

통신 대역에서 전파 위치 측정 시스템 개발

나인석 · 변영관

LG이노텍(주) 연구소

요 약

전자전이란 적의 지휘·통제·통신 및 전자 무기 체계의 기능을 마비시키고 적의 전자전 활동으로부터 아군의 무기 체계를 보호하는 제반 활동으로 설명할 수 있다. 통신 신호에 대한 전자전은 주로 VHF~UHF 주파수 대역의 전술 무선 통신에 대해 수행하며, 첩보의 이득을 가지기 위해 적의 통신 내용을 도청하는 통신 감청, 적의 통신을 마비시키는 전자 공격, 적 통신소 및 적 통신원의 위치를 탐지하는 방향 탐지 등 여러 분야가 있다.

그 중 한 분야인 방향 탐지에서 얻어지는 정보는 적 통신소의 방향에 대한 정보를 제공하여 전자 공격에 도움을 주며, 적 통신원 발생 위치를 파악 및 추적할 수 있다.

본 논문에서는 전파 신호원의 위치를 측정하는 시스템의 개발 방안을 살펴보고 전파 신호원의 위치 측정에 중요한 요소인 전파의 도래 방향 및 전파의 발생 위치 측정 방안을 설명하였다.

I. 서 론

전파 발사원의 위치를 탐지하기 위해서는 현재 위치에서 신호원에 대한 방위 및 거리 정보가 필요하다. 그러나 통신 대역에서 거리 정보는 주변 환경에 따른 영향이 방위 정보에 비해 상대적으로 불확실하므로 전파의 위치 탐지를 위해서는 여러 곳에 위치해 있는 방향 탐지 시스템으로부터 수집되는 여러 개의 방위 정보를 이용하여 거리 정보를 대신

한다.

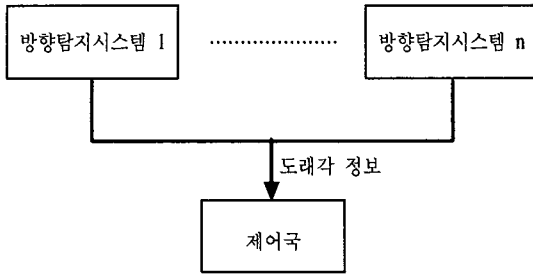
현재 주로 사용되고 있는 방향 탐지 시스템으로는 도플러 시스템, 에드콕 시스템, 인터페로미터 시스템 등이 있으며 이러한 시스템은 입사 신호가 단일 평면파라고 가정할 수 있는 단순한 전파 환경에서만 적용이 가능하다. 그러나 지형학적으로 산악 지형이나 도시의 대형 건물이 많이 존재하는 경우에는 주변 환경에 의한 반사파가 많이 발생하므로 입사 신호가 단일 평면파라고 가정할 수 없으며, 기존 방탐 방식은 심각한 방위각 오차를 유발하게 된다. 특히 HF 대역의 경우에는 전파가 여러 개의 전리층에서 반사되어 입사되므로 많은 수의 반사파가 존재한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 다중 경로를 각각 분리할 수 있는 초 분해능 도래각 추정 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 현재 개발 중인 시스템의 구성 및 구현 방안, 도래각 추정 방안 및 여러 곳의 방향 탐지 시스템으로부터 입력되는 도래각 정보를 이용하여 전파 신호 송신원의 위치를 측정하는 방안에 대해 설명하였다.

II. 시스템 구성 및 구현 방안

2-1 시스템 구성

전파 위치 측정 시스템은 최소 2개 이상의 방향 탐지 시스템과 제어국으로 구성된다. 제어국은 각각의 방향 탐지 시스템을 제어해 주며, 각각의 방향 탐지 시스템으로부터 수신되는 방위 정보를 이용하



[그림 1] 전파 위치 측정 시스템 구성

여 전자 지도상에 신호 송신원의 위치를 나타내주는 역할을 수행한다.

방향 탐지 시스템은 제어국으로부터 수신되는 측정 대상 신호 정보(주파수, 대역 등)들을 이용하여 측정 대상 신호의 정보를 수집하고, 수집된 정보를 이용하여 측정 대상 신호의 도래각을 측정 후 그 결과를 제어국에 전송하는 역할을 수행한다.

