

압축센싱 기술을 적용한 초광대역 수신기 개발 동향

I. 서론

현대전은 스펙트럼 전쟁(Spectrum Warfare)이라고 표현하곤 하는데, 전자기 스펙트럼을 효과적으로 탐지 및 제압하는 것이 전쟁의 승패를 결정짓는 주요한 변수로 작용하고 있다. 걸프전(Gulf war)의 예를 들면, 다국적군은 전쟁 발발 수개월 전부터 감시위성과 조기경보기 등을 동원, 이라크의 통신 지휘 망과 제원, 레이더 및 미사일 기지 등에 대한 중요한 정보를 수집했다. 그리고 걸프전이 벌어지자 대규모 공습 이전에 먼저 EA-6B 프라우러(Prowler)기를 비롯한 전자전 공격기들을 출격시켰다. 전자전 공격기들은 이라크군의 방공망 레이더와 미사일 제어용 레이더를 교란시켰으며, 그 결과 미 전투기들은 공습 시에 이라크군의 SA-2 미사일의 공격을 조기에 피할 수 있었다.

전자전(Electronic Warfare)이란 레이더, 통신장비 등의 각종 전자장비를 이용하여 벌이는 전쟁으로써, 적의 전자 병기 사용을 방해하고, 아군의 전자 병기 사용을 효과적으로 수행하려는 모든 군사 활동을 이른다^[1].

〈그림 1〉은 알려져 있는 레이더 신호의 주파수 분포이다. 1GHz 이하부터 40GHz 까지 넓은 주파수 범위에서 다양한 레이더 신호들이 분포되어 있음을 알 수 있다. 전자전 수신기는 넓은 주파수 대역에서 출현하는 레이더 신호들을 신속하고 정확하게 탐지하기 위하여 점차 광대역의 주파수 대역폭 성능이 요구되고 있다.

종래의 전자전 수신기들은 이러한 넓은 대역의 신호들을 탐지하기 위하여 아날로그 방식의 수신기를 사용하였으나, 가격이 비싸고 성능의 열화가 심하여, 아날로그-디지털 변환기(ADC, Analog-to-Digital Converter)를 사용한 나이퀴스트이론(Nyquist Theorem) 기반의 디지털 수신기로 발전하였으며, 최근에는 소프트웨어 기술의 발전으로 소프



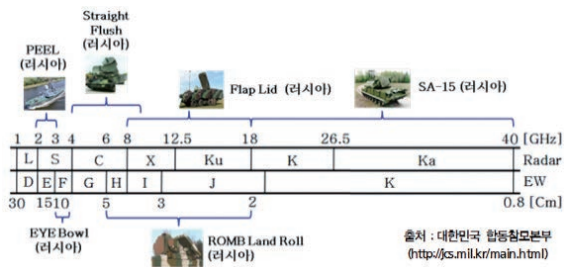
강종진
한화시스템(주)



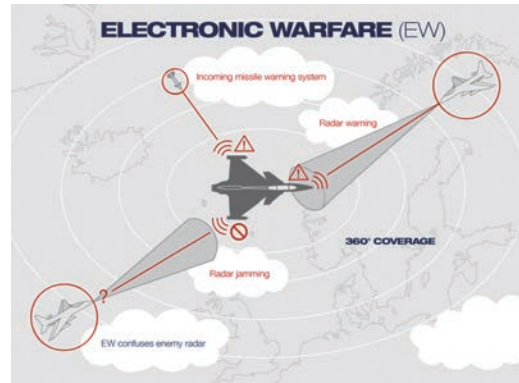
강희석
한화시스템(주)



안우현
한화시스템(주)



〈그림 1〉 레이더 신호 주파수 분포



〈그림 2〉 전자전 수신기 역할

트웨어 정의 라디오(SDR, Software Defined Radio) 수신기로 발전되어 왔다. 그러나 이러한 디지털 수신기의 단점은 ADC 공정 기술의 한계로 인하여 그 속도를 높이는 데 한계가 있다^[2].

대역폭을 향상시키기 위하여 2006년부터 미국 MIT 대학교의 Donoho, Candes 등으로부터 압축센싱 (compressed sensing) 이라 부르는 기술이 소개되었으며, 많은 분야에서 활발히 연구되고 있다. 이 기술은 센서로부터(ADC) 신호의 획득 과정에서 불필요한 신호 정보를 제외하고 획득함으로써 데이터량을 줄이는 획기적인 기술이다^[3].

본 논문에서는 전자전에서 사용되는 수신기의 개요, 종류 및 그 특성에 대하여 소개하고 압축센싱 기술이 적용된 초광대역 수신기 개발동향에 대하여 살펴본다.

