

적응빔 형성을 이용한 다중경로 환경 내 저고도 해상표적의 고각 추적 정확도 향상

Improving the Tracking Accuracy of a Low-Altitude Sea Target in a Multipath Environment Using Adaptive Beamforming Techniques

이창현 · 전상미 · 박종국 · 나형기 · 김상현

Chang-Hyun Lee · Sang-Mi Chon · Jongkuk Park · Hyung-Ki Na · Sang-Hyun Kim

요 약

본 논문에서는 다중경로 환경에서 적응빔 형성 기법을 이용한 저고도 해상표적의 추적 정확도 향상 방법에 대해 제안하고, 이를 아날로그 빔 형성 능동위상배열(AESA: active electronically scanned array) 레이더 환경에 적용하여, 제안 방법이 반복 없는 적은 연산으로 비교적 높은 정확도의 표적 고각을 산출할 수 있음을 확인하였다. 제안 방법은 모노펄스(monopulse) 기울기 제어를 위한 기존의 적응빔 형성 제한조건에 부엽 제어 조건을 추가하고, 고각 변화 정도가 작은 저고도 해상표적의 특징을 활용하여 추적 정확도를 개선하였다. 또한 추적 정확도 향상을 위해 다양한 적응빔 형성 기법을 적용해 보고, 그 결과를 비교분석하였다.

Abstract

A method to improve the tracking accuracy of low-altitude sea targets is proposed using an adaptive beamforming algorithm in a multipath environment. It is confirmed that the target elevation can be estimated with relatively high accuracy without repetitive calculation using the proposed method in analog beamforming active electronically scanned array radar. The proposed method improves the tracking accuracy by adding a side-lobe suppression condition to the existing adaptive beamforming constraint for monopulse inclination control while accounting for the characteristics of the low-altitude sea target with less elevation change. In addition, various adaptive beamforming algorithms were applied to the proposed method, and the results were compared and analyzed to optimize tracking accuracy.

Key words: Adaptive Beamforming, Low-Altitude Sea Target, Multipath, Active Electronically Scanned Array, Tracking Accuracy

I. 서 론

주 빔 안에 다중경로 간섭이 존재하는 저고도 해상표적의 정밀한 추적은 오래전부터 해상 레이더의 핵심 요

건으로 고려되어 왔다. 해면에서는 반사 및 회절로 인해 다중경로 간섭이 발생하며, 이는 표적의 정확한 위치 추적을 어렵게 한다. 특히 반사 신호는 각도, 시간, 도플러 영역에서 표적 신호와 유사하여 일반적인 방법으로는 실

LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received December 4, 2020 ; Revised December 24, 2020 ; Accepted January 18, 2021. (ID No. 20201204-106)

· Corresponding Author: Chang-Hyun Lee (e-mail: changhyun.lee@lignex1.com)

제 표적의 신호와 구별이 어렵다. 따라서 기존 해상 레이 다들은 해상 저고도 표적 추적에서 다중경로 간섭에 의한 정확도 열화를 경험하고 있으며, 이 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 수행되고 있다.

먼저 MUSIC(multiple signal classification) 방법^[1]은 잘 알려진 고해상도 각도 추정 기법이지만, 신호의 간섭성(coherence) 문제로 인해 공분산 행렬의 특이점(singularity)을 극복하지 않으면 다중경로 전파 조건에 직접 적용할 수 없다^{[2]~[4]}. ML(maximum likelihood) 방법^{[5]~[7]}은 일관된 간섭의 경우에 상당히 정확한 각도 추정을 제공하지만, 신호 매개 변수 추정을 위한 비선형 신호 처리는 상당한 연산량을 요구한다. 또한 다중 빔 사용 방식은 저고도 표적 추적에서 높은 정확도를 보이지만 이를 수행하기 위한 디지털 빔 형성 시스템은 아직도 상당히 큰 구현 비용을 요구한다.

본 논문에서는 저고도 해상표적 탐지 레이더에서 요구하는 신속한 표적 위치 산출, 낮은 구현 비용 및 비교적 높은 정확도를 만족하는 다중경로 영향 억제 방법을 제안한다. 제안 방법은 모노펄스의 차 패턴에 보조 널을 추가하여 반사 신호를 억제하는 이중 널 형성 방법^{[8]~[10]}을 사용한다. 하지만 기존 방법이 디지털 빔 형성 또는 디지털 레이더에서만 실현 가능한 반복연산으로 정확도를 개선한 것과 다르게, 제안 방법은 반복연산 없이 부엽 제어 제한조건의 추가와 이동평균 기법^[11]의 적용으로 추적 정확도를 개선한다. 따라서 제안 방법은 상대적으로 저렴한 비용으로 구현 가능한 아날로그 능동위상배열 레이더에도 적용할 수 있다. 또한, 아날로그 능동위상배열 레이더로 저고도 해상표적을 추적하는 상황을 가정하고, LCMV^{[12]~[14]}(linear constraint minimum variance), MSLC^{[15],[16]}(constrained multiple sidelobe canceller), PFM^[17](penalty function method), GSLC^[18](generalized sidelobe canceler), CNL^[19](colored noise loading)의 다양한 적응빔 형성 기법을 제안 방법에 적용하여 추적 정확도를 비교하였다.

