

논문 2006-43TC-12-3

직접 변환을 이용한 고속 상관형 벡터 방향탐지기

(The Fast Correlative Vector Direction Finder Conversion)

박철순*, 김대영**

(Cheol-Sun Park and Dae Young Kim)

요약

본 논문은 msec.이하의 짧은 펄스형 신호를 탐지하기 위해 RF 하향변환기에서 직접 변환 방식을 수행하고, 방위 추정에 CVDF (Correlation Vector Direction Finding) 기법을 사용하는 고속 방향탐지기의 개발에 관한 것이다. 선정된 5-채널 등간격 원형 배열구조에서 방향탐지기의 구성 및 특징을 간단히 기술하고 고속 신호수신을 위해 직접 변환을 아날로그 I/Q 복조기에 적용하여 동조시간을 제거하는 기술을 설명한다. 또한 상기 모델에 대한 CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)를 유도하고, 2종의 상관형 벡터 방향탐지 기법인 LSE 기반 및 상관계수형 알고리즘의 원리를 기술하고 SNR, 샘플수, 이격거리비 변화에 따른 성능을 비교하여 그 특징을 살펴본다. 직접 변환 기법을 사용한 RF 하향변환기 프로토타입을 제작하고, 2종의 상관형 벡터 방향탐지 기법을 적용하여 그 성능을 분석하였다. 분석 결과, 모호성 발생에 대한 내성은 상관계수형 알고리즘이 양호한 반면, 나머지 조건에서 LSE 기반 알고리즘이 우수한 것으로 조사되었고, 이 결과는 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper presents the development of the fast Direction Finder using direct conversion method, which can intercept for short pulse signal of less than 1 msec. in RF Down Converter, and CVDF(Correlative Vector Direction Finding) algorithm, which estimates DoA (Direction of Arrival). The configuration and characteristics of direction finder using 5-channel equi-spaced circular array antenna are presented and the direct conversion techniques for removing tuning time using I/Q demodulator are described. The CRLB of our model is derived, the principles of 2 kind of CVDF algorithm are explained and their characteristics are compared with CRLB w.r.t the number of samples and spacing ratio. The RF Down Converter prototype using direct conversion method is manufactured, the 2 kind of CVDF algorithm are applied and their performance are analyzed. Finally it is confirmed the LSE based CVDF algorithm is better than correlation-coefficient based except for ambiguity protection capabilities.

Keywords : CVDF, DoA, CRLB, Direct Conversion, FHSS

I. 서론

무선 방향탐지 기술은 Radar, Sonar, 항법, 위치탐지, 스마트 안테나(지능형 통신), 추적과 같은 응용에서 사용되어 오고 있다. Watson-Watt, Differential Doppler, TDOA(Time Diffrence of Arrival) 및 분석형(analytical 또는 closed-form) 인터페로메터와 같은 전

통적인 DoA 측정기법들이 장비에 적용되고 있고, 초분해능(superresolution) 알고리즘들이 다양한 펄드 응용 문제를 해결하기 위해 활발한 연구가 진행 중에 있다^[1].

본 논문은 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)와 같이 광대역 주파수 어자일(agile) 신호를 사용하는 CNR (Combat Net Radio), WLAN (Wireless LAN) 또는 Bluetooth 등 짧은 펄스형 신호에 대한 방향탐지와 클러터가 많은 환경과 배열 안테나 근처의 구조물에 의한 심한 안테나 왜곡하에서 운용 가능한 고속 방향탐지 기법 연구에 관한 것이다.

분석형 인터페로메터 방식은 기존 방향탐지 기법에 비해 높은 정확도의 DoA 측정 능력을 가지고 있다.

* 정희원, 국방과학연구소
(Agency for Defense Development)

** 정희원, 충남대학교
(Chungnam National University)

접수일자: 2006년6월2일, 수정완료일: 2006년12월12일

DoA 측정 오차는 위상 측정오차에 비례하고 배열 개구의 크기에 반비례한다. 따라서 HF 및 V/UHF와 같은 저대역 주파수에서 위상측정 오차를 줄이기 위해 배열 개구를 넓히는 것은 배열을 매우 크게 만들어야 하므로 실용성에 한계를 갖게 된다. 위상측정오차에 비례하여 성능이 열화하는 특성을 갖는 이 기법은 열악한 환경에서 정상적인 성능을 기대하는 것은 어렵다.

센서 배열 신호처리에서 초분해능 방식으로 알려진 부공간 기반(subspace based) 메소드와 파라메트릭(parametric) 메소드의 성능은 이론적으로 배열 개구 크기가 아니고 샘플수와 SNR에 따라 결정된다고 알려져 있다^[1]. 이들 기법들은 높은 수신감도, 다중 신호 분해능, 고정확도 등의 장점이 있으나, 계산 복잡도가 높아 실시간 고속 방향탐지 처리에 부적절하다.

