

통신 신호 방향 탐지를 위한 광대역 다중 채널 수신기 개발

장재원^{*,1)} · 안준일¹⁾ · 주증민¹⁾ · 이동원¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제2기술연구본부

Development of Wideband Multi-Channel Receiver for Direction Finding of Communication Signals

Jaewon Chang^{*,1)} · Junil Ahn¹⁾ · Jeungmin Joo¹⁾ · Dongweon Lee¹⁾

¹⁾ The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 10 March 2021 / Revised 28 June 2021 / Accepted 10 August 2021)

Abstract

In wireless environments, wideband receivers are used in a communication intelligent system to detect unknown signals and obtain azimuth information. To design a wideband receiver that performs multiple signal detection and direction finding simultaneously, it is necessary to consider a reception structure composed of multiple channels. In this paper, we propose a wideband multi-channel receiver for direction finding of unknown wideband communication signals including frequency hopping signals. A signal processing method for detecting received signals and estimating azimuth information is presented, and components of the manufactured wideband receiver are described. In addition, test results of the signal detection performance by mounting the proposed wideband multi-channel receiver on the flight system are included.

Key Words : Electronic Warfare(전자전), Electronic Support(전자 지원), Communication Signal(통신 신호), Direction Finding(방향 탐지), Wideband Receiver(광대역 수신기)

1. 서론

무선 환경에서 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하여 데이터를 송수신하기 위하여 다양한 형태의 통신 시스템이 개발되어 활용되고 있다. 무선 데이터의 전송 용량 증대를 위한 고속 데이터 송수신 구현

을 위하여 광대역 주파수 자원을 활용하는 통신 시스템이 일반적으로 활용된다. 또한 무선 통신 환경에서 감청이나 재밍 피해를 입지 않고 신뢰성 있는 통신을 보장하기 위하여 광대역을 이용한 고속의 주파수 도약 신호가 활용된다. 이와같은 무선 환경에서 미상의 광대역 신호를 탐지하고 해당 신호의 도래 방위각을 획득하기 위해서는 고속 디지털 신호 처리가 적용된 광대역 수신기가 활용되고 있다^[1].

광대역 통신 신호의 탐지(SD : Signal Detection) 및

* Corresponding author, E-mail: jaewon2834@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

방향 탐지(DF : Direction Finding)를 수행하기 위해서는, 다수의 통신 신호가 혼재되어 있는 무선 환경에서 출현하는 미상 신호의 탐지 및 복조가 이루어져야 한다²⁾. 특히 광대역에 걸쳐서 빠른 속도로 주파수 변환하여 출현하는 주파수 도약 신호의 탐지가 필수적이다. 미상의 주파수 도약 신호에 대한 탐지 및 제원정보 추출을 위하여 신호원의 주파수 특성 분석을 이용하거나 시간-주파수 스펙트로그램 기반 알고리즘³⁻⁵⁾을 적용하는 등의 다양한 방법이 연구 및 적용되어 왔다. 또한 신호원의 도래 방위각을 알아내기 위한 방향 탐지 방법은 광대역 주파수를 활용하는 주파수 도약 신호 또는 광대역 신호를 방향 탐지하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다^{6,7)}.

다양한 신호가 혼재되어 있는 광대역의 무선 환경에서, 출현하는 주파수 도약 신호를 포함하는 다수 광대역 신호들을 고속으로 탐지하고 동시에 방향 탐지를 수행하기 위해서는 광대역 다중 채널 수신기를 활용한 병렬적 신호 처리 구조가 필요하며, 신호 탐지를 위한 광대역 수신기 및 방향 탐지를 위한 광대역 수신기의 유기적인 동작을 위한 동기화 확보가 필수적이다.

본 논문에서는 미상의 통신 신호 탐지 및 방향 탐지를 수행하는 통신 신호 탐지 시스템에 적용될 광대역 다중 채널 수신기를 설계하고 제작하여 성능을 확인하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 광대역 다중 채널 수신기의 설계에 대하여 설명하고, 3 장에서는 해당 수신기에 적용된 광대역 채널화 방향 탐지 방법을 기술하며, 4 장에서는 해당 수신기의 제작 및 시험 결과를 제시하고, 5 장에서 결론을 맺는다.

2. 광대역 다중 채널 수신기 설계

2.1 광대역 다중 채널 수신기 구조

본 논문에서는 전자전 통신 신호정보 수집체계에서 실제 운용중인 미국 L3HARRIS사의 BLACKROCK 수신기 또는 이스라엘 IAI사의 ELK-7071 수신기 동등 이상의 수신 성능과 신호 탐지 성능을 보유하기 위하여 광대역 통신 신호의 탐지 및 도래 방위각 탐지를 위한 통신 신호 탐지 시스템에 적용될 광대역 다중 채널 수신기를 설계하였다. VHF(Very High Frequency) 및 UHF(Ultra High Frequency) 대역에 존재하는 통신 신호 수신을 위한 광대역 다중 채널 수신기는 VHF

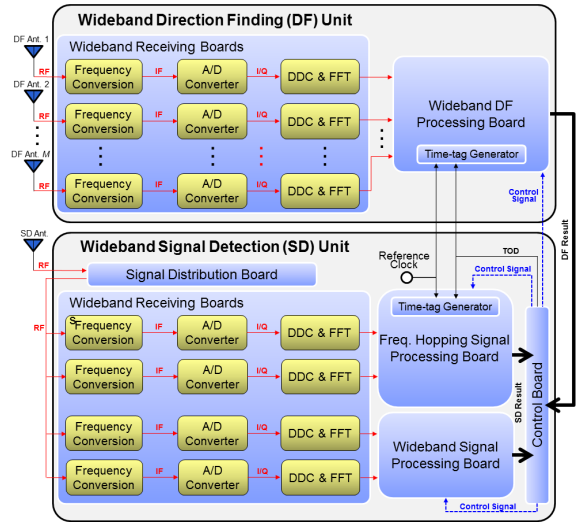


Fig. 1. Wideband multi-channel receiver for communication signal detection system

(Very High Frequency) 범위 기준 10 % 이상의 대역폭에 존재하는 통신 신호를 동시에 수신하여 처리하기 위한 수신 대역폭을 보유하도록 설계되었으며, Fig. 1과 같이 광대역 방향 탐지부(Wideband Direction Finding Unit), 광대역 신호 탐지부(Wideband Signal Detection Unit), $M + 1$ 개의 안테나로 구성된다.