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 2장에서는 지구환경을 고려한 다중경로 모델을 정의한다. 3장에서는 제안 방법을 정의하고, 부엽 제어 제한조건의 추가와 이동평균 기법을 이용한 정확도 개선을 보여주며, 4장에서는 다양한 적응빔 형성 기법의 성능 비교로 최적의 가중

치를 선택하는 방안을 제시한다. 마지막으로 5장에서 논문의 결과를 요약하고 마무리한다.

II. 저고도 해상표적의 다중경로 환경

그림 1은 높이가 h_R 인 해상 레이더와 높이 h_T 인 해상표적 사이의 지구 곡률을 고려한 다중경로 환경을 보여준다. α_E 는 지구 곡률과 대기가 고려된 지구의 실효 반지름이다^{[20],[21]}. 레이더로부터 송신된 전파가 표적에 도달하는 경로는 \overline{AC} 와 \overline{ABC} 이며, 표적에서 산란 후 레이더로 수신되는 경로는 \overline{CA} 와 \overline{CBA} 이다. 따라서 레이더가 수신하는 신호는 총 4개의 신호로 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{w}_{TX}^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta_T) \cdot \left\{ \sigma_{00}\mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta_T) + Ae^{j\phi_A}\sigma_{0i}\mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta_R) \right\} \quad (1)$$

$$Ae^{j\phi_A}\mathbf{w}_{TX}^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta_R) \cdot \left\{ \sigma_{i0}\mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta_T) + Ae^{j\phi_A}\sigma_{ii}\mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0)\mathbf{a}(\theta_R) \right\} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{w} 와 \mathbf{a} 는 가중치와 입력신호 벡터이며, θ_0 는 레이더의 빔 조향각을, σ 는 4개의 신호에서 표적으로의 신호 입사각과 산란되어 나오는 신호의 각도에 따른 각각의 레이더 반사 면적(RCS: radar cross section)을 나타낸다. θ_T 와 θ_R 은 그림 1에서 보여주는 것과 같이 직접 수신 신호 각도와 반사 수신 신호의 각도를 각각 의미한다. A 와

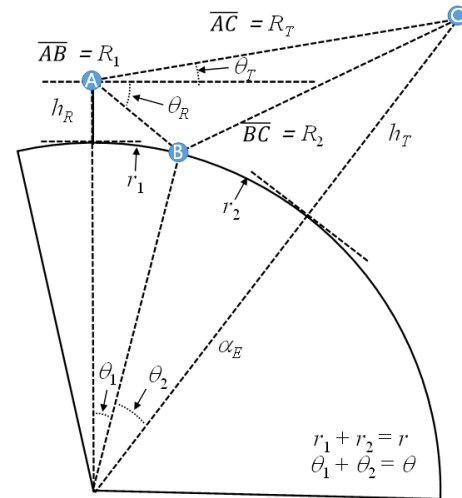


그림 1. 지구 곡률을 고려한 다중경로 환경
Fig. 1. Multipath environments in spherical earth.

ϕ_d 는 해수면의 반사계수(Γ)^[22], 분산 계수(ρ_s)^[23], 발산 지수(D)^[21], 그리고 지구 곡률과 대기^{[20],[21]}를 고려한 직접 수신 신호와 반사 수신 신호 사이의 크기 비와 위상차를 의미하며, 다음과 같이 풀어 쓸 수 있다.

$$Ae^{j\phi_d} = \Gamma D \rho_s e^{-j \frac{2\pi(R_1 + R_2 - R_T)}{\lambda}} \quad (3)$$

식 (1)은 \overline{AC} 의 경로로 송신된 신호로부터 수신된 2개의 신호를, 식 (2)는 \overline{ABC} 의 경로로 송신된 신호로부터 수신된 2개의 신호를 보여준다. σ_{00} , σ_{0i} , σ_{i0} , σ_{ii} 는 저고도 해상표적의 경우, 서로 차이가 매우 작아 모두 같다고 가정하였다. 여기서 식 (1)과 식 (2)의 4개의 수신 신호를 전부 합치고 잡음 성분을 추가하면 아래와 같은 식으로 간소화할 수 있다.

