

## 디지털 수신장치 기반의 실시간 복합방향탐지 시스템 설계 연구

박진오\*, 조제일, 한진우, 정재우\*  
LIG넥스원, 국방과학연구소

### Real-Time Hybrid Direction-Finding System Design based on a Digital Receiver

Jin-Oh Park\*, Je-Il Jo, Jin-Woo Han, Jae-Woo Chung\*  
LIG NEX1\*, ADD

**Abstract** - 전자전(EW : Electronic Warfare) 전자지원(ES : Electronic Support)분야의 정보를 수집하는 수신기의 구조는 순시주파수 측정(IFM : Instantaneous Frequency Measurement)방식의 아날로그 수신기 형태가 주를 이루고 있었다. IFM 수신기는 광대역의 순시 대역폭을 가지지만, 여러 신호가 동일 대역 내에 존재할 때 하나의 신호만을 측정하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 동시 다중위협신호를 실시간으로 수집할 수 있는 전자전분야에 특화된 디지털 수신기(DR : Digital Receiver)기반의 시스템에서 복합방향탐지(위상비교 방향탐지 및 신호세기기반의 방향탐지)를 위한 디지털 수신 간략 계통 및 복합방향탐지 시뮬레이션 결과를 제시한다.

#### 1. 서 론

전자전분야에서 레이더의 신호를 실시간으로 처리하는 것은 필수적이다. 많은 전자지원측정(ESM : Electronic support-measures)장비에서 주파수 측정은 매우 중요한 인자였고, 지난 30년간 아날로그 지연선(delay-line)을 이용한 주파수측정기(frequency discriminator)를 이용하여 주파수를 측정하는 IFM수신기를 이용하여 순시대역 내의 존재하는 여러 신호 중에 가장 세기가 큰 신호원을 측정 및 방향을 탐지하였다.[1-2]. 근래에는 고속 아날로그디지털변환기(Analog Digital Converter)와 고속신호처리가 가능한 소자(FPGA : Field Programmable gate array)를 이용한 디지털수신기를 이용한 전자전장비가 IFM수신기의 뒤를 잇고 있다. 현재 기술 수준의 디지털 수신기는 IFM수신기보다 작은 순시대역을 가지고 있지만, 순시 대역내에 존재하는 신호원들을 분리할 수 있는 장점을 가지고 있으며 신호처리방법 및 사용용도에 따라 수신기의 성능을 변화시킬 수 있는 유연성 역시 가지고 있다.

또한, 방향탐지를 수행하기 위해 별도의 모듈 - SDLVA(Successive Detector Log Video Amplifier), 위상변별기(DFD : Digital Phase Discriminator)를 필요로 하는 IFM수신기와는 달리 디지털수신기는 별도의 모듈 필요없이 샘플링된 신호를 신호처리기법을 사용하여 신호정보를 추출하여 동일 혹은 향상된 성능을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 전자전 ES분야에 적합하도록 고속 샘플링된 신호를 실시간 처리할 수 있는 신호처리구조기반에서 위상비교 방향탐지와 신호세기차를 이용한 방향탐지 기능을 수행할 수 있도록 간략한 디지털 수신 계통과 정밀한 방향탐지가 가능한 복합방향탐지 알고리즘의 개념 및 시뮬레이션 결과를 제시한다.