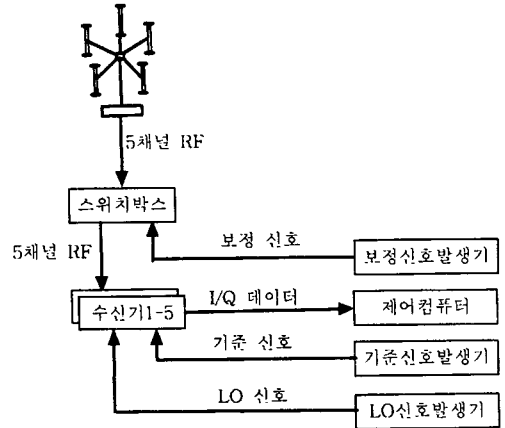
2-2 방향 탐지 시스템 구성

각각의 방향 탐지 시스템은 안테나, 스위치 박스, 보정 신호 발생기, 수신기, 기준 신호 발생기, LO 신호 발생기 및 제어 컴퓨터로 구성되어 있으며 안테나에 입사하는 전파의 도래각을 측정하여 그 결과를 제어국에 전송한다.

2-2-1 안테나 및 스위치 박스

방향 탐지 시스템은 5개의 안테나에 동시에 도래하는 신호의 진폭과 위상을 비교하여 신호의 도래각을 추정하는 방식을 사용하였으며, 이러한 방식을 적용하기 위해서는 등간격 배열 안테나를 사용해야 한다.

등간격 배열 안테나에는 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 원형 배열 안테나가 있다. 등간격 선형 배열 안테나는 1차원 공간에 배열되어 있어서 1차



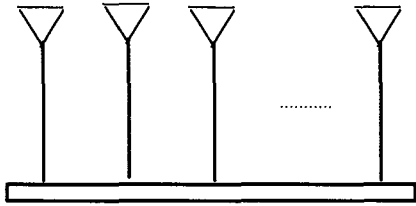
[그림 2] 방향 탐지 시스템 구성

원 도래각만을 추정할 수 있으며, 입사 신호의 도래각에 따라서 유효 개구면의 크기가 달라지는 단점이 있다. 방향 탐지 시스템의 분해능은 배열 안테나의 유효 개구면 크기에 비례하므로 등간격 선형 배열 안테나는 입사 신호의 도래각에 따라서 분해능이 달라지게 된다. 즉 배열 안테나와 수직 방향으로 신호가 입사될 때 분해능이 가장 좋고 수평 방향으로 신호가 입사될 때 분해능이 가장 나쁘다.

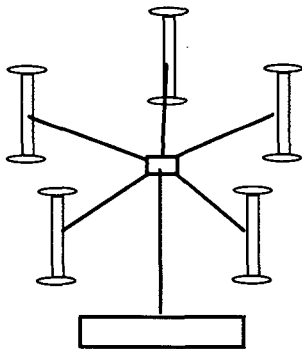
등간격 원형 배열 안테나는 안테나 소자를 2차원 평면에 배열하여 방위각과 양각을 동시에 추정할 수 있으며, 안테나 소자를 균일하게 배치하여 배열 안테나의 유효 개구면의 크기가 신호의 도래 방향에 따라서 변화하지 않아 입사 신호의 도래 방향에 관계없이 일정한 분해능을 갖는다.

실환경에서 입사 신호의 도래각을 추정할 경우에는 방위각과 양각을 모두 알아야 하며, 분해능이 입사 신호의 방향에 관계없이 일정하게 유지되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 시스템에서는 주파수 대역별로 구분되는 3 Bay로 구성되며, 각 Bay마다 5개의 안테나를 가지는 등간격 원형 배열 안테나를 사용하였다.

스위치 박스는 주파수 대역에 따른 3개의 Bay(15



[그림 3] 등간격 선형 배열 안테나



[그림 4] 등간격 원형 배열 안테나

개의 안테나)에서 오는 RF 신호 중에서 하나의 Bay(5개의 안테나)를 선택하여 수신기 1~5로 각각 보내며, 신호 경로 보정 동작시에는 보정 신호 발생기에서 출력되는 보정 신호를 수신기로 전달하는 동작을 수행한다.