임의 배열 구조에 적용 가능한 초분해능 알고리즘인 Bartlett beamforming, Capon, MUSIC (Multiple Signal Classification), DML (Deterministic Maximum Likelihood)의 경우, 많은 데이터 샘플을 이용하여 공분산 행렬과 방위 추정을 해야 하고^[1-4], Root MUSIC, Min-Norm 등은 정상성(stationary)이 유지되는 등간격 선형배열 (ULA : Uniform Linear Array)에만 적용이 가능하다는 배열구조에 구속조건을 갖는다^[1-2].

차원(dimension)을 축소하여 계산 복잡도를 낮춘 섹터 단위 방위 추정 기법인 BeamSpace 계열 알고리즘을 고려할 수 있으나, 사전 정보가 없는 블라인드 신호의 전방향 탐지 응용인 경우 적용이 어렵다^[1-2].

따라서 광대역 주파수 어자일 신호에 대한 고속 방향탐지와 심하게 왜곡된 안테나 패턴하에서도 통계적인 신호처리로 운용이 가능한 방향탐지 알고리즘이 필요함에 따라, 본 논문에서는 신호 수신 시간을 최소화하기 위해 직접 변환방식을 적용하고, 분석형 인터페로메터 기법에 비해 환경 적응성이 우수하다고 판단된 2종의 상관형 벡터 방향탐지 기법^[5]의 특성을 비교하여 고속 방향탐지에 적용 방안을 모색해 본다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 고속 CVDF 알고리즘을 적용한 시스템 구성 및 특징을 간략히 설명하고 직접 변환 방식의 RF 하향변환기를 기술하고, III장에서 5채널 등간격 원형 배열구조에서의 CRLB를 유도하고, 2종의 CVDF 알고리즘의 원리를 기술한다. IV장에서, CRLB와 2종의 CVDF 알고리즘의 성능을 비교하고, 필드에서 프로토타입의 시험 결과를 분석하고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 방향탐지기 구성 및 특징

N-채널 방향탐지기는 통상 배열 안테나, RF 하향 변환기(down converter), 방향탐지 처리기와 제어회로로 구성된다. 방향탐지기 구성 및 특징을 설명을 위해 그림 1과 같은 기본 N-채널 수신부(RF Part)를 고려한다.

실용성을 감안하여 3 - 5 채널에 대해 전방향 탐지 능력을 갖는 분석형 인터페로메터 알고리즘과 CVDF 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과, 위상오차가 높아짐에 따른 성능 열화도 비교에서 5-채널 CVDF가 우수하게 확인되었다^[5]. 따라서, 본 논문에서는 5-채널 구성만을 대상으로 구성 및 특징을 기술한다.

그림 2는 광대역 능동 안테나(active antenna)로 구성된 5 소자 등간격 원형 배열로서, FHSS와 같은 광대역 주파수 어자일하는 신호 탐지를 필요로 하는 응용에 적절하다. 배열 안테나의 출력은 그림 1과 같이 RF 케이블을 통해 RF 하향변환기의 입력으로 연결된다.

DoA를 추정하기 위해서는 측정 전압 V_{Mi} 는 모든 안테나 소자에 대해 측정해야 한다. 여기서 V_{Mi} 는 채널 i 번째에서 측정된 전압 벡터를 나타낸다.

N-채널 수신기에서 상대 위상차(relative phase difference) 정보를 획득하기 위해, RF 초단 회로는 안테나 소자간 측정된 진폭을 위상정보로 변환한다. 이러한 변환 후, 임의의 2개 안테나간 위상차 정보를 계산할 수 있다.

수퍼렛 방식을 이용하는 RF 하향변환기는 광대역 고속 동조기(fast synthesizer)를 이용해 입사신호를 동조한 후 혼합기(mixer)에서 출력되는 IF 신호를 ADC로 양자화 후, DDC (Digital Down Converter)를 이용해

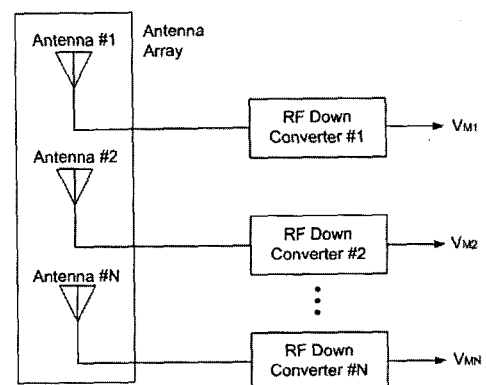


그림 1. N-채널 방향탐지 수신부의 기본 블럭도
Fig. 1. Block diagram of generic N-channel DF RF Part.

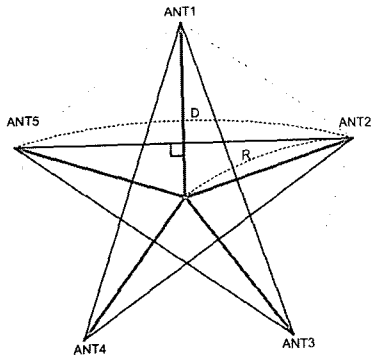


그림 2. 안테나 배열 구성
Fig. 2. Antenna array configuration.