$$\sigma \left\{ \mathbf{w}_{TX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_T) + Ae^{j\phi_d} \mathbf{w}_{TX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_R) \right\} \cdot \left\{ \mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_T) + Ae^{j\phi_d} \mathbf{w}_{RX}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta_R) + \mathbf{N} \right\} \quad (4)$$

\mathbf{N} 은 정규분포를 따르는 복소수 형태의 잡음을 의미하며, 신호대잡음비에 의해 크기가 결정된다. 식 (4)의 형태로 보면 수신 신호는 송신 부분과 수신 부분으로 구분할 수 있다. 여기서 송신 부분은 합·차 패턴의 수신신호 계산 시 동일하기 때문에 합·차 패턴의 수신 신호비를 계산할 때 상쇄되어 고각 산출 정확도에 영향을 주지 않는다.

식 (4)의 수신 신호를 계산하는 데 필요한 표적 관련 정보는 직접 수신 신호와 반사 수신 신호와의 경로차 ($R_1 + R_2 - R_T$)와 수신 신호 입사각 θ_T 와 θ_R 이다. 여기서 표적과 레이더 사이 거리 R_T 와 표적의 고각 θ_T 는 레이더에서 표적을 관측하면 획득하는 정보이기 때문에 고각 산출에 필요한 나머지 정보는 θ_R , R_1 , R_2 이 되며, 이들은 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다^{[24],[25]}.

$$\theta_R = \sin^{-1} \left(\frac{2\alpha_E h_R + h_R^2 + R_1^2}{2(\alpha_E + h_R)R_1} \right) \quad (5)$$

$$R_1 = \sqrt{h_R^2 + 4\alpha_E(h_R + \alpha_E) \sin^2 \left(\frac{r_1}{2\alpha_E} \right)} \quad (6)$$

$$R_2 = \sqrt{h_T^2 + 4\alpha_E(h_T + \alpha_E) \sin^2 \left(\frac{r_2}{2\alpha_E} \right)} \quad (7)$$

여기서 r_1 의 값은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$r_1 = \frac{r}{2} - \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\alpha_E(h_R + h_T) + r^2} \cdot \sin \left(\frac{\theta}{3} \right) \quad (8)$$

여기서 $r = r_1 + r_2 = \theta \alpha_E$ 이며, θ 는 아래의 식으로 계산할 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(\alpha_E + h_R)^2 + (\alpha_E + h_T)^2 - R_T^2}{2(\alpha_E + h_R)(\alpha_E + h_T)} \right) \quad (9)$$

위와 같은 과정을 통해 직접 수신 신호와 반사 수신 신호를 계산하는 데 필요한 θ_R , R_1 , R_2 가 얻어지며, 이들은 다중경로 환경에서 저고도 해상표적의 추적 정확도 개선을 위한 제안 방법의 입력값으로 사용된다.

III. 적응빔 형성 기법을 활용한 다중경로 영향 억제

제안 방법은 반복연산 없이 정밀한 고각 산출을 위하여 잡음이 있는 환경에서 정확도를 높여주는 이동평균 기법과 근접 거리에서 정확도를 높여주는 부엽 제어 제한조건을 사용한다. 그림 2는 제안하는 다중경로 영향 억제 방법의 표적 고각을 산출하는 순서도를 간략하게 나타낸 것이다. 표적 탐지에서 획득하는 $R_{T,n-1}$ 과 $\theta_{T0,n-1}$ 을 이용하여 R_1 , R_2 , $\theta_{T,n}$ 을 계산하며, 이때 $\theta_{T,n}$ 계산에

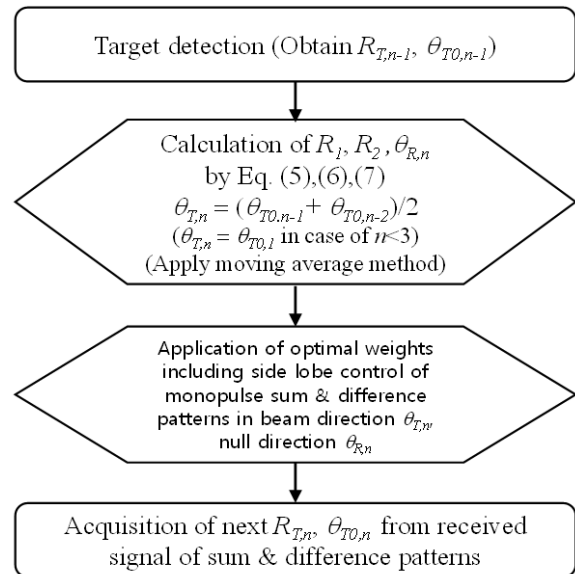


그림 2. 제안 방법 순서도

Fig. 2. Flow chart of proposed method.