광대역 방향 탐지부는 M 개의 방향 탐지 안테나로부터 광대역 무선 RF(Radio Frequency) 신호를 수신하고, 동일하게 설계된 B MHz 대역폭을 갖는 M 개의 다중 채널 광대역 수신판(Wideband Receiving Board)에 전달한다. 통신 신호 수신 주파수 범위인 VHF/UHF 전 대역에 대하여 요구되는 방향 탐지 정확도를 확보하기 위하여 M 개의 안테나 및 M 개의 광대역 수신판이 적용되었으며, 수신된 M 개 RF 신호들의 위상 비교를 통하여 주파수 도약 신호를 포함하는 다수 광대역 신호들의 방향을 고속으로 동시에 탐지하기 위한 광대역 채널화 방향 탐지 기법이 적용된다.

광대역 신호 탐지부는 1 개의 신호 탐지 안테나로부터 광대역 무선 RF 신호를 수신하고, 수신한 신호를 동일하게 설계된 B MHz 대역폭을 갖는 4 개 광대역 수신판의 입력으로 사용한다. 무선 RF 신호 수신 시, 별도의 신호 탐지 안테나를 사용하지 않고 M 개의 방향 탐지 안테나로부터 신호를 분기하여 광대역 신호 탐지에 사용할 수 있다. 그러나 광대역 방향 탐지부에 동시에 분기되어 전달될 수신 신호는 신호 세

기 저하 및 위상 특성 변화로 인한 성능 열화의 원인이 되기 때문에 별도의 신호 탐지 안테나를 사용하는 구조를 적용하였다.

신호 탐지 안테나에 수신된 단일 RF 신호는 광대역 신호 탐지부의 신호 분배판(Signal Distribution Board)을 통하여 분배되어 광대역에 걸쳐서 발생하는 주파수 도약 신호 및 광대역 미상 고정 신호를 동시에 검출하기 위한 다수개의 광대역 수신판에 전달된다. 광대역 수신판에 전달된 RF 신호는 주파수 하향 변환(Frequency Conversion)을 통한 기저대역 IF(Intermediate Frequency) 신호로 변환되며, A/D 변환기(Analog-to-Digital Converter) 및 DDC(Digital Down Converter), FFT(Fast Fourier Transform)을 통하여 광대역 신호에 대한 디지털 I/Q(In-phase/Quadrature-phase) 데이터로 병렬적으로 생성된다.

광대역 수신판에서 각각 병렬적으로 생성된 I/Q 데이터는 광대역 방향 탐지부의 광대역 방향 탐지 처리판(Wideband DF Processing Board), 광대역 신호 탐지부의 주파수 도약 신호 처리판(Frequency Hopping Signal Processing Board) 및 광대역 신호 처리판(Wideband Signal Processing Board)에 입력되며, 입력된 데이터는 광대역에 존재하는 신호들에 대한 방향 탐지 및 신호 탐지를 위하여 사용된다.

광대역 방향 탐지부의 광대역 방향 탐지 처리판은 광대역에 존재하는 신호들에 대한 광대역 채널화 방향 탐지를 수행하며, 결과를 광대역 신호 탐지부의 제어판(Control Board)으로 전달한다. 광대역 신호 탐지부의 주파수 도약 신호 처리판은 주파수 도약 신호를 탐지하고 제원을 분석하며, 광대역 신호 처리판은 광대역에 존재하는 미상의 고정 신호를 탐지한다. 주파수 도약 신호 처리판과 광대역 신호 처리판의 신호 탐지 결과는 광대역 신호 탐지부의 제어판으로 전달된다.

2.2 광대역 다중 채널 수신기의 시간 동기화

광대역 다중 채널 수신기의 광대역 방향 탐지부 및 광대역 신호 탐지부는 광대역 신호 탐지부 구성품인 제어판의 명령에 의하여 동작하며 광대역 신호 탐지부의 기준 신호(Reference Clock)와 제어판 TOD(Time of Day) 정보를 공통으로 입력받아 동작하는 시간 태그 생성기(Time-tag Generator)를 각각 포함한다.

광대역 방향 탐지부와 광대역 신호 탐지부는 Fig. 2와 같은 시간 태그 생성기를 이용한 클럭 동기화에 의하여 상호간의 시간 동기를 확보하는 것이 가능하다.

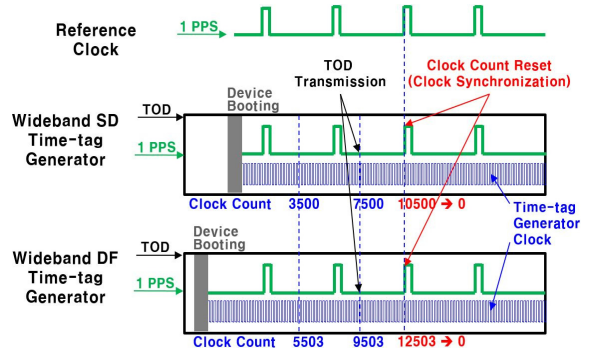


Fig. 2. Clock synchronization

다. 제어판이 입력받은 광대역 방향 탐지 결과와 신호 탐지 결과는 주파수 정보 및 동기화된 시간 정보를 포함하며, 주파수/시간 정보가 일치하는 방향 탐지 결과와 신호 탐지 결과를 결합하여 최종적으로 광대역에 존재하는 통신 신호 탐지 결과를 생성한다.