2-2-2 수신부

수신부는 5개의 수신기와 기준 신호 발생기, LO 신호 발생기 및 제어 컴퓨터로 구성된다. 수신기는 입력되는 RF 신호를 주파수 하향 변환하여 IF 신호를 생성하고 이 신호를 디지털 샘플링하여 디지털 I/Q 데이터를 제어 컴퓨터에 전달하는 동작을 수행한다. 각각의 수신기는 신호의 주파수를 하향 변환 및 증폭하는 과정에서 각 수신기의 진폭 및 위상 부정합이 최소화 되도록 수신 신호를 처리해야 한다.

LO 신호 발생기는 수신기에서 주파수 하향 변환

동작시 사용되는 LO 신호를 5개의 수신기에 동시에 공급하는 동작을 수행하며, 이때 LO 신호는 진폭 및 위상 부정합 특성을 최소화 한 상태로 출력해야 한다.

기준 신호 발생기는 수신기에서 IF 신호를 디지털 샘플링 할 때 사용되는 기준 신호 및 수신기 내부에 사용되는 프로세서들의 동작 클럭을 동위상으로 5개의 수신기에 공급하는 동작을 수행한다.

제어 컴퓨터는 수신기로부터 입력되는 디지털 I/Q 데이터를 이용하여 신호의 도래각을 측정 한 후 그 결과를 제어기에 전달하는 역할을 수행한다.

2-2-3 보정 신호 발생기

보정 신호 발생기는 신호 경로 보정 동작시 사용되는 RF 신호 출력 동작을 수행한다.

2-3 신호 경로 보정

각각의 수신기에 입력되는 신호의 위상은 안테나에서 스위치 박스를 거쳐 수신기에 입력되는 과정에서 경로의 길이 변화에 따라 위상이 변하게 된다. 주파수 대역이 높아질수록 위상의 변화는 커지게 되며, 심각한 방향 탐지 오차 문제를 일으키게 된다.

이를 해결하기 위해서는 신호 경로에 따른 보정 작업을 수행해 주어야 하며, 본 시스템에서는 보정 신호가 스위치 박스에서 케이블로 연결되어 수신기로 되돌아오는 신호 전달 경로를 사용하여 케이블과 수신기의 위상과 진폭을 보정하는 방식을 사용하였다.

2-4 Array Manifold 측정

Array Manifold란 등간격 원형 배열 안테나에 평면파가 입사되었을 경우 모든 입사 방향에 대한 각 안테나 소자의 진폭 응답과 위상 응답을 말한다. 안

테나를 구성하는 모든 안테나 소자의 특성이 균일하여 안테나 소자 사이의 위상 또는 진폭 부정합이 없는 이상적인 경우에 Array Manifold는 수신 신호 모델링에 의해 간단한 수식으로 구할 수 있지만 실제 환경에서는 제작 오차가 발생하므로 제작된 안테나에 대한 측정 동작을 수행하여 Array Manifold 데이터를 구해야만 한다. 도래각 추정 방안은 Array Manifold와 실제로 측정된 데이터를 비교하여 전파의 도래 방향을 추정하므로 Array Manifold의 정확한 측정은 방향 탐지의 정확도 및 해상도에 큰 영향을 미친다.

III. 도래각 추정 방안

고전적인 스펙트럼 추정 방식에 의한 도래각 추정 방법에는 배열 안테나 출력을 적절히 지연시킨 후 서로 합하여 특정 방향으로 입사되는 신호에 보강 간섭이 일어나도록 함으로써 그 출력이 최대가 되도록 만드는 방법, 즉 모든 방향에 대해 배열 안테나를 지향시키고 그 출력 값들로 공간 스펙트럼을 형성하여 스펙트럼의 최대값을 나타내는 위치를 신호의 입사 방향으로 결정하는 빔 형성 기법이 있다.