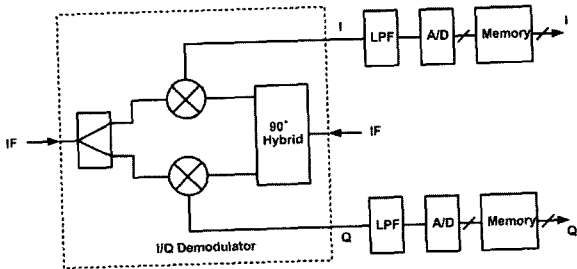


그림 3. 아날로그 I/Q 복조기를 사용한 고속 복소 벡터 측정
Fig. 3. Fast complex vector measurement using analog I/Q demodulator.

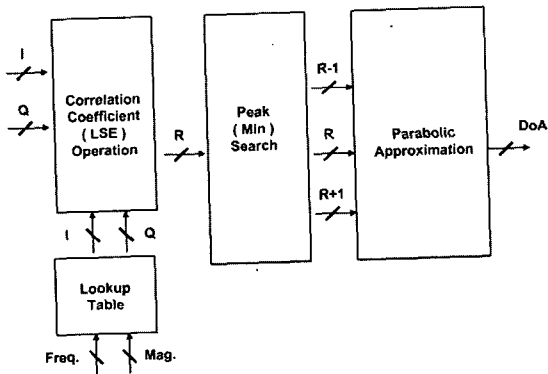


그림 4. CVDF에서 DoA 계산 과정
Fig. 4. DoA computation process in CVDF.

I/Q 복소 신호를 생성한다. 이 경우 DDC의 NCO (Numerically Controlled Oscillator) 제어 시간이 필요하게 된다. 그림 3은 아날로그 I/Q 복조기에 직접 변환 방식을 적용하여 RF 신호를 아날로그 I & Q 정보로 변환하는 과정을 나타낸다. 여기에서 입사신호를 분배하여 동조신호를 생성하는 직접 변환(또는 Zero-IF) 방식을 적용하면 동조시간을 제거할 수 있다. msec. 이하의 짧은 신호주기를 갖는 신호에 대해 추가적인 동조 시간이 요구되지 않는 직접 변환 기법은 몇 가지 단점

[6]이 있음에도 고속 수신을 요구하는 특별한 응용의 RF 하향변환기에 매력적인 수신기법이다. 즉, I/Q 채널간 정교한 매칭을 요구하는 큰 단점이 있으나, 고속 샘플 데이터 획득이 가능하다는 것이 이 기법의 장점이다.

입사신호의 방위 추정은 그림 4와 같이 2종의 CVDF 알고리즘인 LSE 기반과 상관계수형 알고리즘을 사용하여 계산한다. 2종의 CVDF 알고리즘은 그림 4와 같이 유사한 과정으로 계산된다. 추정벡터는 저장벡터(즉, array manifold)와 상관정도를 계산하고 포물선(parabolic) 근사화를 거친 후 DoA를 출력한다.

III. CRLB 및 CVDF 알고리즘

N 개 센서로 구성된 임의 평면 구성 배열을 고려하자. 배열은 WGN(White Gaussian Noise)이고, 원시야(far-field condition) 조건에서 단일 신호가 입사하는 신호원을 관측한다.

$$x(t) = A(\theta)s(t) + n(t), \quad t = 1..K \quad (1)$$

여기서, $x(t)$ 는 $N \times 1$ 복소 벡터로 N 개 협대역 수신채널의 잡음이 있는 출력을 나타냄.

인터페로메터는 DoA를 추정하기 위해 배열에서 측정된 위상차를 사용한다. i 번째 안테나 소자와 j 번째 안테나 소자간 측정된 위상차는 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{\phi}_{ij} = \arg\left(\frac{1}{K} \sum_{t=1}^K x_i(t)x_j^*(t)\right) \quad (2)$$

1. Cramer-Rao Lower Bound

추정 문제에서 기본적인 한계는 종종 CRLB (Cramer-Rao Lower Bound)를 사용하여 평가한다^[2,7]. CRLB는 θ 의 모든 불편이(unbiased) 추정의 공분산 행렬의 bound를 제공한다. $C(\theta)$ 는 추정오차의 공분산 행렬이다. 그러면,

$$C(\theta) \doteq E\{[\hat{\theta} - \theta][\hat{\theta} - \theta]^T\} \quad (3)$$

θ 의 모든 불편이 추정에 대해 다중 파라미터 CRLB는 다음과 같다.

$$C(\theta) \geq C_{CR}(\theta) \doteq J^{-1} \quad (4)$$

행렬의 부등식은 $C(\theta) - C_{CR}(\theta)$ 는 non-negative 행렬임을 의미한다. J 행렬은 FIM(Fisher's information

matrix)을 나타낸다.

단일신호가 입사하는 경우, 입사각 θ 에 대한 CRLB는 다음과 같다^[2].

$$\text{Var}(\theta) \geq \frac{1}{2K(\text{SNR}) \left(\left\| \frac{\partial a}{\partial \theta} \right\|^2 - \frac{\left\| \left(\frac{\partial a}{\partial \theta} \right)^H \cdot a(\theta) \right\|^2}{\|a(\theta)\|^2} \right)} \quad (5)$$

여기서 K 는 독립 스냅샷의 개수를 의미함.