시간 동기 확보를 위한 시간 태그 생성기 내부에서는 각 탐지부가 부팅된 후 개별적인 시간 태그 생성기 클럭(Time-tag Generator Clock)이 초 단위 미만의 시간 정보 생성을 위하여 동작하며, 기준 클럭(reference clock)인 1 PPS(Pulse Per Second) 신호와 연/월/일/시/분/초 정보에 해당하는 TOD(Time of Day) 정보를 입력받게 된다. 시간 태그 생성기 클럭의 클럭 수(Clock Count)는 TOD 정보를 수신한 뒤 최초 발생하는 1 PPS 기준 신호에 의하여 초기화(Clock Count Reset)됨으로써 초 단위 미만의 시간에 대한 clock synchronization 확보를 위하여 사용된다. 이와 같이 초 단위 미만으로 동기 된 시간 정보는 초당 수천 홉의 주파수 변환이 고속으로 발생하는 주파수 도약 신호의 신호 탐지 정보와 방향 탐지 정보를 결합하기 위하여 사용된다.

3. 광대역 채널화 방향 탐지

3.1 위상 비교 방향 탐지

다수개의 안테나에 수신된 신호 간 위상차를 이용하는 위상 비교 방향 탐지는 넓은 주파수 대역에서 신호원의 방향을 정확하게 추정할 때 사용되는 방식이다. 신호원에서 송신되는 신호가 특정 방위각으로 M 개의 안테나에 도달했을 때, 각 안테나에 수신된 신호의 도착 시간 차이에 의하여 수신되는 신호 사이의 위상차가 결정된다. 이러한 안테나에 수신된 신호

간 위상차는 수신 신호의 주파수 f 와 도래 방위각 θ , 안테나 사이의 떨어진 거리 d 의 함수로 결정되기 때문에, 해당 주파수별 M 개의 안테나에 도달한 신호 사이의 위상차로 도래 방위각 θ 를 추정하는 것이 가능하다. 따라서 신호원의 방위각에 의하여 결정되는 위상에 대한 방사 보정 데이터(Radiation Calibration Data)를 사전에 알고 있어야만 하며, 수신 안테나들의 이득 패턴과 시스템 외관 플랫폼 형태, 재질에 따른 영향성이 반영된 위상차로 구성된 주파수 및 방위각 별 위상의 방사 보정 데이터가 필요하다⁸⁾.

도래 방위각 θ 로 신호가 수신될 때 i 번 안테나에 수신된 신호의 위상이 ρ_i 인 경우 기준 안테나(1 번 안테나) 대비 i 번 안테나에 수신되는 신호는 $d_{i1}\sin\theta$ 의 거리만큼 시간 지연이 발생하며, 기준 안테나와 i 번 안테나에 수신되는 신호 간 상대 위상 ϕ_i 는 입사 신호의 파장이 $\lambda=c/f$ (c : 전파속도) 일 때 식 (1)과 같이 발생한다.

$$\phi_i = \rho_i - \rho_1 = \frac{2\pi}{\lambda}d_{i1}\sin\theta \quad (1)$$

기준 안테나와 M 개 수신 안테나에 수신된 신호 사이의 상대 위상 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M$ 를 이용하여 방향 탐지

에 사용될 $K = {}_M C_2$ 개 조합의 위상차 데이터(Phase Difference Data) $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K]$ 를 생성할 수 있으며, 위상차 데이터 α_k 와 방위각 별 방사 보정 데이터 $\beta(\theta) = [\beta_1(\theta), \beta_2(\theta), \dots, \beta_K(\theta)]$ 와의 상관도 $\eta(\theta)$ 를 식 (2)와 같이 산출하고, 위상차 상관도 $\eta(\theta)$ 값이 최대인 θ 를 찾아 신호의 도래 방위각을 추정한다^{9,10)}.

$$\arg \max_{0^\circ \leq \theta < 360^\circ} \eta(\theta) = \arg \max_{0^\circ \leq \theta < 360^\circ} \sum_{i=1}^K \cos(\alpha_i - \beta_i(\theta)) \quad (2)$$

3.2 광대역 신호 탐지 및 채널화 방향 탐지

광대역 방향 탐지부의 M 개 방향 탐지 안테나로부터 RF 신호를 입력 받아 광대역 채널화 방향 탐지를 수행하기 위하여, M 개의 광대역 수신관은 입력되는 RF 신호를 증폭, 필터링 및 주파수 하향 변환하여 IF 신호를 생성한다. 주파수 하향 변환된 M 개 채널의 IF 신호는 ADC(Analog to Digital Converter)를 통하여 디지털이징 되며, Fig. 3과 같은 과정으로 디지털 신호 처리 되어 광대역 채널화 방향 탐지 결과를 생성한다. 원거리 미약 신호의 방향 탐지를 포함하는 80 dB 이상의 수신 동적 범위를 확보하기 위하여 16 비트 ADC를 적용하였으며, ADC 인터페이스를 통하여 16