그러나 이러한 고전적인 도래각 추정 방식은 신호 대 잡음비가 낮거나 간섭 신호가 존재하는 경우에 파면이 왜곡되어 도래각 측정에 오차가 발생한다. 이를 극복하기 위해 최근에는 배열 신호 처리 분야에서 다중 신호를 분리할 수 있는 초 분해능 알고리즘이 활발히 연구되고 있으며, 이 중 하나인 MUSIC 알고리즘을 본 시스템에 적용하였다.

MUSIC 알고리즘은 Schmidt가 제안한 방식으로서 안테나에 수신되는 신호에 대한 각 안테나 소자의 위상 및 진폭에 대한 값을 포함하고 있는 벡터인 스티어링 벡터는 잡음 고유 벡터에 의해 형성되는 잡음 부공간과 직교한다는 기본 특성을 적용한 기법이다. 모든 입사각에 대한 스티어링 벡터의 집합

을 Array Manifold라 정의하며, 이 Array Manifold는 스티어링 벡터의 연속체이다. 스티어링 벡터의 열 공간과 잡음 공유 벡터가 스캔하는 잡음 부공간은 수직 관계에 있는 특성을 이용한다. 즉 Array Manifold상의 임의의 벡터 $a(\theta)$ 를 잡음 부공간에 직교 투영시켜서 구한 벡터 중에서 길이가 가장 작은 $a(\theta)$ 가 신호의 스티어링 벡터이다. 신호 부공간과 잡음 부공간은 서로 직교 여공간 관계에 있기 때문에 Array Manifold상의 임의의 벡터는 신호 부공간 성분과 잡음 부공간 성분으로 분해될 수 있고 잡음 부공간 성분이 전혀 없거나 가장 작은 벡터가 신호에 해당된다고 판정할 수 있다.

Array Manifold상의 임의의 스티어링 벡터 $a(\theta)$ 를 잡음 부공간에 직교 투영시킨 벡터 d 의 크기

$$|d|^2 = a(\theta)^H U_N U_N^H a(\theta) \quad (1)$$

U_N : 잡음 고유 벡터들로 이루어진 행렬

U_N^H : U_N 의 복소 전치 행렬

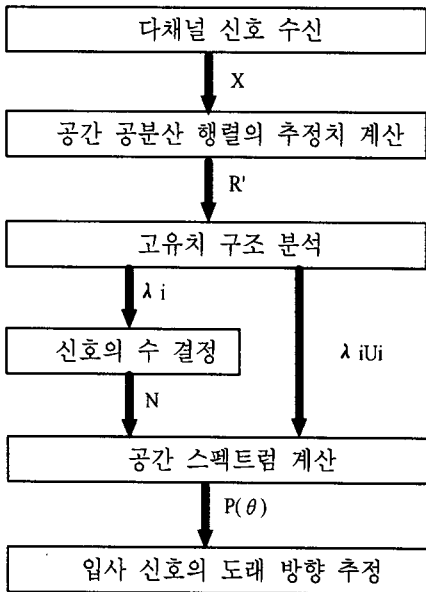
MUSIC의 공간 스펙트럼을 $|d|^2$ 의 역수로 정의하면, 잡음 부공간 성분이 가장 작은 $a(\theta)$ 에서 최대 값을 갖게 되고 이에 대응하는 각도가 입사 방향이 된다.

$$P_{MU}(\theta) = [a(\theta)^H U_N U_N^H a(\theta)]^{-1} \quad (2)$$

윗식은 공간 주파수의 전력을 정확하게 추정하는 스펙트럼 추정 기법이 아니고 신호가 존재하는 곳에서 첨두치를 나타내도록 하는 공간 주파수 추정 방식에 속한다.

IV. 송신원의 위치 측정 방안

신호 송신원의 위치는 충분히 거리가 멀리 떨어

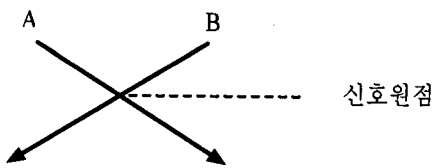


[그림 5] MUSIC 알고리즘

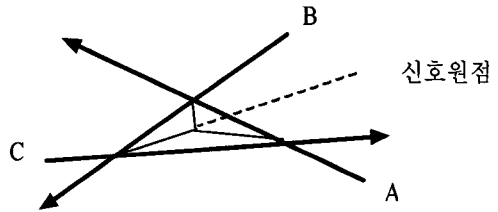
진 2개 이상의 방향 탐지 시스템에서 수집된 도래각 정보들의 교차 지점을 통해 신호원의 위치를 결정할 수 있다.

