되어있다. 신호 수집부는 수신신호를 I/Q 데이터 형태로 저장할 수 있는 I/Q Recorder를 포함하며, 이에 따라 과거 수행했던 무선 시험환경을 재현하여 반복 시험이 용이하도록 하였다.

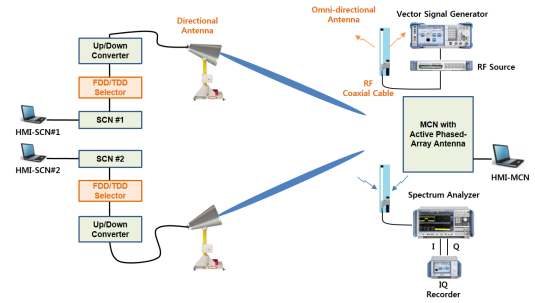


그림 17. ST-DSA 웨이브폼 테스트베드 구성
Fig. 17. Configuration of ST-DSA Waveform Test-bed

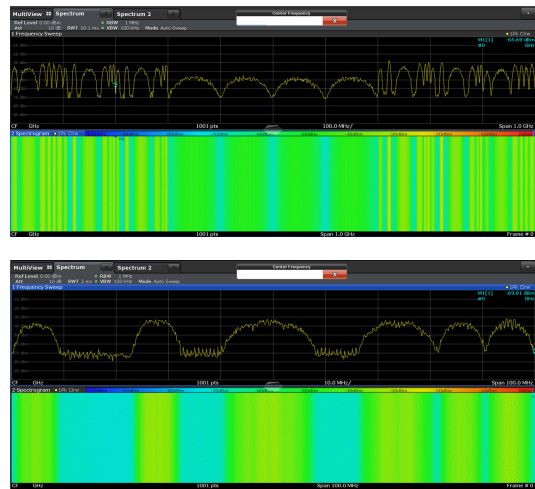


그림 18. 신호 수집부에서 관측한 무선환경 모의신호 스펙트럼
Fig. 18. Frequency Spectrum of Simulated Radio Signals Observed in Signal Collection Equipments

4.1 빔 포인팅 시험

그림 19는 빔 포인팅 기능을 수행 중인 HMI-MCN PC의 GUI를 보여준다. 초기 운용 시 빔 포인팅 단계에 접어들면 GUI의 채널 설정 상태 대화 상자에 빔

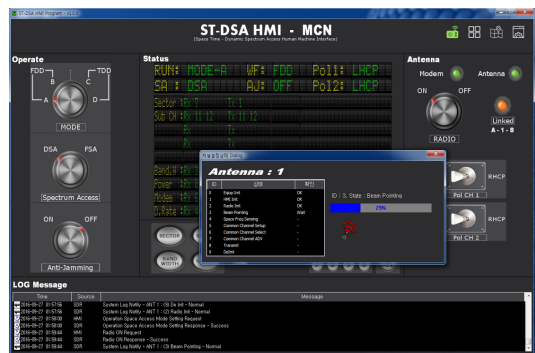


그림 19. 빔 포인팅 단계에서의 GUI 화면
Fig. 19. GUI Screen in Channel Pointing Phase

포인팅 프로토콜의 진행 상태를 나타내는 막대와 메시지가 표시된다. 빔 포인팅 기능이 성공적으로 수행되면 일정 시간동안 공간주파수 스펙트럼 센싱을 통해 각 단말이 속한 무선환경을 인식한 후 채널 설정 단계로 돌입한다.

4.2 스펙트럼 센싱 및 채널 설정 시험

각 단말의 스펙트럼 센싱 기능과 채널 설정 단계의 단말 간 채널 정보 교환/채널 선택/채널 광고 기능, PSO 알고리즘을 통한 최적 주파수 채널 선택 기능의 동작성은 그림 20과 같이 신호 수집부의 스펙트럼 분석기를 통해 확인할 수 있다. 좌측 상단 화면의 스펙트럼 및 Waterfall plot은 모의신호 생성부를 통해 송신된 무선환경 신호들을 측정된 것이다. 표시된 A/B/C 대역 외에는 다른 신호들에 의해 점유되어 있으며, ST-DSA 웨이브폼의 동작성이 입증되려면 채널 설정 단계 이후 관측되는 MCN과 SCN 단말 간 데이터 채널이 A/B/C 대역 내에 속하도록 결정되어야 할 것이다. 우측 하단 화면은 채널 설정 단계 이후 ST-DSA 단말 간 데이터 채널이 결정된 시점의 스펙

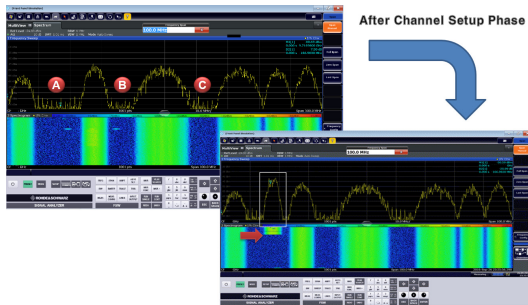


그림 20. 주파수 스펙트럼 관측을 통한 센싱 및 채널 설정 시험
Fig. 20. Sensing and Channel Setup Test by Observing Frequency Spectrum Change