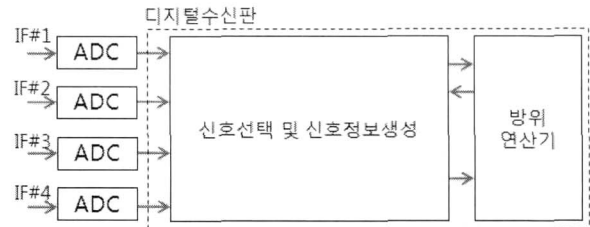
#### 2. 본 론

##### 2.1 디지털 수신기 기반의 복합방향탐지 전자전시스템 설계

디지털 및 신호처리기술이 발전함에 따라 디지털 수신기를 이용한 방향탐지 시스템은 전기적 성능의 우수함, 비용적인 효율의 측면에서 기존의 IFM수신기를 대체하는 흐름을 보이고 있다[3]. 본 구절에서는 FPGA의 신호처리속도보다 빠르게 출력되는 AD샘플링된 데이터 출력을 실시간 처리하기 위한 Equivalence Theorem과 Noble Identity개념을 이용하여 전자전 ES분야에 적합한 디지털 수신시스템의 계통을 간략히 제안하고, 방향탐지를 위한 신호정보를 확보할 수 있는 신호처리계통을 간략히 제시한다.

##### 2.1.1 실시간 신호처리를 위한 디지털수신판 설계

신호처리시간보다 빠르게 입력되는 신호에 대해 실시간 신호처리를 위해 Equivalence Theorem과 Noble Identity의 신호처리개념을 이용할 수 있다 [4]. 특정대역의 신호를 디지털 믹서를 통해 다운 컨버전한 신호를 LPF를 통해 신호를 분리해 내는 것은 BPF를 통해 신호를 분리한 이후에 다운 컨버전하는 것과 같다는 Equivalence Theorem과 신호의 다운 샘플링과 필터의 연산의 순서를 바꾸어도 그 결과는 같다는 Noble Identity를 응용하면서 고속으로 입력된 신호를 하드웨어의 뒤처진 처리속도를 가짐에도 불구하고 실시간으로 병목구간 없이 주파수 도메인의 분석을 할 수 있다 [5]. 본 논문에서는 그림 1과 같이 디지털수신판을 활용하여 신호세기에 의한 신호선택을 하고, 선택된 채널의 신호에 대한 신호정보를 임의의 대역별로 생성하는 역할을 수행한다. 이와 같은 계통에서 생성한 정보를 이용하여 실시간으로 위상과 신호세기를 이용하여 복합방향탐지기능을 수행할 수 있도록 그 계통을 제안한다.



〈그림 1〉 4채널 복합방향탐지용 디지털수신기 간략 계통

##### 2.1.2 디지털 수신기 기반의 방향탐지를 위한 신호정보 생성

본 절에서는 방향탐지를 위해 신호원의 세기, 폭, 위상, 주파수를 산출하기 위한 연산방법 및 연산 계통을 제안한다.

샘플링된 IF신호는 디지털수신판 내부적으로 실시간 신호처리와 신호정보 추출을 위해 I/Q데이터의 형태로 변환되는데, 본 데이터들을 이용하여 방위를 연산하기 위한 신호정보를 생성하기 위한 보편적인 방법은 수식 2-6과 같다. 먼저 신호세기와 위상을 측정하고, 위상의 변화량을 측정함으로써 주파수를 연산한다. 이 때 주파수정보를 획득하기 위해, 푸리에변환과 같은 신호처리를 하지 않는 이유는 주파수 연산에 필요한 데이터의 개수와 주파수 분해능의 측면에서 순시 위상과 샘플링 시간을 이용한 수식 6의 관계를 이용하는 것이 DFT를 이용하여 주파수를 추정하는 방법보다 우수하기 때문이다[3]. 또한 신호가 적은 지속 시간을 가질 때, 특정한 주파수 추정 분해능을 DFT에서는 확보가 어렵기 때문이기도 하다. 따라서 해당 대역내에 신호원이 하나만 존재하고, 신호지속시간이 짧다면, 순시 위상과 샘플링 시간과의 관계를 이용한 주파수 연산이 적합하다.

$$I[n] = \cos[2\pi(f_i - f_o)n] \quad (2)$$

$$Q[n] = \sin[2\pi(f_i - f_o)n] \quad (3)$$

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (4)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{Q}{I} \right] = 2\pi(f_i - f_o)t \quad (5)$$

$$f_i = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2\pi} + f_o \quad (6)$$

여기서  $I[n]$ 은 I 데이터,  $Q[n]$ 은 Q 데이터, A는 신호세기,  $\theta_i$ 는 i 번째 신호의 위상,  $f_i$ 는 입력 신호주파수 그리고  $f_o$  디지털 국부발진기(디지털 믹서) 주파수이다.