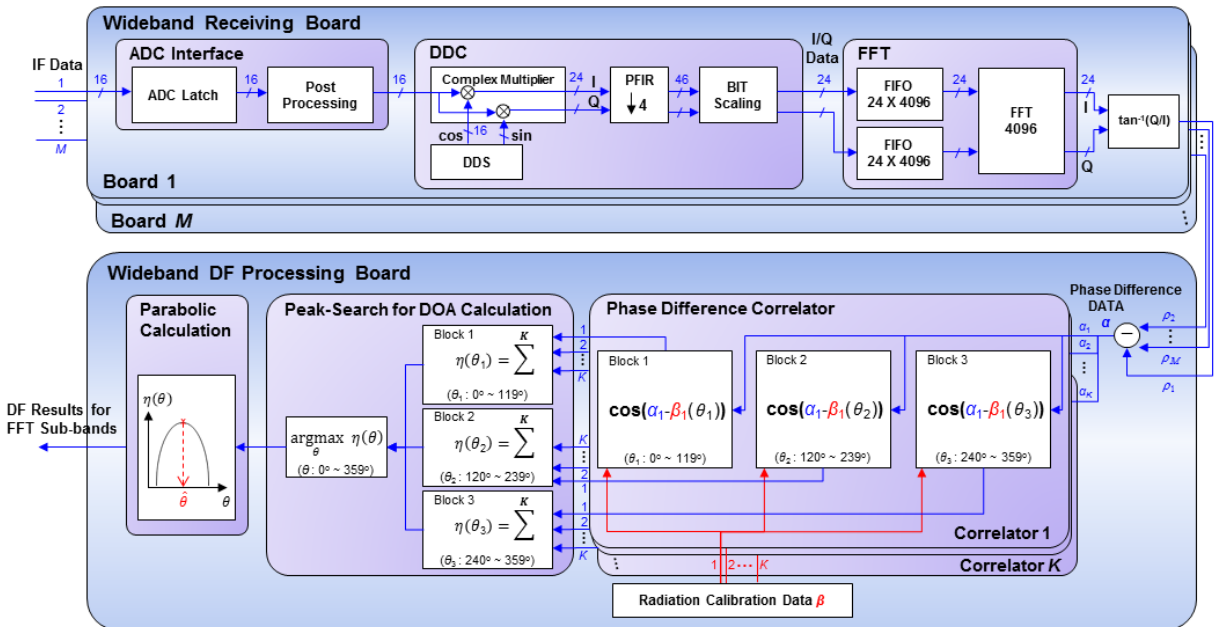


Fig. 3. Digital signal processing block diagram of wideband channelized direction finding

비트 디지털 데이터로 생성된 IF 신호는 DDC(Digital Down Convertor)에 입력되어 I/Q(In-phase/Quadrature) 데이터 생성을 위한 기저대역 변환 및 다운 샘플링이 적용된다. 초당 수 μs ~ 수 ms 단위의 빠른 속도로 주파수를 변환하는 주파수 도약 신호를 탐지하기 위하여 광대역 I/Q 데이터는 약 27.4 μs 의 시간 동안 4096 개의 샘플링 데이터를 획득할 수 있도록 설계되었다. 광대역 채널화 방향 탐지를 수행하기 위하여 획득된 광대역 I/Q 데이터는 4096 point FFT(Fast Fourier Transform) 연산을 통하여 협대역으로의 부 채널화가 적용되며, 부 채널별로 생성된 I/Q 데이터는 \tan^{-1} 연산으로 부 채널 별 위상 산출에 사용된다. 다수 신호가 밀집되어 존재하는 통신 대역에서 광대역 수신기에 수신된 개별 신호를 수 kHz 해상도로 분리 식별하고 위상 비교 방향 탐지를 동시에 수행하기 위하여 4096 point FFT를 적용하였다. 광대역 수신판의 디지털 신호 처리를 통하여 광대역 채널화 방향 탐지에 사용되는 위상 개수는 부 채널 개수와 동일한 최대 4096 개이나, 광대역 I/Q 데이터의 신호 레벨 저하가 발생하는 좌우 가드 밴드 데이터를 제외한 3200 개 부 채널 위상 데이터를 방향 탐지에 사용한다.

광대역 방향 탐지 처리판은 M 개의 광대역 수신판으로부터 $M \times 3200$ 개의 신호 세기 및 위상 데이터를 입력 받으며, 1 번 광대역 수신판에서 처리된 위상 데이터를 기준으로 처리된 $M \times 3200$ 개의 위상 데이터를 생성한다. 단일 부 채널을 기준으로 생성된 M 개의 위상 데이터를 이용하여 $K = M C_2$ 개 조합의 위상차 데이터 α 를 생성할 수 있으며, 생성된 위상차 데이터 α 와 방위각 별 방사 보정 데이터 β 는 방위각 별 상관도 연산을 위하여 위상차 상관기(Phase Difference Correlator)에 입력된다.

방향 탐지 안테나로 수신된 M 개의 수신 신호가 방향 탐지 결과를 신뢰할 수 있는 임계값 이상의 신호 세기로 수신될 경우 위상차 상관기는 최대 $M C_2$ 개 동작하며, 수신 신호 환경 변화에 따라서 $M - 1$ 개의 신호가 임계값 이상으로 수신될 경우 최대 $M_1 C_2$ 개 조합의 위상차 데이터를 생성하여 위상차 상관기를 동작시킨다.

위상차 상관기는 3200 개 부 채널의 방향 탐지 결과 획득을 위하여 전 방위각에 대한 위상차 비교를 수행하며, 방위각 해상도 1° 기준 $K \times 360 \times 3200$ 의 복잡도를 갖는다. 이와 같은 복잡도의 신호 처리 시간을 단축하고 광대역 신호 및 주파수 도약 신호에 대

한 방향 탐지 결과를 신속하게 획득하기 위하여 전 방위각을 3 개의 범위로 나누어 $K \times 120 \times 3200$ 의 복잡도로 위상차 데이터 α 와 방사 보정 데이터 β 사이의 상관 계수를 연산하는 병렬적 신호 처리 구조를 적용하였다.

생성된 K 개 상관 계수를 합하여 방위각에 따라 산출된 상관도 $\eta(\theta_1), \eta(\theta_2), \eta(\theta_3)$ 는 방위각 계산을 위한 최대값 검출(Peak-Search for Direction Of Arrival Calculation)에 사용되며 최대 상관도 값을 갖는 방위각 θ 식별에 사용된다. 또한 θ 값의 인접 방위각 상관도 값을 포물선 연산(Parabolic Calculation)에 활용하여 1° 해상도 이내의 방향 탐지 결과 $\hat{\theta}$ 를 획득할 수 있다.