는 이동평균 기법을 이용하여 정확도를 높인다. 이때 $\theta_{T,n}$ 과 $\theta_{R,n}$ 은 각각 n -번째 추적 수행에서 이동평균 기법으로 산출되는 최종 고각과 모노펄스 방법을 사용하여 산출된 측정 고각을 의미한다. 제안 방법을 통해 산출되는 최종 표적 고각은 이동평균 기법이 적용된 $\theta_{T,n}$ 이다. $\theta_{R,n}$ 의 계산에 필요한 표적 고각은 $\theta_{T,n}$ 을 이용한다. 여기서 빔의 조향 방향은 $\theta_{T,n}$ 이고, 반사 수신 신호 방향인 $\theta_{R,n}$ 에는 널을 갖는 배열 가중치를 적응빔 형성 기법으로 계산하고 이로부터 얻은 수신 신호로 다음 거리에서의 $R_{T,n}$ 과 $\theta_{T,n}$ 을 얻어 정보를 갱신한다.

제안 방법의 성능 확인을 위하여 레이더 높이(h_R)가 15 m일 때 35 m의 고도(h_T)를 갖는 표적이 14 km에서 최초 탐지되어 레이더 방향으로 접근하는 상황을 가정하였다. 부엽 제어 제한조건의 효과를 확인하기 위하여 부엽 제어 제한조건을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우로 구분하여 가중치를 계산하였다. 가중치 계산에는 LCMV 적응빔 형성 기법을 사용하였으며, 이상적인 상태에서의 비교를 위하여 잡음이 없는 조건에서 확인하였다. 계산된 가중치는 다음과 같은 식으로 표현된다^{[12]~[14]}.

$$\mathbf{w}_{LCMV} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \quad (10)$$

수식 전개에 필요한 각 물리량의 행렬 및 벡터값은 굵은 글자로 표시하여 구분하였다. \mathbf{R} 은 공분산 행렬을 의미한다. 본 논문에서는 실제 적응빔 운용 환경이 아닌 널 형성만을 위한 정지환경을 가정하였기 때문에 공분산 행렬 \mathbf{R} 은 \mathbf{I} 로 나타낼 수 있다. 부엽 제어 제한조건이 적용되지 않은 합·차 패턴의 선형 제약조건행렬 \mathbf{C} 와 \mathbf{f} 는 아래와 같이 표현할 수 있다^{[12]~[14]}.

$$\mathbf{C}_{\Sigma}^H = \mathbf{C}_{\Sigma 0}^H = \begin{pmatrix} \mathbf{a}^H(\theta_{T,n}) \\ \mathbf{a}^H(\theta_{R,n}) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}_{\Sigma} = \mathbf{f}_{\Sigma 0} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_{\Delta}^H = \mathbf{C}_{\Delta 0}^H = \begin{pmatrix} \mathbf{a}^H(\theta_{T,n}) \\ \mathbf{a}^H(\theta_{R,n}) \\ \mathbf{a}^H(\theta_{T,n} + \Delta\theta) \\ \mathbf{a}^H(\theta_{T,n} - \Delta\theta) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{f}_{\Delta} = \mathbf{f}_{\Delta 0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{a}^H(\theta_{T,n} + \Delta\theta) \mathbf{w}_{\Sigma} \\ -\mathbf{a}^H(\theta_{T,n} - \Delta\theta) \mathbf{w}_{\Sigma} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$\mathbf{a}(\theta)$ 는 θ 방향으로의 입력신호 벡터를 의미하며, \mathbf{C}_{Δ}^H 와 \mathbf{f}_{Δ} 의 3, 4행은 적응빔 형성 기법 적용 전과 후의 모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비의 기울기가 같아지도록 하는 제한조건이다^[10]. $\Delta\theta$ 는 반사 수신 신호 방향의 널 형성 전 모노펄스의 합 패턴 크기와 차 패턴의 크기가 같아지는 각도이다^[10]. \mathbf{w}_{Σ} 는 적응빔 형성 기법 적용 후의 합 패턴 가중치이다. \mathbf{C}_{Σ} , \mathbf{f}_{Σ} , $\mathbf{C}_{\Delta 0}$, $\mathbf{f}_{\Delta 0}$ 는 앞으로 나오는 수식에 반복적으로 사용되기 때문에 수식 전개를 간소화하기 위해 정의하였다. 부엽 제한조건이 추가된 합·차 패턴의 선형 제약조건행렬 \mathbf{C} 와 \mathbf{f} 는 아래와 같이 표현된다^[13].