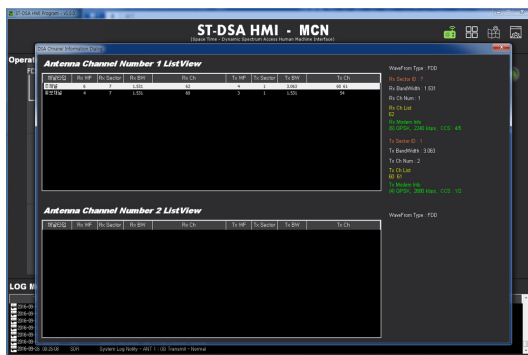


그림 21. 채널 설정 단계에서의 GUI 화면
Fig. 21. GUI Screen in Channel Setup Phase

트럼과 Waterfall plot을 보여준다. 데이터 채널은 A 대역 내 하얀 테두리로 표시된 부분에 형성되었으며, 채널이 형성된 시점은 Waterfall plot에 붉은 화살표로 나타내었다. 이를 통해 ST-DSA 웨이브폼의 스펙트럼 센싱 및 채널 설정 기능들이 정상 동작함을 확인할 수 있다.

그림 21은 채널 설정 단계에서 동작하는 MCN의 GUI를 보여준다. 사용자는 GUI를 통해 PSO 알고리즘으로 도출된 송/수신 채널 각각의 웨이브폼 모드와 주파수 채널 및 대역폭을 확인할 수 있다.

4.3 데이터 통신 시험

그림 22는 데이터 통신 단계에서 HMI GUI의 어플리케이션부를 통해 영상 및 음성 신호를 전송하는 것을 보여준다. GUI 좌상단에 RX라 쓰여있는 부분에는 현재 수신 중인 영상을, 그 아래 TX라 쓰여있는 부분은 현재 송신 중인 영상을 보여준다. 중앙 상단부에 위치한 파형은 수신된 음성 신호를 보여주며, 중앙 하단부는 HMI와 연결된 마이크에서 인식되어 상대 단말로 송신되는 음성 신호 파형을 보여준다.

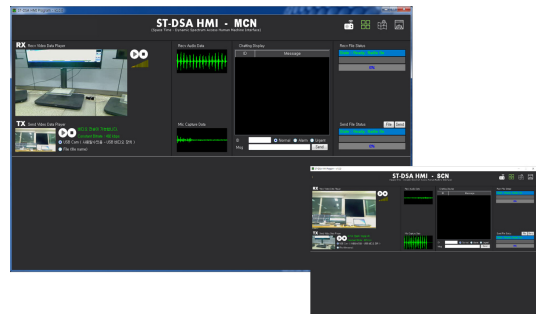


그림 22. GUI를 이용한 데이터 통신
Fig. 22. Data Communication using GUI

4.4 채널 이동 시험

그림 23은 채널 이동 시험 시 신호 수집부를 통해 관측한 스펙트럼 및 Waterfall plot을 보여준다. 그림 20의 흰색 박스로 표시된 채널에서 통신하던 ST-DSA 단말은, 그림 23의 좌측 상단 화면에서 붉은색 박스로 표시된 간섭 신호가 삽입되어 같은 화면의 흰색 박스로 표시된 대역으로 이동하게 된다. 이때, 흰색 박스로 표시된 대역은 ST-DSA 단말이 PSO 알고리즘을 통해 사전에 도출해놓은 예비 주파수 채널로 판단할 수 있으며, ST-DSA 단말은 CRC 오류검출 혹은 스펙트럼 센싱을 통해 간섭 신호를 검출하여 정상적으로 채널 이동 기능을 수행하였음을 확인할 수 있다. 그림

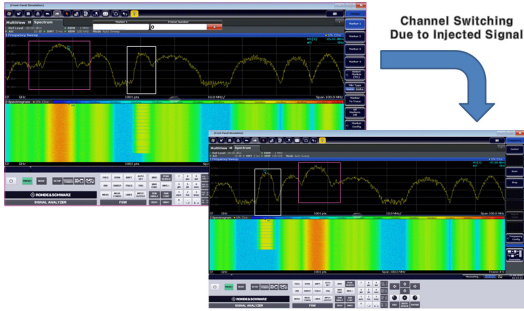


그림 23. 간섭 신호 삽입을 통한 채널 이동 시험
Fig. 23. Channel Switching Test by Injecting Interference Signal