II. 전자전 수신기술

1. 전자전 수신기 개요

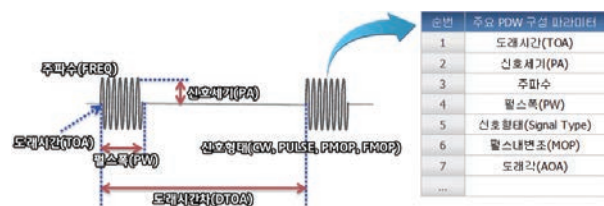
수신기는 안테나와 함께 전쟁 환경에서 각종 전자전 장비들의 창문 역할을 한다. 안테나와 수신기는 그 유형에 따라 적용범위가 한정되며, 운용 목적과 장착 대상물의 요구 조건에 따라 두 기능을 효과적으로 조합함으로써 주어진 성능 요구사항을 만족할 수 있다.

전자전 수신기는 〈그림 2〉와 같이 다가오는 미사일이나 적기의 레이더를 경보해주거나 효율적으로 대항 (Countermeasure)하기 위하여 신호탐지, 분류, 식별을 수행하며 전자공격(EA:Electronic Attack)에 필요한 정보를 제공한다.

전자전 수신기는 수신되는 레이더 신호(특히 펄스)

의 주파수, 펄스폭, 신호세기, 변조형태 등을 측정하여 PDW(Pulse Descriptor Word) 형태의 디지털 데이터를 생성하고, 생성된 다수의 PDW를 분석하여 레이더 신호 분류, 식별등의 기능을 수행한다. 〈그림 3〉은 PDW의 구성항목으로써 전자전 수신기가 측정해야할 레이더 신호 파라미터에 대한 설명이다.

신호 환경이 복잡한 경우 다양한 종류의 레이더 신호가 동시에 수신되며 〈그림 4〉는 다수의 레이더(4개) 신호가 동시에 수신되는 경우에 PDW가 수집되는 개념도이다. 서로 다른 주파수의 펄스 신호가 수신 주파수 전 대역에 분포하게 되므로, 전자전 수신기의 처리 대역폭이 광대역을 요구하게 된다. 수집된 PDW를 디지털 신호처리 및 고속의 프로세서(CPU/GPU 등)를 이용하여 정밀 분석을



〈그림 3〉 레이더 신호 파라미터(PDW 구성항목)



〈그림 4〉 PDW 수집 개념도

수행하고, 레이더의 주파수, 펄스폭, 펄스반복주기 등을 추출한다. 추출된 정보를 라이브러리와 비교하여 특정 위협(미사일, 레이더, 대공포 등)을 식별하게 된다.

2. 전자전 수신기 종류^[4-5]

전자전 수신기의 성능 평가에 사용되는 항목은 신호포착확률(POI:Probability Of Intercept), 감도, 선택도, 오경보율 등이 있다. 특히, 광대역 처리 능력은 높은 POI를 요구함으로써 다양한 신호들을 수신할 수 있음을 뜻한다.

POI가 높은 수신기로는 크리스털 비디오(CV:Crystal Video) 수신기, 순시 주파수 측정(IFM:Instantaneous Frequency Measurement) 수신기 및 슈퍼헤테로다인(Super-Heterodyne) 수신기를 병렬로 구성한 채널화 수신기(Channelized Receiver) 등이 있다.

크리스털 비디오 수신기는 가장 간단한 수신기 형태로 <그림 5>와 같이 안테나, 검출기, 증폭기로 구성되어 있으며, 수신기의 민감도(sensitivity) 향상을 위해 RF 증폭기를 추가할 수 있다. 관심 대역외의 주파수 성분을 제거하기 위해 입력 신호에 대역통과 필터를 적용한 뒤, 신호를 제공하여 신호의 포락선을 구한다. 비디오 증폭기에 의해 증폭된 신호는 이 후 신호처리 회로에 활용된다.

IFM 수신기는 펄스의 주파수를 측정하기 위해 개발되었으며 그 구조는 <그림 6>과 같다. 입력된 RF신호를 두 경로 나누고 한 경로를 지연시키면 주파수에 비례하여 위상이 지연되는 신호가 생성된다. 두 경로의 신호가 위상

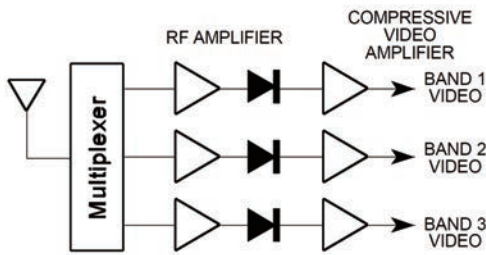
검출기에 입력되면 사인 및 코사인 신호가 출력이 되고, ADC 거쳐 디지털 주파수 정보로 변환 된다.