2개의 도래각 정보를 이용할 경우는 하나의 교점이 발생되며 이 교점을 신호원의 위치라고 추정하며, 3개의 도래각 정보를 이용할 경우는 오차에 의해 삼각형 모양이 생기며 이 삼각형의 중심점을 신호원의 위치라고 추정한다.

그러나 방향 탐지 시스템에서 얻어지는 도래각 정보는 주변 환경 또는 방향 탐지 시스템 자체의 문제 등으로 인하여 도래각 정보를 구할 때 오차를 가지게 되며 이 추정 값을 실제 신호원의 위치라고 결정하는 데는 어려움이 있다.



[그림 6] 2개의 도래각 정보를 이용한 측정



[그림 7] 3개의 도래각 정보를 이용한 측정

따라서 본 시스템에서는 한번 수행한 방향 탐지 결과를 이용하여 신호원의 위치를 측정하는 것이 아니라 방향 탐지 동작을 여러 번 수행하여 그 신뢰도를 높이는 방법을 적용하였다. 우선 방향 탐지 동작을 여러 번 수행하여 여러 개의 도래각 정보를 습득하고 그 습득된 정보에 대한 신뢰도를 검토하여 신뢰도가 인정된 데이터만을 이용하여 신호원의 위치 측정 동작에 사용하였다.

V. 결 론

지금까지 본 연구소에서 개발 중인 전파 위치 측정 시스템에 대한 전반적인 내용을 설명하였다. 현재 개발 중인 본 시스템은 VHF/UHF 대역까지 5°rms의 방향 탐지 정확도를 가지도록 개발 중이며 2001년까지 개발 완료 예정이다.

전파의 위치 측정은 방향 탐지 시스템의 도래각 정보의 신뢰도에 의해 크게 좌우가 되며, 방위 정보의 신뢰도를 높이기 위해서는 하드웨어와 소프트웨어의 개발에 많은 노력을 기울여야 될 것으로 판단된다. 하드웨어적인 측면에서는 방향 탐지 안테나 각 안테나 소자 사이의 위상 부정합 특성, 각 수신기 사이의 동기 유지를 위한 LO 신호 발생기 및 기준 신호 발생기의 출력 신호에 대한 위상 부정합 특성, 수신기의 진폭 및 위상 부정합 특성을 최소화하도록 노력해야 할 것이며, 소프트웨어적인 측면에서는 정확한 Array Manifold 측정, 신호 보정 동작

및 방향 탐지/전파 위치 측정 알고리즘의 보완에 많은 노력을 기울여야 될 것으로 판단된다.

방향 탐지 및 전파 위치 측정 시스템에 대한 개발은 이제 국내에서 시작 단계이며 앞으로 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] "Spectrum Monitoring Handbook International," *Telecommunication Union '95*, pp. 262-297.
- [2] Hajime Miura, Toshimitsu Higuchi, Kenji Kono, "Development of Location Finding System for Radio Monitoring," *NEC RESEARCH & DEVELOPMENT*, vol. 37, no. 1, pp. 87-98, 1996.
- [3] J.A.Cadzow, "A High Resolution Direction-of-Arrival Algorithm for Narrow-band coherent and incoherent sources," *IEEE Transactions on ASSP*, vol. 37, pp. 965-979, 1988.
- [4] 김영수, "대역 확산 신호의 초분해능 방향 탐지 시스템," *한국통신학회지*, 제13권, 제10호, pp. 1070-1079, 1979.
- [5] PJD. Gething, "Radio Direction Finding and Superresolution," London, Peter Peregrinus Ltd., 1991.

≡ 필자소개 ≡

나 인 석

성균관대학교 전자공학과 졸업
1993년 LG이노텍(주) 연구소 입사
현재 LG이노텍(주) 주임연구원

변 영 관

국민대학교 전자공학과 졸업
1997년 LG이노텍(주) 연구소 입사
현재 LG이노텍(주) 연구원