##### 2.2 디지털 수신기 기반의 복합방향탐지 시스템 설계

신호세기와 위상정보를 측정하는 디지털수신구조 기반의 4채널 전방위 복합방향탐지(신호세기차를 이용한 방향탐지(Amplitude Comparison) 및 위상차를 이용한 방향탐지(Interferometer))시스템에서 특정 방향탐지 성능을 갖도록 방향탐지 알고리즘을 이번 절에서 제안한다.

전자전 ES장비의 기존의 방향탐지정확도는 방향탐지의 종류에 따라 대략의 성능을 예상할 수 있다. 여러 개의 안테나들을 이용하여 신호원의 세기를 수신하고, 각 안테나에서 수신한 신호의 세기의 차(Difference)를 이용한 방향탐지 - 신호세기차를 이용한 방향탐지는 RMS 0도 정도의 오차 성능을 가진다. 그리고 여러 개의 안테나들을 이용하여 수신한 신호들의 위상의 차(Difference)를 이용하여 신호의 수신 방향을 탐지하는 신호위상차를 이용한 방향탐지(Interferometer) 방식은 RMS 0도 정도의 오차 성능을 갖는다[6][7].

복합방향탐지 알고리즘 제안에 앞서 기존의 방향탐지 개념을 먼저 살펴보면 그림 2와 같다. 그림 2-(a)와 같이 4개의 안테나가 배치되어 있다고 가정하고, 신호를 수신하는 시스템에서 위상과 신호세기를 측정할 수 있다

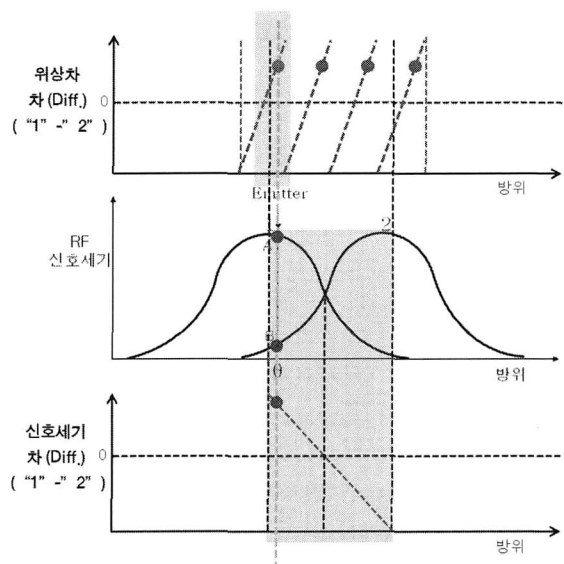
고 가정해 보자. 위상의 차를 이용한 방향탐지는 그림 2-(b)와 같이 두 개의 안테나에서 수신되는 위상의 차와 베이스라인의 길이, 주파수와와의 관계를 이용하여 신호의 수신방향을 수식 (7)과 같이 도출할 수 있다.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (7)$$

여기서  $\phi$ 는 신호의 위상차,  $\lambda$ 는 파장의 길이,  $d$ 는 안테나간의 거리(Base line),  $\theta$ 는 신호의 입사방위각이다. 수식에서 알 수 있듯이  $d$  값이 커질 수록 신호의 위상차는 커지게 되고,  $d$  값이  $\lambda/2$  이상일 때 접히는 위상(wrapped phase)이 되어 위상차 값이 방위에 따라 순환하게 된다. 이는 위상측정 해상도가 정해져 있다고 가정할 때, 특정 위상차에 대해 다수의 방위가 맵핑되는 일대 다의 관계가 이루어 지는 것을 의미한다. 따라서 위상차를 이용한 방향탐지는 위상차가 순환하는 특성을 파악하기 위해 위상차 방위간의 모호성을 해결하는 중간 단계들의 안테나 베이스라인을 사용하여 최종 방위를 산출한다.