$$\mathbf{C}_{\Sigma}^H = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\Sigma 0}^H \\ \widetilde{\mathbf{w}}_q^H \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}_{\Sigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^H(\theta_{T,n}) \mathbf{w}_0 \\ 0 \\ \widetilde{\mathbf{w}}_q^H \cdot \widetilde{\mathbf{w}}_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{C}_{\Delta}^H = \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{\Delta 0}^H \\ \widetilde{\mathbf{w}}_q^H \end{pmatrix}, \quad \mathbf{f}_{\Delta} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\Delta 0} \\ \widetilde{\mathbf{w}}_q^H \cdot \widetilde{\mathbf{w}}_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 $\widetilde{\mathbf{w}}_q = (\mathbf{I} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^H \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^H) \mathbf{w}_0$ 이며, \mathbf{w}_0 는 적응빔 형성 기법 적용 전의 기본 가중치를 의미하며, $\theta_{T,n}$ 방향으로 조향된 30 dB 부엽을 형성하는 Taylor와 Bayliss^[26]가중치와 같다.

그림 3은 LCMV 적응빔 형성 기법을 제안하는 다중경로 억제 방법에 적용했을 때의 표적 고각 산출 결과를 보여준다. 모의실험 조건은 앞서 언급된 바와 같이 레이더 높이(h_R)가 15 m일 때, 35 m의 높이(h_T)를 갖는 표적이 14 km에서 최초 탐지되어 레이더 방향으로 접근하는 경우를 가정하였다. 직접 수신 신호와 반사 수신 신호비 ($Ae^{j\phi_d}$)에 영향을 주는 해상 상태(sea state)^[27]는 2로 설정하였으며, 추적 고각은 표적이 100 m 이동할 때마다 갱신하였다. X-대역에서 반파장 간격의 80개의 방사소자가 고각 방향으로 등간격 배열된 선형배열을 가정하여 모의실험에 사용하였으며, 사용된 배열에 Taylor 30 dB 가중치를 적용한 합 패턴의 고각 방향 반전력 빔 폭은 1.6°이다.

그림 3(a)의 기본 모노펄스는 다중경로 억제 방법을 적용하지 않고 일반적인 모노펄스 방법을 이용한 고각 산출 결과이다. 기본 모노펄스 결과는 다중경로 영향으로 상당히 큰 오차를 보이지만, 다중경로 영향 억제 방법이

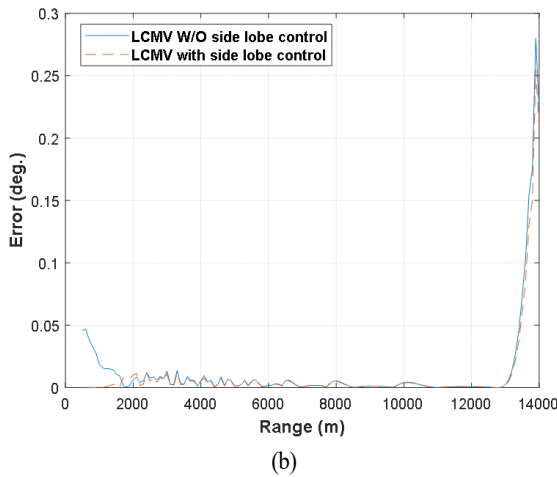
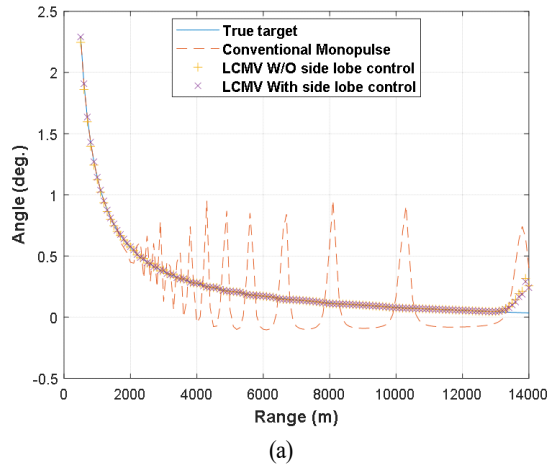


그림 3. 잡음이 없는 조건에서의 고각 산출 결과
Fig. 3. Elevation estimation results in noise-free conditions.