측정할 주파수 대역이 광대역인 경우 위상 검출기의 지연선을 서로 다르게 병렬로 설계하여 대역폭을 확장한다. 위상 검출기는 동적 범위가 낮기 때문에 앞단에 입력 신호의 전력을 일정하게 유지시켜주는 제한 증폭기가 장착 된다. <그림 7>은 위상 검출기이다^[6].

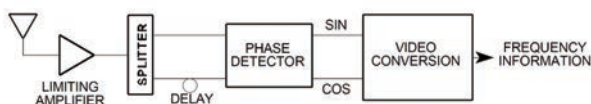
IFM 수신기는 크리스털 비디오 수신기 대비 수신감도, POI, 동적범위 측면에서 장점이 있다. 그러나 가장 큰 단점은 주파수를 다루는 수신기이므로 다중신호를 처리할 수 없다는 것이다.

슈퍼헤테로다인 수신기는 높은 감도와 넓은 동적 범위를 가지나, 대역폭의 제한으로 광대역 신호를 다룰 수 없으므로 POI가 낮다. IFM 수신기는 광대역 신호에 대해 100%의 POI를 나타내지만 다중 신호와 CW 신호를 처리할 수 없다. 이러한 수신기들의 단점을 보완하기 위해 서로 다른 RF 중심 주파수를 지닌 채널을 병렬로 구성한 채널화 수신기가 있다. <그림 8>은 채널화 수신기의 구조이다. 각 대역별 RF 분배기, 국부발진신호원, 대역통과 필터 및 기저대역 신호처리부로 구성된다.

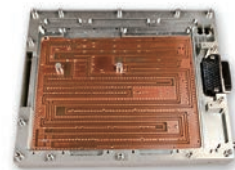
이상으로 살펴본 수신기는 광대역특성이 좋아 POI 측면에서 유리하지만 신호분석을 위한 PDW 측정 시 모든 부분을 만족할 수 없으므로 통상 여러 종류의 수신기



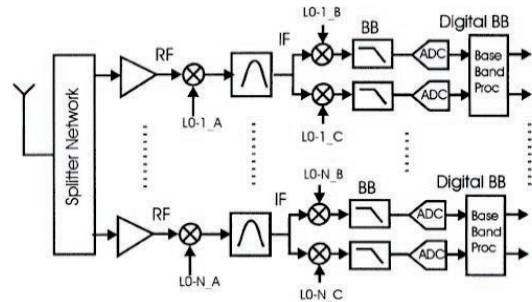
<그림 5> 크리스털 비디오 수신기



<그림 6> 순시 주파수 측정 수신기



<그림 7> 위상검출기(Phase Correlator)



<그림 8> 채널화 수신기



를 조합하여 시스템을 구성한다. 최근에는 아날로그 처리(conditioning)를 포함한 고속의 아날로그-디지털 변환기(ADC) 및 FPGA(Field Programmable Gate Array)를 이용한 디지털 수신기가 적용 되고 있다. 디지털수신기의 순시 대역폭을 확장하기 위해서는 ADC의 샘플링 속도를 높이면 가능하지만 현재 사용 가능한 상용 ADC는 10~12bit 해상도에서 코어당 2.5 GHz가 한계이다. 이러한 고해상도 ADC의 샘플링 속도 한계를 극복하기 위하여 10GHz 이상의 단일비트(Mono-bit) 칩을 이용한 수신기가 개발 되었으나 양자화 오차로 인한 스퓨리어스 신호 증가로 동적범위 성능이 나쁘고, 동시신호 처리 성능이 좋지 않다.

III. 초광대역 압축센싱 수신기 개발 동향

가. MWC(Modulated Wideband Converter)^[7]

이스라엘 Technion 대학교의 Eldar 교수는 압축센싱 이론을 인지무선(CR) 분야에 적용하였으며, 프로토타입의 하드웨어를 개발하였다. MWC는 주파수 대역 약 1 GHz 내에 존재하는 다양한 무선통신 신호를 처리하기 위하여 그림 9와 같이 초고주파(RF) 입력과 4개의 광대역 믹서 및 저역통과 필터를 사용하여 기저대역 신호로 변환하는 MWC를 개발하였다. 그리고 압축을 위한 국부발진 신호원으로 상용 플립플롭을 링형태로 묶은 PRBS 생성기를 제작하였다.