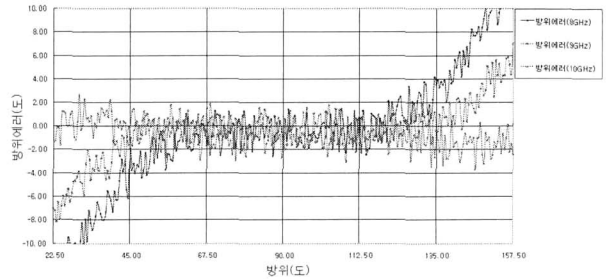
그림 2-(c)는 신호가 1번 안테나, 2번 안테나 사이로 수신할 때, 신호세기의 차가 안테나 사이에서는 선형적인 관계를 가지는 것을 개념적으로 나타낸 것으로서, 신호세기와 방위간 일대일 맵핑관계를 가져 방위모호성이 일어나지 않는 것을 나타낸다.

본 논문에서 제안하는 복합방향탐지방법은 안테나간 베이스라인이 입력 주파수범위의 최고주파수의  $\lambda/2$  길이 이상 일 때, 위상차를 이용한 방향탐지방법에서 발생하는 방위모호성을 기존의 짧은 베이스라인을 갖는 안테나들을 배열을 사용하지 않고, 신호세기의 차를 이용한 방향탐지방법을 활용하여 위상차를 이용한 방향탐지방법의 방위 모호성을 신호세기차를 이용한 방향탐지방법을 복합하여, 그림 3과 같이 해결하는 것을 제안한다.



〈그림 3〉 복합방향탐지(위상차&신호세기차) 방향탐지기법 이용

방향탐지시뮬레이션 결과



〈그림 4〉 주파수별 복합방향탐지정확도 에러(±70도)

〈표 1〉 복합방향탐지 정확도 에러(±45도)

구 분	설정 주파수		
	OGHz	OGHz	OGHz
방향탐지정확도 에러 RMS (도)	1.99	1.42	1.63

### 3. 결 론

본 논문에서는 전자전 ES분야의 전기적 성능 및 비용면에서 IFM수신기를 대신할 디지털 수신시스템 전반에 대한 디자인 연구결과를 제시하였다. 디지털 수신 구조기반에서의 (1) 방향탐지를 위해 IQ데이터를 이용한 신호 정보 확보를 위한 신호처리 계통을 간략히 제시하였으며, (2) 디지털수신구조에서 진폭 및 위상을 이용한 복합방향탐지 계통 및 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

### 〔참 고 문 헌〕

- [1] P.W. East, "Design techniques and performance of digital IFM," *IEE E Proc.*, vol. 129, Pt.F, no.3, Jun. 1982.
- [2] K. Burns, "Tracking Trends in Military IFMs and DFDs," *Microwaves & RF*, Jun. 2009.
- [3] J.B.Y. Tsui, "Digital Techniques For Wideband Receivers," *Scitech PUBLISHING, INC.*, pp.7-36, 2004.
- [4] J.B.Y. Tsui, "Special Design Topics In Digital Wideband Receivers," Artech House Co., pp. 299-360, 2010.
- [5] Fredric J. Harris, "Multirate Signal Processing For Communication Systems," Pearson Education, Inc., pp 128-150, 2004.
- [6] David Adamy, "EW 101," Artech House Co., 2001.
- [7] D. Curtis Schleher, "Electronic Warfare in the Information Age," Artech House Co., pp.333-404, 1999.

〈그림 2〉 각각의 방향탐지 개념도

- (a) 방향탐지를 위한 안테나 배치, (b) 위상차를 이용한 방향탐지 개념,  
(c) 신호세기차를 이용한 방향탐지 개념