적용된 결과는 실제 표적의 고각과 거의 일치하여 매우 작은 오차를 갖는다. 이를 통해 잡음이 없는 경우, 제안 방법이 다중경로 영향을 원활히 억제하여 고각 산출 오차를 크게 줄여주는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)는 적응빔 형성 과정에 부엽 제어 제한조건을 넣었을 때의 효과 확인을 위하여 오차를 정밀하게 비교한 결과이다. 부엽 제어 제한조건이 추가된 결과는 2 km 이내의 거리에서 더 우수한 고각 산출 정확도를 보여준다. 이것은 부엽 제어 제한조건이 적응빔 형성 과정에서 발생하는 모노펄스 합·차 패턴 수신 신호비의 변화를 최소화 해주기 때문이다 [10],[14]. 제안 방법은 식 (12)의 C_{Δ}^H 와 f_{Δ} 3, 4행에 표현된 제한조건을 이용하여 적응빔 형성 기법 적용 전과 후의

모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비의 기울기가 같아지도록 한다. 하지만 위의 제한조건은 $\theta_{T,n} - \Delta\theta$, $\theta_{T,n}$, $\theta_{T,n} + \Delta\theta$ 를 제외한 각도에서 오차가 발생하는 한계가 있다. 이로 인한 오차는 근접 거리에서 더욱 명확하게 발생하는데, 그 이유는 근접 거리에서 거리에 따른 표적 고각의 변화율이 증가하여, 산출 고각이 $\theta_{T,n}$ 에서 멀어지기 때문이다. 그런데 부엽 제어 제한조건의 원리는 널 형성 전 Taylor와 Bayliss가 적용되어 낮은 부엽 수준을 갖는 기존 가중치에서 최소한의 변화로 적응빔을 형성하여 기존의 낮은 부엽 수준을 유지하는 것이다. 가중치 변화를 최소화하는 특징으로 인해 적응빔 형성 기법 적용 전후 합·차 패턴의 수신 신호비 오차 또한 감소하게 되고, 따라서 고각 변화율이 높은 경우의 고각 산출 오차가 감소한다. 이에 관한 내용은 그림 4에서 확인할 수 있다. 그림 4는 표적과 레이더 사이의 거리(R_T)가 1 km일 때 모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비를 보여준다. $\theta_{T,n} - \Delta\theta$ 부터 $\theta_{T,n} + \Delta\theta$ 까지 각도 범위에서의 결과를 보여주며, $\theta_{T,n}$ 이 가로축의 0°가 되도록 하였다. 그림 4의 결과로부터 부엽 제어 제한조건이 적용되기 전에는 적응빔 형성 과정에서 발생하는 모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비의 오차가 $\theta_{T,n} - \Delta\theta$, $\theta_{T,n}$, $\theta_{T,n} + \Delta\theta$ 를 제외한 각도에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 부엽 제어 제한조건의 적용으로 이 오차가 크게 줄여주는 것을 확인할 수 있다.

이후의 모의실험은 잡음이 있는 상태에서 제안 방법의

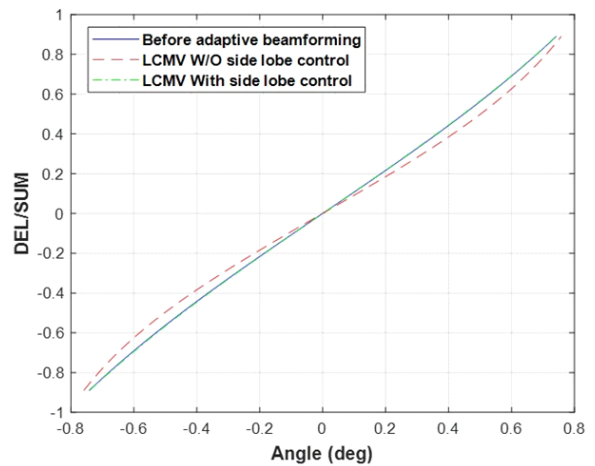


그림 4. 합·차 패턴의 수신 신호비
Fig. 4. Received signal ratio of SUM and DEL pattern.