상기 기술된 신호 처리 과정은 Fig. 4와 같이 부 채널 별로 수행된다. 광대역 방향 탐지부 및 광대역 신호 탐지부의 광대역 수신판에서 Fig. 4(a)와 같이 임계레벨(threshold level) 이상의 신호에 대하여 신호 탐지 및 방향 탐지를 수행할 신호를 검출하면, 광대역 방향 탐지부의 광대역 방향 탐지 처리판에서 최대 3200 개

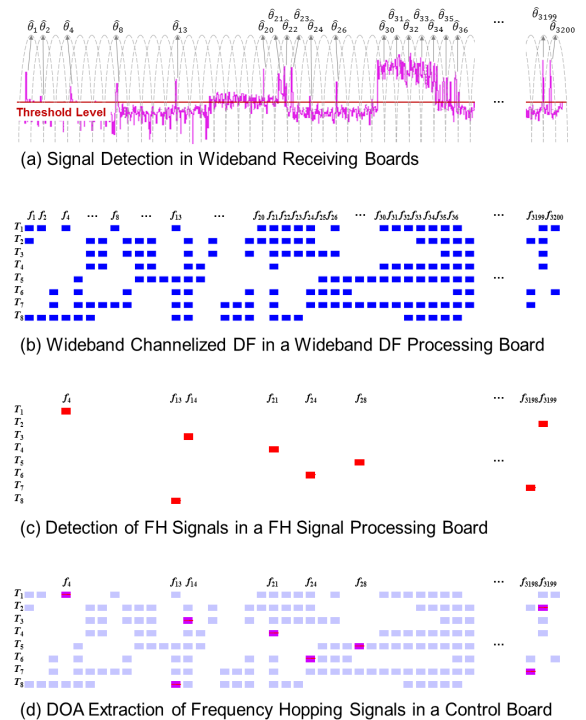


Fig. 4. Wideband channelized direction finding for frequency hopping signal detection

부 채널 중 임계 레벨 이상의 신호에 대한 방향 탐지 결과를 Fig. 4(b)와 같이 획득하여 주파수/시간 정보와 함께 광대역 신호 탐지부의 제어판으로 전달한다. 또한 광대역 신호 탐지부의 주파수 도약 신호 처리판에서는 임계 레벨 이상의 신호 중에서 주파수 도약 신호에 대한 신호 분석 및 제원을 Fig. 4(c)와 같이 추출하여 주파수/시간 정보와 함께 제어판으로 전달한다. 주파수 도약 신호에 대한 방향 탐지 결과와 신호 분석 및 제원 정보를 수신한 제어판은 Fig. 4(d)와 같이 주파수/시간 정보가 일치하는 결과만을 매칭하여 주파수 도약 신호 탐지 결과로 사용한다.

3.3 광대역 채널화 방향 탐지의 자원 할당

광대역 통신 신호의 방향 탐지 수행 시 정확도를 보장하기 위하여 광대역 다중 채널 수신기의 광대역 방향 탐지부는 M 개의 광대역 수신판을 포함한다. 다 채널 수신 구조의 복잡도를 필요로 하는 광대역 방향 탐지부는 광대역 신호와 주파수 도약 신호를 동시에 탐지하기 위하여 광대역 신호 탐지부에 수신되는 신호들에 대한 방향 탐지 결과를 각각 전송해야 하며, 이를 위하여 광대역 방향 탐지 결과 생성을 위한 효율적인 자원 할당이 필수적이다.

광대역 신호 탐지부는 Fig. 1과 같이 2 개 주파수 대역에서 B MHz 대역폭에 존재하는 신호를 동시에 탐지하기 위한 2 개 채널의 광대역 수신판을 포함하며, 1 개 주파수 대역에서 $2 \times B$ MHz 대역폭 내에 존재하는 주파수 도약 신호를 탐지하기 위한 2 개 채널의 광대역 수신판으로 구성된다. 광대역 수신판들은 정비 및 호환성을 위하여 모두 동일한 하드웨어 구조를 갖고 있으며, 제어판의 명령에 의하여 해당 주파수 대역에서 수신하여 처리된 I/Q 데이터를 주파수 도약 신호 탐지 및 광대역 신호 탐지를 위하여 연동되어 있는 각각의 신호 처리판으로 전달한다.

2 개 주파수 대역의 광대역 신호 탐지와 1 개 주파수 대역의 주파수 도약 신호 탐지를 동시에 수행하고 탐지된 신호들의 방향 탐지를 각각 수행하기 위하여 광대역 다중 채널 수신기의 광대역 방향 탐지부와 광대역 신호 탐지부에는 Fig. 5의 동작 흐름도가 적용된다.

광대역 신호 탐지부의 제어판에서 발생하는 광대역 신호 및 주파수 도약 신호 탐지 명령에 따라서 해당 흐름도는 1 s 시간 주기로 동작하며, 광대역 신호 탐지를 위한 광대역 채널화 방향 탐지가 수행되고 주파수 도약 신호에 대한 광대역 채널화 방향 탐지가 수행된다.

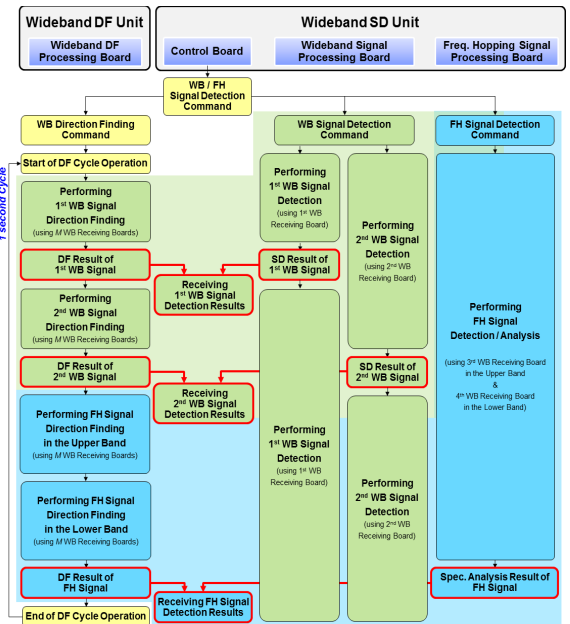


Fig. 5. Operation flow chart of wideband direction finding unit and wideband signal detection unit

수 도약 신호에 대한 광대역 채널화 방향 탐지가 수행된다. 광대역 신호 탐지에 소요되는 광대역 신호 처리판의 연산 시간은 주파수 도약 신호 탐지 및 분석을 위한 주파수 도약 신호 처리판 연산 시간보다 짧기 때문에 광대역 신호 탐지를 위한 광대역 채널화 방향 탐지가 선행된다.