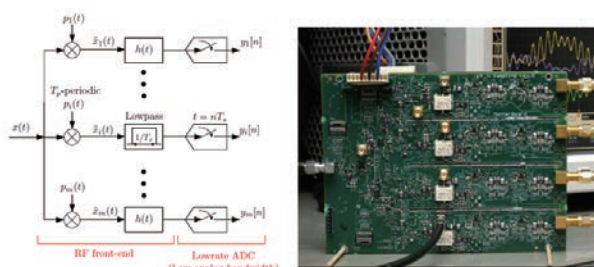
나. RMPI(Random Modulation Pre-Integrator)^[8]

미국 Caltech 대학교 Azita 교수는 고등연구계획국(DARPA : Defense Advanced Research Projects

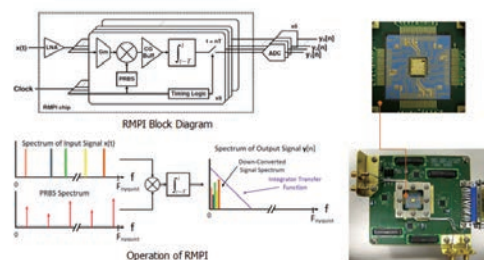
Agency)의 AIC(Analog to Information Converter) 프로젝트를 통해서 <그림 10>과 같이 주문형반도체(ASIC) 기반의 Sub-Nyquist 샘플링 하드웨어를 제작하였다. RMPI 칩은 약 2 GHz 내에 존재하는 레이더 펄스 신호를 5GHz로 동작하는 PRBS 발생기와 광대역 믹서 및 적분기를 이용하여 기저대역 신호로 압축하였다. RMPI 칩의 성능 확인을 위하여 14bit 해상도를 갖는 상용 ADC를 사용하였으며, 샘플링 클럭은 약 80MHz를 사용하였으며, 12배 이상의 서브나이퀴스트 성능을 달성하였다. 대상 신호는 레이더 펄스이며 신호가 중첩된 신호 환경에서 펄스 파라미터 추출성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안하였다.

VI. 결론

전자기 스펙트럼을 사용하는 위협신호들의 종류와 목적이 다양화됨에 따라 전자전 수신기가 탐지하고 식별해야 하는 신호의 주파수 범위가 광대역화 되고 있다. 현재의 ADC의 발전 속도를 고려할 때 기존의 디지털 수신기 기술로 수십 GHz의 광대역을 커버하기는 불가능하다. 현재 압축센싱 기반 Sub-Nyquist 샘플링 기술에 관련된 선진국 수준이 2 GHz의 이하의 처리대역폭 성능을 프로토타입 형태로 제작된 수준이다. 압축센싱 하드웨어를 구성하는 핵심부품인 광대역 믹서는 수십 GHz를 커버하는 상용부품이 출시되어 있고, PRBS 신호발생기 또한 특수공정을 사용하여 수십 GHz 속도로 설계 및 제작된 논문들이 발표되고 있다. 국내에서도 광대역 믹서 및 PRBS 발생기, 그리고 관련 신호처리 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 수년 이내에 수십 GHz 처리 대역폭



<그림 9> MWC 블록도 및 프로토타입 하드웨어



<그림 10> RMPI 블록도 및 프로토타입 하드웨어



을 갖는 압축센싱 기반 초광대역 수신기 연구결과가 발표 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Andrea De Martino, Introduction to Modern EW systems, Artech House, 2012
- [2] James B. Tsui, Special Design Topics in Digital Wideband Receivers, Artech House, 2010
- [3] 이흥노, 박상준, 박순철, "압축센싱 소개", 전자공학회지, 2011
- [4] Richard G. Wiley, ELINT : The Interception and Analysis of RADAR Signals, Artech House, 2006
- [5] 나선필, 송규하, "전자전 수신기 기술발전 동향", 국방과학기술 플러스, Vol. 226, 2015
- [6] William Sullivan, Gauging Limitations On DFD Performance, <http://mwrf.com/systems/gauging-limitations-dfd-performance>, 2005
- [7] Y. C. Eldar and G. Kutyniok, Compressed Sensing: Theory and Applications, Cambridge University Press, 2012
- [8] Juhwan Yoo 외 10명, "A Compressed Sensing Parameter Extraction Platform for Radar Pulse Signal Acquisition", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 2, no. 3, 2012



강종진

- 2003년 동명대학교 정보통신공학과 학사 졸업
- 2005년 동명대학교 정보통신공학과 석사 졸업
- 2016년현재 한화시스템(주) 전자전연구센터 전문연구원

〈관심분야〉
디지털 수신기, 전자전 신호처리



강희석

- 1990년 충남대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업
- 1992년 충남대학교 컴퓨터공학과 석사 졸업
- 2016년현재 한화시스템(주) 전자전연구센터 수석연구원

〈관심분야〉
전자전 신호처리, 전자전 소프트웨어



안우현

- 2012년 충북대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2014년 충북대학교 전자공학과 석사 졸업
- 2016년현재 한화시스템(주) 전자전연구센터 주임연구원

〈관심분야〉
전자전 신호처리, 무선통신시스템