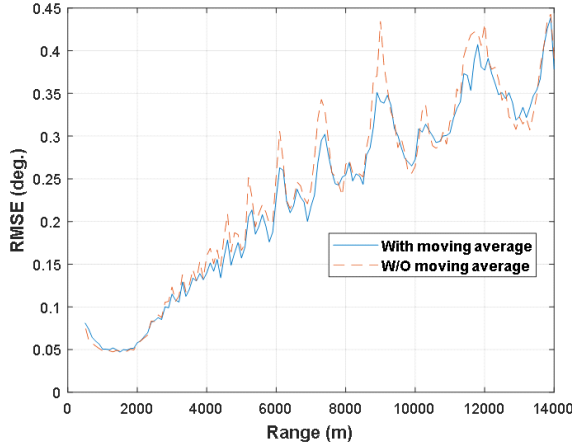


그림 5. 평균 제곱근 오차 (1,000회 반복 수행)

Fig. 5. Root mean square error (1,000 iterations).

성능을 확인하기 위하여 식 (4)와 같이 수신 신호에 잡음을 추가하여 수행하였다. 또한 아날로그 빔 형성 능동위상배열 레이더에 적용한 상황을 가정하기 위하여 6 bit의 감쇠기와 위상 변위기의 양자화 오차를 추가하고, 감쇠기의 최대 감쇠율은 32 dB로 설정하였다. 또한 각 방사소자에 입력되는 가중치에 감쇠기와 위상 변위기의 양자 간격을 표준편차로 갖는 정규분포 오차를 추가하여 실제 아날로그 능동위상배열 레이더의 운용 환경과 유사하게 하였다.

그림 5는 이동평균 기법이 적용된 경우와 적용되지 않은 경우의 평균 제곱근 오차(RMSE: root mean square error)를 보여준다. 모의실험 조건은 그림 3의 조건에서 신호대잡음비 30 dB의 잡음과 아날로그 빔 형성 능동위상배열 레이더의 오차를 추가한 것이며, 평균 제곱근 오차는 1,000회 반복 수행을 통해 계산하였다. 그림 5의 결과로부터 이동평균 기법이 잡음으로 인한 오차의 급격한 증가를 억제하여 고각 변화율이 적은 저고도 해상표적의 추적 정확도를 개선해 주는 것을 확인할 수 있다.

IV. 적응빔 형성 기법에 따른 추적 정확도 분석

적응빔 형성 기법에 따라 가중치를 찾는 방법에 차이가 있고 이로 인해 형성된 빔의 특성 또한 달라진다. 이번 장에서는 다중경로 환경에서 잡음 수준별 최적의 적응빔 형성 기법을 찾기 위하여 LCMV^{[12]~[14]} 외에 MSLC^{[15][16]},

PFM^[17], GSLC^[18], CNL^[19]의 기법을 제안 방법에 적용하여 다중경로 환경에서의 추적 정확도를 비교한다. 모든 적응빔 형성 기법에는 이전 장에서 수행한 것과 동일하게 합패턴에는 직접 수신 신호 방향으로의 주 빔 형성 및 반사 수신 신호 방향으로의 널 형성, 그리고 널 형성 후에도 낮은 부엽 수준을 유지하기 위한 부엽 제어 제한조건이 적용되고, 차 패턴에는 두 개의 널 형성과 부엽 제어 그리고 모노펄스 합·차 패턴의 수신 신호비를 유지하기 위한 기울기 제어 제한조건이 적용된다. 각 적응빔 형성 기법에서 가중치 계산에 공통으로 사용되는 w_0 는 적응빔 형성 기법 적용 전의 기본 가중치를 의미하며, $\theta_{T,n}$ 방향으로 조향된 30 dB 부엽을 형성하는 Taylor와 Bayliss^[26] 가중치와 같다. 각 적응빔 형성 기법으로 계산한 가중치는 다음과 같다.

MSLC^{[15][16]}: Constrained multiple sidelobe canceller

$$\begin{aligned} w_{MSLC} &= R^{-1} H C (C^H R^{-1} H C)^{-1} f \\ C_{\Sigma}^H &= C_{\Sigma 0}^H, \quad f_{\Sigma} = f_{\Sigma 0} \\ C_{\Delta}^H &= C_{\Delta 0}^H, \quad f_{\Delta} = f_{\Delta 0} \\ H &= \text{diag}(|w_0|) \end{aligned} \quad (15)$$

PFM^[17]: Penalty function method

$$\begin{aligned} w_{PFM} &= A^{-1} C (C^H A^{-1} C)^{-1} f \\ &\quad + \kappa^2 (I - A^{-1} C (C^H A^{-1} C)^{-1} C^H) A^{-1} w_0 \\ C_{\Sigma}^H &= C_{\Sigma 0}^H, \quad f_{\Sigma} = \begin{pmatrix} a^H(\theta_{T,n}) w_0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ C_{\Delta}^H &= C_{\Delta 0}^H, \quad f_{\Delta} = f_{\Delta 0} \end{aligned} \quad (16)$$