제어판으로부터 신호 탐지 명령을 수신한 광대역 방향 탐지 처리판은 2 개 주파수 광대역 신호에 대한 채널화 방향 탐지와 1 개 주파수 도약 신호에 대한 채널화 방향 탐지를 광대역 방향 탐지부 M 개 광대역 수신판에서 처리된 RF 수신 신호를 활용하여 순차적으로 수행한다. 1 s 단위의 시간 자원을 시분할 하여 첫 번째 주파수 광대역 신호에 대한 채널화 방향 탐지를 수행한 뒤 결과를 제어판으로 전송하고, 두 번째 주파수 광대역 신호에 대한 채널화 방향 탐지를 수행한 뒤 결과를 제어판으로 전송한다. 광대역 신호 방향 탐지를 종료한 뒤, 주파수 도약 신호 방향 탐지를 위하여 주파수 도약 신호의 상위 B MHz 대역에 대한 채널화 방향 탐지, 하위 B MHz 대역에 대한 채널화 방향 탐지를 시분할 하여 순차적으로 수행한 뒤 결과를 제어판으로 전송한다.

신호 탐지 명령을 제어판으로부터 수신한 광대역 신호 처리판은 2 개 주파수 광대역 신호 탐지를 2 개의 독립적인 광대역 수신판에서 처리된 RF 수신 신호를 활용하여 지속적으로 수행하고 탐지 결과를 해당 신호의 방향 탐지 결과가 생성되는 시점에 제어판으로 전달한다. 광대역 신호 처리판에서 탐지된 신호의 주파수 정보와 일치하는 광대역 채널화 방향 탐지 결과를 제어판에서 결합하여 최종적인 광대역 신호 탐지 결과를 생성한다.

주파수 도약 신호 탐지 명령을 제어판으로부터 수신한 주파수 도약 신호 처리판은 $2 \times B$ MHz 의 광대역에 걸쳐서 빠른 속도의 주파수 변화가 발생하는 도약 신호를 2 개의 광대역 수신판을 이용하여 지속적으로 수집한다. 주파수 도약 신호 수집 및 분석은 1 s 시간 단위로 수행되며, 주파수 도약 신호의 시작 시간, 유지 시간, 그리고 도약 주파수를 포함하는 도약 정보를 생성하는 블라인드 도약 정보 생성 기법^[3]을 이용하여 도약 신호를 분석한다. 수 초 단위 이상의 신호 유지 시간을 갖는 통신 신호 특성을 고려할 때, 1 s 시간 주기에서 ms 단위의 일부 시간 동안 수집된 도약 신호의 방향 탐지 결과로 정확한 주파수 도약 신호 방향 탐지 결과를 획득할 수 있기 때문에 광대역 신호 방향 탐지가 선행 된 후 주파수 도약 신호 방향 탐지가 수행되도록 광대역 채널화 방향 탐지의 자원을 할당한다.

주파수 도약 신호에 대한 광대역 채널화 방향 탐지는 ms 단위 시간 동안 수집된 광대역 방향 탐지부의 M 개 RF 수신 신호를 활용하여 3200 개 부 채널의 방향 탐지 결과를 광대역 신호 탐지부의 제어판으로 전달한다. 제어판은 주파수 도약 신호 처리판에서 탐지/분석된 도약 신호 제원 분석 결과를 활용하여, 도약 신호의 주파수/시간 정보와 일치하는 광대역 채널화 방향 탐지 결과들만을 추출하고 median 연산을 적용하여 1 개의 주파수 도약 신호 도래 방위각 결과로 생성한다. 주파수 도약 신호의 최종 도래 방위각 결과는 주파수 도약 신호의 제원 분석 결과와 결합되어 최종적인 주파수 도약 신호 탐지 결과에 적용된다.

광대역 신호 탐지부의 광대역 신호, 주파수 도약 신호 탐지 결과와 광대역 방향 탐지부에서 시분할하여 수집된 광대역 채널화 방향 탐지 결과를 결합하는 제안 방식은 별도 수신기에서 획득된 광대역 신호와 주파수 도약 신호의 방향 탐지 정보를 효율적으로 동시에 획득할 수 있으며, 주파수 도약 신호 제원 분석 결

과와 주파수/시간이 매칭되는 주파수 도약 신호 방향 탐지 결과의 일부 정보만을 이용하여 주파수 도약 신호 방향 탐지가 가능한 방식이다. 따라서 주파수 도약 신호를 검출하고 순차적으로 방향 탐지를 수행하는 기존 방식^[11] 보다 고속의 주파수 도약 신호에 대한 방향 탐지가 가능한 장점이 있다.