$N \geq 3$ 인 등간격 원형 배열에 대해, 우리는 식 (5)를 적용하여 유도할 수 있다. 먼저 $a(\theta)$ 는 식 (6)과 같다.

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} \exp\left\{j2\pi \frac{2R}{\lambda} \cos(\alpha_1 - \theta)\right\} \\ \exp\left\{j2\pi \frac{2R}{\lambda} \cos(\alpha_2 - \theta)\right\} \\ \dots \\ \exp\left\{j2\pi \frac{2R}{\lambda} \cos(\alpha_N - \theta)\right\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 R 는 원형 배열의 반지름이고, N 은 안테나 소자의 개수이고 λ 는 입사신호의 파장임.

먼저 $a(\theta)$ 를 θ 에 대해 미분하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial a}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \left\{ -j2\pi \frac{2R}{\lambda} \sin(\alpha_1 - \theta) \right\} \\ \left\{ -j2\pi \frac{2R}{\lambda} \sin(\alpha_2 - \theta) \right\} \\ \dots \\ \left\{ -j2\pi \frac{2R}{\lambda} \sin(\alpha_N - \theta) \right\} \end{bmatrix} \odot a(\theta) \quad (7)$$

여기서, \odot 는 Hadamard product임.

식 (5)에 적용하기 위해 $\|a(\theta)\|^2$, $\left\| \frac{\partial a}{\partial \theta} \right\|^2$ 와 $\left(\frac{\partial a}{\partial \theta} \right)^H \cdot a(\theta)$ 을 계산하면, 식 (8) - (10)과 같다.

$$\|a(\theta)\|^2 = N \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \left\| \frac{\partial a}{\partial \theta} \right\|^2 &= \sum_{k=0}^{N-1} \left| j2\pi k \frac{2R}{\lambda} \right|^2 \sin^2(\alpha_i - \theta) \\ &= \left(2\pi \frac{2R}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{N - \sum_{i=0}^{N-1} \cos(2(\alpha_i - \theta))}{2} \\ &= \left(2\pi \frac{2R}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{N}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\alpha = 2\pi/N$ 이고, $\alpha_i = i \times \alpha_1$ 임.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial a}{\partial \theta} \right)^H \cdot a(\theta) &= j2\pi \frac{2R}{\lambda} \sum_{i=0}^{N-1} \sin(\alpha_i - \theta) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

그러면, 식 (8) - 식 (10)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\text{Var}(\theta) \geq \frac{1}{K(\text{SNR}) \left(\frac{\pi R}{\lambda} \right)^2 N} \quad (11)$$

CRLB는 비선형 영역에서 성능 bound를 정확히 제시하지 못한다. 즉, SNR 또는 K 값이 낮거나 모호성 발생에 대한 성능 bound를 해석할 수 없는 제한성을 가지고 있다. 따라서 모호성을 포함한 bound를 해석하기 위해서는 barankin bound^[2] 등과 같은 다른 bound 모델을 고려할 수 있으나 복잡도가 매우 높다.

2. LSE 기반(based) CVDF

LSE(Least Square Error) 기반 메소드에서^[7,8], 방향 탐지 알고리즘은 벡터차를 계산하고 응답벡터와 보정 벡터(array manifold) 각각에 대해 LSE를 탐색한다.

$\phi_{ij}(\theta)$ 가 array manifold의 위상차 데이터라고 하자. 인터페로메터에 대한 LS 비용 목적함수는 다음과 같다.

$$g(\theta) = e^T(\theta) R_{LSE}^{-1} e(\theta) \quad (12)$$

여기서, $e(\theta) = [\hat{\phi}_{13} - \phi_{13}; \dots, \hat{\phi}_{41} - \phi_{41}(\theta)]^T$ 임.

위상차 벡터 $\phi_{13} \dots \phi_{41}$ 은 위상 측정 정확도를 향상시키기 위해, 인접 안테나간 베이스라인이 아니고 대각 베이스라인을 이용한다(그림 2 참조).

LSE기반 메소드에서 DoA 추정 $\hat{\theta}$ 는 $g(\hat{\theta}) = \max_{\theta} \{g(\theta)\}$ 와 같이 선택된다.

3. 상관계수형 CVDF

상관계수형 메소드에서, DoA는 상관도가 최고점인 데이터로부터 획득된다. 비교는 2개 데이터 집합에 대해 수행된다. 상관 r_{xy} 는 2개 벡터간 각도에 관련된다^[9]. 2개 벡터의 각도 θ 가 작다면 $\cos \theta$ 는 거의 1에 가까워지고 r_{xy} 는 1에 근접할 것이다. 2개 벡터가 직교한다면 $\cos \theta$ 와 r_{xy} 는 0이 될 것이다. 2개 벡터가 반대 방향이라면, r_{xy} 는 -1에 가까워진다.