23의 우측 하단 화면은, 채널 이동을 이미 수행하여 좌측 상단 화면의 흰 박스 대역에서 운용되는 ST-DSA 단말들에게 재차 간섭 신호를 삽입할 경우의 동작을 보여준다. ST-DSA 단말은 우측 하단 화면의 붉은색 박스로 표시된 간섭 신호를 피해 같은 우측 하단 화면의 흰 박스로 표시된 대역으로 채널 이동하며, 이를 통해 PSO 알고리즘을 통한 예비 주파수 채널 업데이트가 지속적으로 이루어짐을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 시간과 공간상의 유희대역을 동적으로 식별/활용하는 ST-DSA 기술의 웨이브폼 설계/구현 및 시험 결과에 대해 기술하였다. ST-DSA 웨이브폼은 스펙트럼 센싱 및 빔 포인팅 기능을 포함한 물리 계층과 단말 간 채널 설정 기능을 주관하는 Link/MAC계층, 사용자 인터페이스를 제공하는 응용 계층으로 구분하여 설계하였으며, SBC/DSP/FPGA 보드들로 이루어진 SDR 하드웨어 플랫폼 구현 구조를 제시하였다. ST-DSA 웨이브폼의 각 계층 별 주요 기능의 검증을 위해 MATLAB 기반의 시뮬레이터와 실 환경 테스트베드를 구축하였고, 시험을 통해 그 동작성을 입증하였다.

References

[1] Bruce A. Fette, *Cognitive Radio Technology*, 2nd Ed., Academic Press, 2009.
[2] Y. J. Hyun and K. S. Kim, "Efficient energy detection method in poor radio environment for cognitive radio system," *J. Korea Contents Assoc.*, vol. 7, no. 7, pp. 60-67, Jul. 2007.

[3] J. S. Kim, H. S. Lee, S. H. Hwang, J. K. Min, K. H. Kim, and K. S. Kim, "Development of MAC function for the spectrum sensing based on cognitive radio," *J. Korea Contents Assoc.*, vol. 8, no. 8, pp. 28-36, Aug. 2008.
[4] H. S. Lee and K. S. Kim, "Implementation of spectrum sensing module based on IEEE 802.22 WRAN," *J. Korea Contents Assoc.*, vol. 9, no. 3, pp. 39-48, Mar. 2009.
[5] S. Y. Lim and T. J. Lee, "Efficient channel sensing for cognitive radio wireless communication systems," in *Proc. KICS ICC 2009*, pp. 448-449, Jeju Island, Korea, Jun. 2009.
[6] H. S. Han, B. J. Lee, and S. H. Rhee, "Error adaptive MAC protocol for efficient use of spectrum resource in cognitive radio networks," in *Proc. KICS ICC 2008*, pp. 1102-1105, Jeju Island, Korea, Jul. 2008.
[7] S. H. Hwang, J. K. Min, Y. W. Park, and K. H. Kim, "Design and implementation of sensing MAC module for cognitive radio terminal system," *J. KICS*, vol. 35, no. 4, pp. 704-712, Apr. 2010.
[8] L. H. Park, K. H. Kim, S. H. Hwang, and S. R. Cho, "Statistical admission control scheme for cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 35, no. 10, pp. 1479-1486, Oct. 2010.
[9] J. S. Kim, S. H. Kim, and S. M. Kim, "Distributed MAC for secondary system based on adaptive sensing period technique," in *Proc. KICS ICC 2013*, pp. 197-198, Gangwon-do, Korea, Jan. 2013.
[10] S. B. Um, K. E. Lee, W. G. Seo, and J. B. Lee, *Radio set system and setting channel method for the radio set system*, Korean Patent, 10-1832971, filed on Sep. 13, 2016, and issued on Feb. 21, 2018.
[11] Carl R. Stevenson, et al., *Functional requirements for the 802.22 WRAN standard*, IEEE 802.22-05-007-48-0000, Nov. 2006.
[12] IEEE P802.22, Draft Standard for Wireless Regional Area Networks Part 22: *Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*:

Policies and procedures for operation in the TV Bands.

- [13] F. Perich, "Policy-based network management for NeXt generation spectrum access control," *IEEE Dyspan 2007*, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [14] SRI Project No. 16763, Cognitive Policy Radio Language(CoRaL), *A Language for Spectrum Policies XG Policy Language*, Version 0.1, Apr. 2007.
- [15] S. N. Bae, S. B. Um, and K. E. Lee, "Multi-dimensional dynamic spectrum access technology for the point to point wireless communication links," *KIMST Conf.*, pp. 1131-1132, Jun. 2015.
- [16] B. Sklar, *Reed Solomon Codes. Englewood Cliffs*, NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [17] L. J. Deutsch, *The effects of Reed-Solomon code shortening on the performance of coded telemetry systems*, TDA Progress Report 42-75, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., pp. 14-20, Nov. 1983.
- [18] The Mathworks Inc., *Reed-Solomon Coding Part III - Shortening*, Retrieved May 02, 2019, from <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/reed-solomon-coding-part-iii-shortening.html>.

음 수 빈 (Soo Bin Um)



2012년 2월 : 한양대학교 미디어통신공학과 졸업
2014년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
2014년 2월~현재 : 국방과학연구소 연구원

<관심분야> 통신이론, 정보이론, 인지무선, 전술통신체계, 위성 데이터링크

[ORCID:0000-0002-1133-0027]