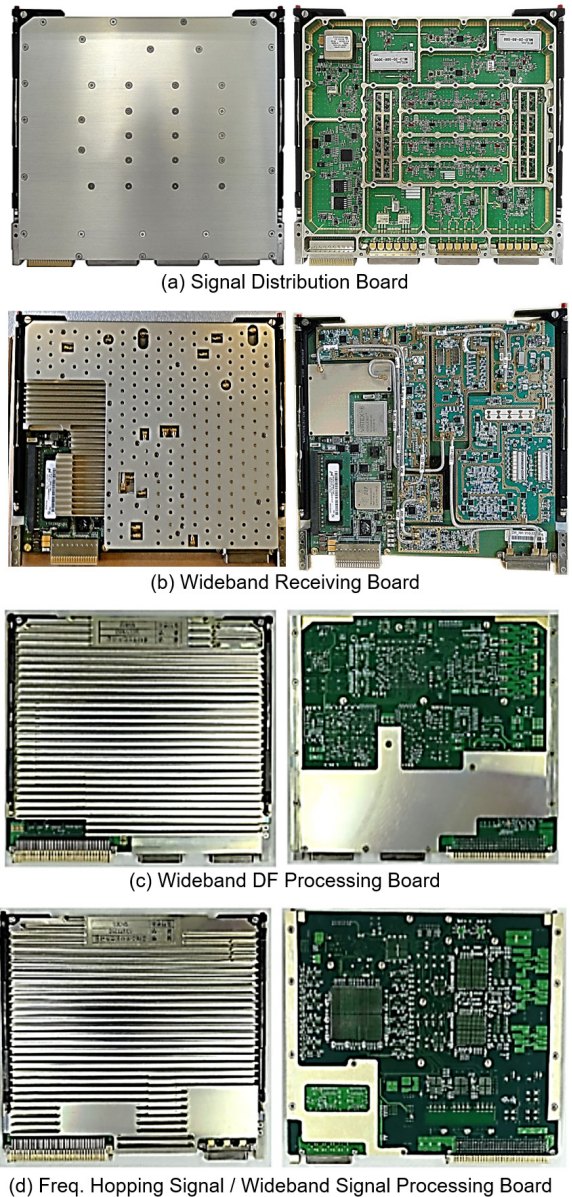


Fig. 6. Components of wideband multi-channel receiver

4. 광대역 다중 채널 수신기 제작 및 시험

4.1 광대역 다중 채널 수신기 제작 형상

광대역 다중 채널 수신기의 광대역 신호 탐지 및 주파수 도약 신호 탐지, 광대역 채널화 방향 탐지를 수행하기 위하여 상기 제안 방식을 적용한 광대역 다중 채널 수신기를 제작하였다. 광대역 다중 채널 수신기 구성을 위하여 Fig. 6과 같은 형상으로 광대역 방향 탐지부의 M 개의 광대역 수신판(Wideband Receiving Board), 1 개의 광대역 방향 탐지 처리판(Wideband DF Processing Board)을 제작하였으며, 광대역 신호 탐지부의 1 개의 신호 분배판(Signal Distribution Board), 4 개의 광대역 수신판(Wideband Receiving Board), 1 개의 주파수 도약 신호 처리판(Frequency Hopping Signal Processing Board), 1 개의 광대역 신호 처리판(Wideband Signal Processing Board)을 제작하였다. 각각의 형상은 $233 \times 200 \times 18$ mm (가로 \times 세로 \times 깊이) 이며, M 개의 방향 탐지 안테나와 1 개의 신호 탐지 안테나는 통신 대역에서 운용 가능한 수신 안테나 상용품을 사용하였고 광대역 신호 탐지부의 제어판은 기 개발되어 운용가능한 상용 SBC(Single Board Computer)를 적용하였다.

4.2 광대역 다중 채널 수신기 시험 결과

광대역 다중 채널 수신기의 광대역 통신 신호 탐지 성능을 확인하기 위하여, 광대역 신호 및 주파수 도약 신호의 모의 신호를 고정된 위치에서 방사하고 제작된 광대역 다중 채널 수신기를 비행하는 이동체에 탑재하여 성능 시험을 수행하였다. 광대역 방향 탐지부의 주파수 및 방위각별 위상의 방사 보정 데이터를 비행 보정을 통하여 획득하기 위한 구성과 동일한 시험 환경^[8]에서 모의 신호 방사 위치와 움직이는 이동체 위치는 100 km 이상 떨어진 조건을 유지하며 성능을 평가하였다.

방사된 광대역 모의 신호를 수신한 광대역 다중 채널 수신기를 통하여 B MHz 대역폭에 존재하는 신호를 탐지한 결과는 Fig. 7과 같으며, 수신된 광대역 신호의 스펙트럼(좌 상단)과 임계값 이상으로 동시에 탐지된 신호의 주파수 목록(우 중앙)을 방향 탐지 결과(우 하단)와 함께 확인하였다. 주파수 목록 신호 중에서 선택된 신호에 대한 이동체의 방향 탐지 결과들은 지도(좌 하단) 상에서 LOB(Line Of Bearing)의 형태로 전시하였으며, LOB의 교차점을 통하여 모의 신

호 방사 위치를 확인하였다. 광대역 신호 탐지 결과에 대한 임계값 이상의 탐지 신호의 시험 결과 데이터는 Table 1과 같으며, 탐지된 신호 중에서 사용자 선택된 376.996875 MHz 신호에 대한 방향 탐지 결과는 Table 2와 같다.

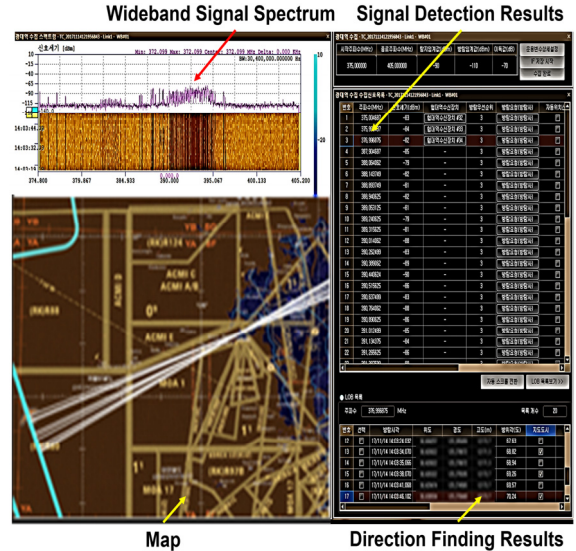


Fig. 7. Test result of wideband signal detection

Table 1. Test result data of wideband signal detection (frequency & signal level)

Frequency (MHz)	Signal level (dBm)	Frequency (MHz)	Signal level (dBm)
375.004687	-83	390.014062	-88
375.998437	-84	390.262499	-83
376.996875	-82	390.389062	-89
387.904687	-85	390.440624	-90
388.064062	-79	390.515625	-86
388.143749	-82	390.637499	-83
388.893749	-81	390.764062	-88
388.940625	-82	390.890625	-86
389.053125	-81	391.012499	-85
389.240625	-79	391.134375	-84
389.315625	-81	391.265625	-86