DoA는 다음과 같이 상관(계수) 함수 $r_{xy}(i)$ 에서 찾을 수 있다^[10,11].

$$r_{xy}(i) = \frac{\phi_M^T \phi_R(i)}{\sqrt{[\phi_M^T \phi_M][\phi_R^T(i) \phi_R(i)]}} \quad (13)$$

여기서, ϕ_M 은 측정된 위상차 벡터이고, $\phi_R(i)$ 는 array manifold 위상차 벡터이다.

IV. CVDF 알고리즘 성능 분석

1. 알고리즘 시뮬레이션

5-소자 등간격 원형 배열 안테나에서 SNR, 샘플수, 이격거리비(파장 대비 베이스라인 거리) 변화에 대한 효과를 분석하기 위해, 몇 개의 수치적 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5는 대상 추정에 대해 SNR을 변화시켜가며 RMSE (Root Mean Square Error)를 도식한 것이다. SNR이 증가하면 예상대로 모든 추정기에 대한 RMSE가 낮아지는 것을 볼 수 있다. LSE 기반 알고리즘은 SNR이 15dB이상인 영역에서 상관계수형 알고리즘보다 우수하게 나타났다. LSE 기반 알고리즘이 상관계수형 알고리즘에 비해 SNR이 높아짐에 따라 bound에 보다 tight하게 되고, 점근적 efficient 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 조건은 이격거리비 $D = 0.5\lambda$ 이고 샘플수 $K = 10$ 인 5소자 원형 배열 구조이다.

그림 6은 샘플수의 증가에 대한 각 알고리즘의 RMSE에 미치는 영향을 보인 것이다. 시뮬레이션은 $D = 0.2\lambda$ 이고 SNR = 20dB인 조건에서 수행하였다.

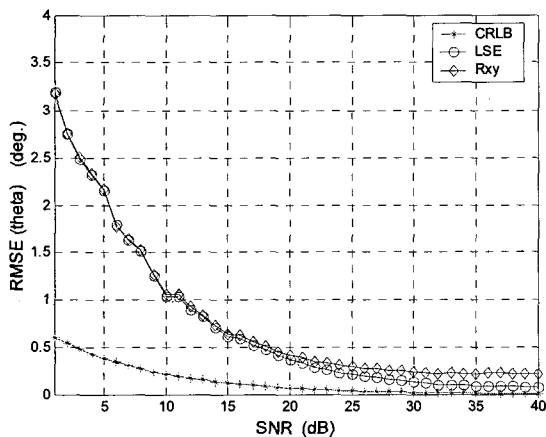


그림 5. RMSE 대 SNR
Fig. 5. RMSE versus SNR.

그림 6의 결과는 모든 추정기에서 200이하의 샘플에서는 샘플수 증가에 대한 성능 향상 효율이 높은 반면, 200이상인 영역에서 성능 향상 정도가 둔해지는 것을 알 수 있다.

SNR 및 샘플수 변화에 대한 성능 시뮬레이션에서 LSE 기반 알고리즘이 상관계수형 알고리즘에 비해 상대적으로 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 7은 파장대비 이격거리의 비율인 이격 거리비 (spacing ratio) 변화에 대해 각 알고리즘의 RMSE를 제시한 것이다. 시뮬레이션은 $K = 10$ 이고 SNR = 20dB인 조건에서 수행하였다.

그림 7에서, 모든 추정기의 RMSE는 이격비가 길어짐에 따라 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 특히 LSE 기반 알고리즘의 경우 약 $D = 1.0\lambda$ 지점에서 모호성 오차 (ambiguity error)가 발생하고 있으나 상관계수형 알고리즘의 경우 $D = 3.6\lambda$ 에서 모호성이 발생하고 있음을

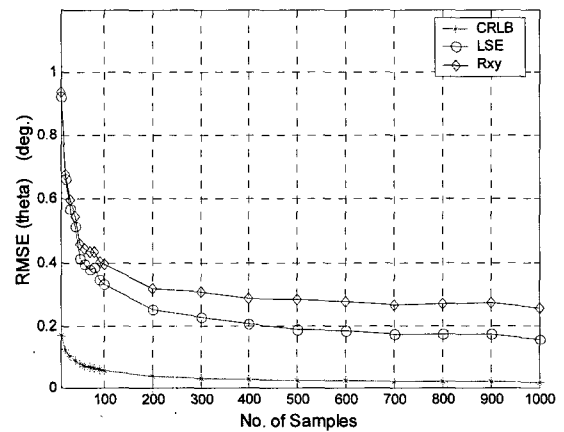


그림 6. RMSE 대 샘플수
Fig. 6. RMSE versus the number of samples.