Table 2. Test result data of wideband signal detection (Direction finding result for 376.996875 MHz signal)

DF time	Angle of arrival (degree)
2017/11/14 14:03:24.032	67.63
2017/11/14 14:03:34.070	68.82
2017/11/14 14:03:35.066	68.94
2017/11/14 14:03:38.070	69.26
2017/11/14 14:03:41.068	69.57
2017/11/14 14:03:46.102	70.24

광대역 다중 채널 수신기의 주파수 도약 신호 탐지 성능을 Fig. 8과 같이 확인하였으며, 방사된 모의 신호를 주파수 도약 신호로 변경하여 광대역 신호 탐지 시험과 동일한 시험 조건에서 성능을 평가하였다. 주파수 도약 신호 탐지를 위하여 수신된 $2 \times B$ MHz 대역폭에 대한 수신 스펙트럼(좌)과 탐지된 주파수 도약 신호의 제원 분석 결과(우 중앙-지도 위)를 확인하였으며, 탐지된 도약 신호의 방향 탐지 결과를 목록(우 하단)과 지도(우 중앙) 상의 LOB로 확인하였다. 주파수 도약 신호 탐지 결과에 대한 탐지 신호 제원 결과 및 방향 탐지 결과 데이터는 Table 3과 같다.

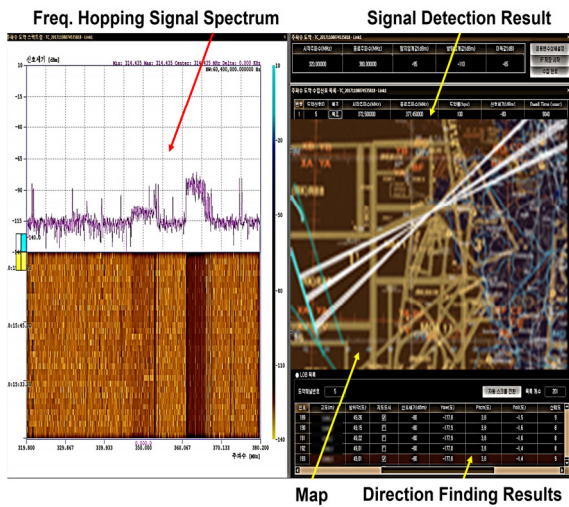


Fig. 8. Test result of frequency hopping signal detection

Table 3. Test result data of frequency hopping signal detection

Start frequency (MHz)	372.50
End frequency (MHz)	377.45
Hopping rate (hps)	100
Signal level (dBm)	-80
Dwell Time (μ s)	9040
Angle of arrival (degree)	49.26
	49.15
	49.22
	49.01
	49.01

5. 결론

본 논문은 통신 신호 탐지를 위하여 병렬적 수신 구조를 갖는 광대역 다중 채널 수신기 설계 방안에 대하여 살펴보았다. 광대역 채널화 방향 탐지가 적용된 광대역 다중 채널 수신기의 신호 처리 방법을 제안하고, 광대역 신호와 주파수 도약 신호를 동시에 처리하기 위한 광대역 채널화 방향 탐지 알고리즘 적용 방안을 제시하였다. 광대역 통신 신호 방향 탐지의 하드웨어 복잡도 감소와 효율적 자원 할당을 고려하여 광대역 다중 채널 수신기를 설계/제작하였으며 모의 신호 방사를 통한 수신기 성능을 확인하였다.

제안된 광대역 다중 채널 수신기를 통하여 미상의 광대역 통신 신호와 주파수 도약 신호에 대한 방향 탐지 및 신호 탐지를 효율적으로 수행하는 것이 가능하며, 특히 광대역에 걸쳐서 수천 홉 이상 고속으로 주파수를 변경하는 주파수 도약 신호 방향 탐지가 가능함을 확인하였다.

References

- [1] J. H. Lee and J. M. Woo, "Interferometer Direction-Finding System with Improved DF Accuracy Using Two Different Array Configurations," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 14, pp. 719-

- 722, 2015.
- [2] D. L. Adamy, *EW 103: Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare*, Boston/London, Artech House, 2009.
- [3] J. Chang and J. Joo, "In-Flight Calibration Method for Direction Finding of Communication Signals based on Aciation Systems," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 30, No. 4, pp. 290-299, Apr. 2019.
- [4] X. Liu, J. Li, and X. Ma, "An EM Algorithm for Blind Hop Timing Estimation of Multiple FH Signals Using an Array System with Bandwidth Mismatch," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 56, No. 5, pp. 2454-2554, Sept. 2007.
- [5] Y. He, Y. Su, Y. Chen, Y. Yu, and X. Yang, "Double Window Spectrogram Difference Method: A Blind Estimation of Frequency-Hopping Signal for Battlefield Communication Environment," in *24th Asia-Pacific Conference on Communications*, Ningbo, pp. 439-443, 2018.
- [6] S. Chandran and M. K. Ibrahim, "DOA Estimation of Wide-Band Signals based on Time-Frequency Analysis," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 116-121, Jan. 1999.
- [7] Q. Shi, J. Xiong, H. Peng, and L. Luo, "A Novel Signal Separation Algorithm for a Wide Band Direction-Finding System in the HF Band," in *2nd International Conference on Computer Science and Network Technology*, Changchun, pp. 550-554, 2012.
- [8] J. Ahn, C. Lee, and U. Jeong, "Hopping Information Generation of Unknown Frequency Hopping Signals in Wireless Channel Environments," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 30, No. 3, pp. 215-222, Mar. 2019.
- [9] D. C. Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, Norwood, Artech House, 1999.
- [10] L. Dinoi, A. D. Vito, and G. Lubello, "Direction Finding of Ground based Emitters from Airborne Platforms," in *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, pp. 1-6, 2008.
- [11] Z. Chen, B. Li, G. Cheng, Z. Sun, and X. Ning, "A Novel Direction Finding Approach for Wideband Frequency Hopping Signal," in *8th Asia-Pacific Conference*, Incheon, pp. 492-495, 2019.