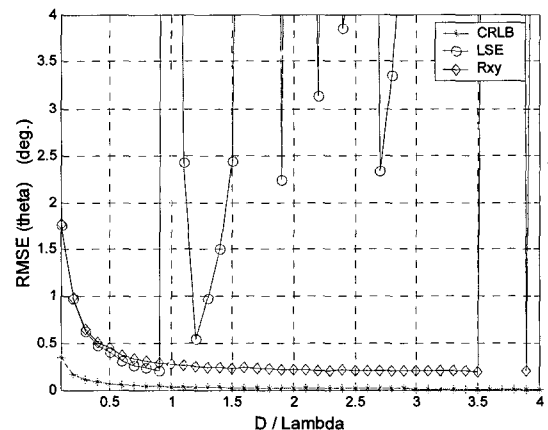


그림 7. RMSE 대 이격 거리비(파장대비)
Fig. 7. RMSE versus spacing ratio.

볼 수 있다. 이것은 상관계수형 알고리즘이 LSE 기반 알고리즘에 비해 모호성 내성(ambiguity protection) 능력이 보다 견실함을 보여 준다. 그래서 베이스라인 길이가 1.0λ 이하인 영역에서 LSE 기반 알고리즘이 우수하지만 그 이상의 이격비에서 운용한다면 상관계수형 알고리즘이 보다 적절함을 알 수 있다.

2. 프로토타입 실험 결과 및 고찰

DoA 추정 시험은 2종의 CVDF 알고리즘을 사용하여 선정된 측정 주파수에서 전방위에 대해 수행하였다. 그림 8은 5-소자 광대역 능동 안테나를 이용한 등간격 원형 배열 안테나를 보여주고 있다. 그림 9는 직접 변환 기법을 사용하여 개발한 5채널 RF 하향변환기의 프로토타입에 대한 사진이다.

측정은 필드에서 수행되었고, 송수신기간 거리는 약 300m이다. 측정 샘플수(K)는 10이고, 4 deg. 간격으로 수집하였다. DoA 측정 정확도를 향상시키기 위해, parabolic 근사화 (curve fitting) 메소드를 적용하였다.

그림 10은 $D = 0.24\lambda$ 에서 측정한 결과로서, LSE 기반 알고리즘은 4.16 deg. RMS이고 상관계수형 알고리즘은 4.17 deg. RMS가 제시되었다. S/N이 낮고, 샘플

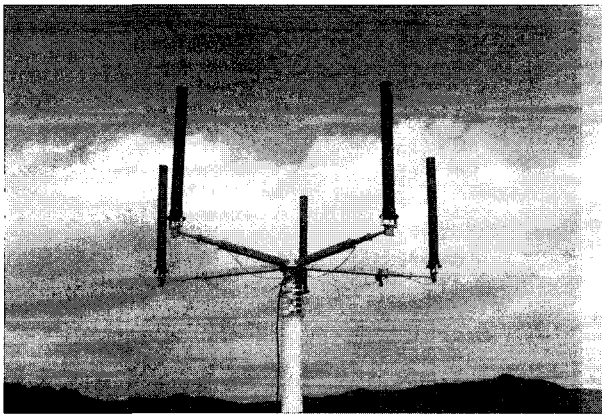


그림 8. 5-소자 안테나 배열
Fig. 8. 5-element antenna array.

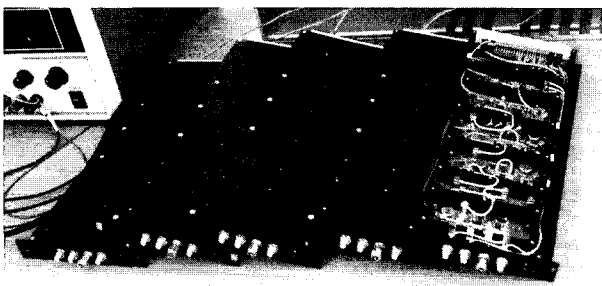


그림 9. 5-채널 RF 하향 변환기
Fig. 9. 5-channel RF down converter.

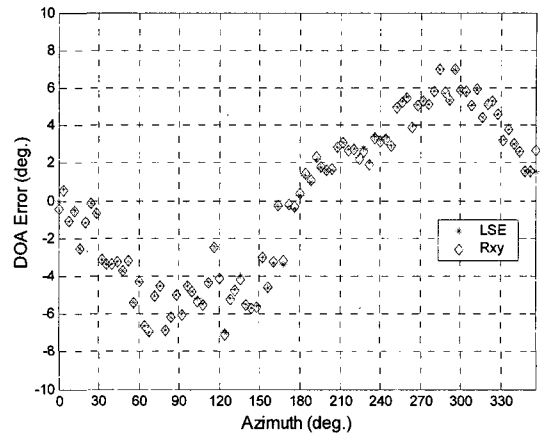


그림 10. CVDF 알고리즘의 DoA 오차 ($D = 0.24\lambda$)
Fig. 10. DoA errors of CVDF algorithm ($D = 0.24\lambda$).

수가 작아 차이가 거의 없이 측정되었다. 측정된 채널별 위상오차의 표준편차는 평균이 8 deg. RMS 수준으로 SNR = 16dB 정도로 추정할 수 있다.

그림 11은 $D = 0.67\lambda$ 에서 측정한 결과로서 LSE 기반 알고리즘은 1.82 deg. RMS이고 상관계수형 알고리즘은 1.83 deg. RMS가 제시되었다. S/N이 낮고, 샘플수가 작아 차이가 거의 없이 측정되었다. 측정된 채널별 위상오차의 표준편차는 평균이 18 deg. RMS 수준으로 SNR = 10dB 정도로 추정할 수 있다.

그림 12는 $D = 1.43\lambda$ 에서 측정한 결과로서, 상관계수형 알고리즘은 1.79 deg. RMS가 제시되었으나, LSE 기반 알고리즘은 4개의 모호성(ambiguity) 오차가 발생하여 정확도를 제시할 수 없다. 또한 4개의 측정을 제외한 나머지 오차 패턴도 그림 10 - 11과 달리 확연히 다른 패턴으로 측정되고 있음을 볼 수 있다. 이격 거리

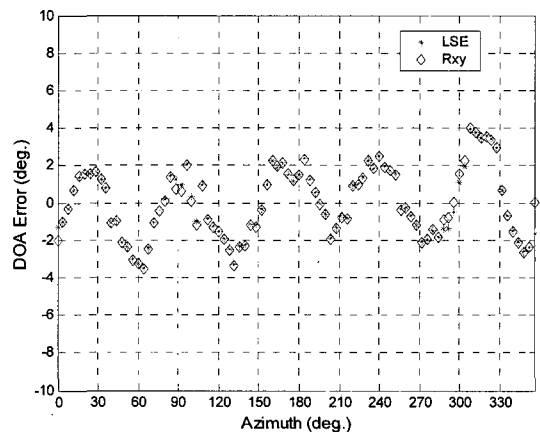


그림 11. CVDF 알고리즘의 DoA 오차 ($D = 0.67\lambda$)
Fig. 11. DoA errors of CVDF algorithm ($D = 0.67\lambda$).

비가 1.0을 넘는 조건에서 모호성이 발생한 것은 그림 7의 시뮬레이션 결과와 일치함을 볼 수 있다.

S/N이 낮고, 샘플수가 작아 차이가 거의 없으나, 이격거리비가 커짐에 따라 LSE 기반 알고리즘과 상관계수형 알고리즘이 다른 특성을 보임을 알 수 있었다. 측정된 채널별 위상오차의 표준편차는 평균이 15 deg. RMS 수준으로 SNR = 12dB 정도로 추정할 수 있다.

그림 10-12의 측정 결과에서 확인할 수 있듯이, 모호성이 발생하지 않는 이격거리에서는 LSE 기반 알고리즘이 우수하게 측정되지만, 이격거리비가 1.0이상이 되면 모호성이 발생하게 되어 추정이 불가능해지는 단점이 있다. training 또는 pilot 신호를 이용하여 높은 SNR에서 측정 가능하고 충분한 데이터 수집시간을 가지고 이격거리비가 1.0이하인 응용에서는 LSE 기반 알고리즘이 우수하다.

SNR이 낮고 샘플수가 작은 경우 2개 알고리즘은 거의 동일한 성능을 갖는 것을 그림 5와 그림 6에서 확인할 수 있다. 또한 상관계수형 알고리즘이 이격거리비가 3.6이상에서 모호성이 발생하는데 반해 LSE 기반 알고리즘은 1.0이상이 조건에서 모호성이 발생하는 것을 볼 수 있다.

따라서 이격거리비가 1.0이상이 필요한 응용인 경우 상관계수형 알고리즘을 적용해야 하지만, 그 외의 조건인 경우 LSE 기반 알고리즘을 적용하는 것이 유리하다고 할 수 있다.

통계적 신호처리 입장에서 LSE 기반 알고리즘과 상관계수형 알고리즘은 확률적 모델을 요구하지 않는 일반적인 추정기법이다. 따라서, 정상성(stationary)과 같은 통계적인 속성에 구속받지 않으므로, 임의 배열 구

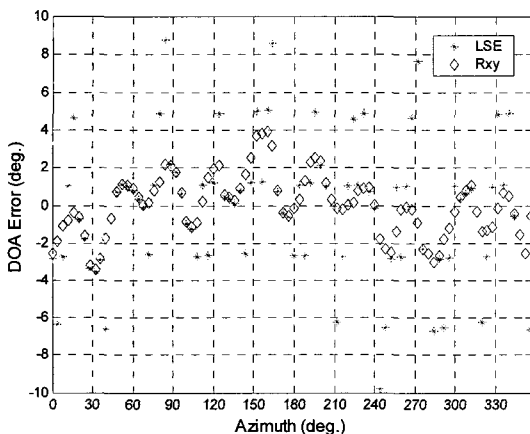


그림 12. CVDF 알고리즘의 DoA 오차 ($D = 1.43\lambda$)
 Fig. 12. DoA errors of CVDF algorithm ($D = 1.43\lambda$).

조에 적용이 가능한 장점을 갖는다.

코히어런트한 다중 신호가 입사되는 경우, CVDF 알고리즘은 분해 능력이 없고, 추정된 DoA는 입사 방위 각들에 대한 벡터 합으로 계산되어 상관 정도 (Coherency Ratio)에 따라 측정 오차가 다소 커지게 된다. CVDF에서 측정된 DoA는 계산 비용이 높지만 코히어런트 신호 분해가 가능한 MLE (Maximum Likelihood Estimation) 계열 알고리즘인 DML (Deterministic ML), SML (Stochastic ML), EM (Expectation Maximization), ECM (Expectation Conditional Maximization), SAGE (Space Alternating Generalized EM)^[12-13] 등의 global minima 수렴을 보장하기 위한 initial value로 사용이 가능하다.

IV. 결 론

본 논문은 msec.이하의 짧은 펄스형 신호를 탐지기 위해 RF 하향변환기에서 직접 변환을 수행하고, 방위 추정에 상관형 벡터 기법을 사용하는 고속 방향탐지기 개발에 관한 것이다. 선정된 5 소자 등간격 원형 배열구조에서 방향탐지 장치의 구성 및 특징을 기술하였고 고속 신호 수신을 위해 직접 변환을 아날로그 I/Q 복조기에 적용하여 동조시간을 제거하는 기술을 설명하였다. 또한 상기 모델에 대해 CRLB를 유도하였고, 2종의 상관형 벡터 방향탐지 알고리즘의 원리를 기술하였다. 시뮬레이션을 통해 CRLB와 2종의 CVDF 알고리즘의 SNR, 샘플수, 이격거리비 변화에 따른 성능을 비교하여 그 특징을 살펴보았다.

또한 직접 변환 방식을 적용한 RF 하향변환기 프로토타입을 제작하고 2종의 CVDF 알고리즘을 적용하여 그 성능을 분석하였다. 분석 결과, 모호성 발생에 대한 내성은 상관계수형 알고리즘이 강한 반면, 나머지 조건에 대해서는 LSE 기반 알고리즘이 우수한 것으로 조사되었고, 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Hamid Krim and Mats Viberg, "Two decades of Array Signal Processing Research," *IEEE Signal Processing Magazine*, July 1996.
- [2] Harry L. Van Trees, *Optimum Array Processing*, Wiley-Interscience, pp.917-1138, 2002.
- [3] 박철순, 장원, 임중수, "임의 배열구조에 적용 가능

- 한 초분해능 방탐기법 성능비교," 한국군사과학기술회 제9차 통신 전자 학술대회 논문집, 289-294, 2005년 11월
- [4] Cheol-Sun Park, Won Jang and Dae-Young Kim, "The Array Geometry Design in Airborne Microwave 2-D Direction Finding," in Proc. IEEE Workshop on Sensor Array and Multi-channel Processing (IEEE SAM 2006), pp. 65-69, Waltham, MA, USA, July 12-14, 2006.
- [5] 박철순, 임중수, 장원, 나선필, "N채널 상관형 벡터 방탐의 성능분석에 관한 연구," 한국군사과학기술회 제 6차 통신 전자 학술대회 논문집, 420-425, 2002년 10월
- [6] Behzad Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall, pp. 129 - 138, 1998.
- [7] Steven M. Kay, *Fundamental of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall, pp. 27-81, 1993.
- [8] Laszlo Balogh and Istvan. Kolla, "Angle of Arrival Estimation Based on Interferometer Principle," IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2003.
- [9] Alvin C. Rencher, *Methods of Multivariate Analysis*, Wiley-Interscience, pp.43-77, 2002.
- [10] Steve A. Hedges, "Triple-Channel Interferometer Radio Direction Finder Minimizes Error-Source Effects," MSN, pp. 77-101, May 1984.
- [11] An Xiaobo and Feng Zhenghe, "A Single Channel Correlative Interferometer Direction Finder Using VXI Receiver," 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceeding, 2002.
- [12] C. M. Tan, et al., "On the Application of Circular Arrays in Direction Finding Part I: Investigation into the estimation algorithms," 1st Annual COST 273 Workshop, Finland, May 2002.
- [13] C. M. Tan, et al., "On the Application of Circular Arrays in Direction Finding Part II: Experimental evaluation on SAGE with different circular array," 1st Annual COST 273 Workshop, Finland, May 2002.

저 자 소 개



박 철 순(정회원)
1989년 경기대학교 전자계산학과
이학사
1989년 인하대학교 전자계산
공학과 공학석사
1991년~현재 국방과학연구소
선임연구원

1997년 전자계산 조직응용 기술사
2003년~현재 충남대학교 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 신호처리, 통신응용>



김 대 영(정회원)-교신저자
1975년 서울대학교 전자공학과
학사
1977년 한국과학기술원 전기전자
공학과 석사
1983년 한국과학기술원 전기전자
공학과 박사

1983년~현재 충남대학교 교수
2002년~현재 KIEF 의장
2003년~현재 APAN-KR 의장
2003년~현재 ANF (Advanced Network Forum)
의장

2005년~현재 충남대학교 공과대학장
<주관심분야 : Advanced Comm. Protocol,
Advanced Internet Protocol, 무선인터넷>