GSLC^[18]: Generalized sidelobe canceler

$$\begin{aligned} w_{GSLC} &= (I - B(B^H R B)^{-1} B^H R) C (C^H C)^{-1} f \\ C_{\Sigma}^H &= \begin{pmatrix} C_{\Sigma 0}^H \\ \widetilde{w}_q^H \end{pmatrix}, \quad f_{\Sigma} = \begin{pmatrix} a^H(\theta_{T,n}) w_0 \\ 0 \\ \widetilde{w}_q^H \cdot \widetilde{w}_q \end{pmatrix} \\ C_{\Delta}^H &= \begin{pmatrix} C_{\Delta 0}^H \\ \widetilde{w}_q^H \end{pmatrix}, \quad f_{\Delta} = \begin{pmatrix} a^H(\theta_{T,n}) w_0 \\ 0 \\ a^H(\theta_{T,n} + \Delta\theta) w_0 \\ a^H(\theta_{T,n} - \Delta\theta) w_0 \\ \widetilde{w}_q^H \cdot \widetilde{w}_q \end{pmatrix} \\ \widetilde{w}_q &= w_0 - C_0 (C_0^H C_0)^{-1} C_0^H w_0 \end{aligned} \quad (17)$$

CNL^[19]: Colored noise loading

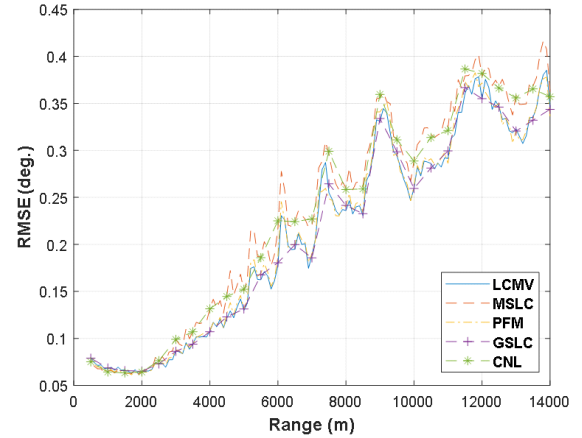
$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{CNL} &= (\mathbf{R} + \mathbf{R}_d)^{-1} \mathbf{C}(\mathbf{C}^H(\mathbf{R} + \mathbf{R}_d)\mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \\ \mathbf{C}_{\Sigma}^H &= \mathbf{C}_{\Sigma 0}^H, \quad \mathbf{f}_{\Sigma} = \mathbf{f}_{\Sigma 0} \\ \mathbf{C}_{\Delta}^H &= \mathbf{C}_{\Delta 0}^H, \quad \mathbf{f}_{\Delta} = \mathbf{f}_{\Delta 0} \\ \mathbf{R}_d &= \sigma \cdot \text{diag}(\text{diag}(\mathbf{w}_0)^{-1} \mathbf{a}(\theta_{T,n})) \end{aligned} \quad (18)$$

PFM의 κ^2 과 CNL의 σ 은 10으로 설정하였으며, GSLC의 차단 행렬(blocking matrix) B 는 매트랩으로 다음과 같은 수식을 통해 얻을 수 있다.

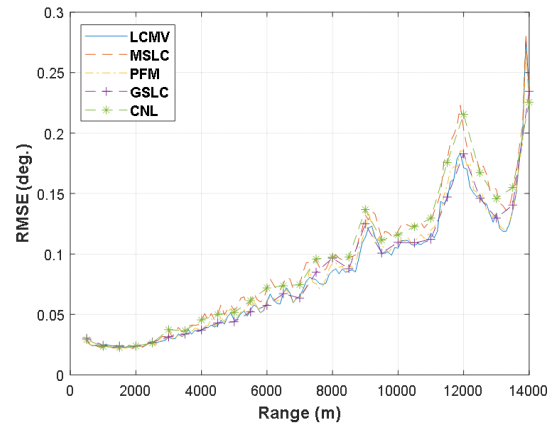
$$\begin{aligned} [Q, R] &= \text{qr}(\mathbf{C}) \\ B &= Q(:, (\text{size}(\mathbf{C}, 2) + 1 : \text{end})) \end{aligned} \quad (19)$$

5가지의 적응빔 형성 기법의 고각 산출 정확도 확인을 위해 신호대잡음비가 각각 20 dB, 30 dB, 40 dB일 때 1,000회 반복 수행한 결과의 평균 제곱근 오차(RMSE: root mean square error)를 비교하였다. 그림 6은 비교 결과를 보여주며, 모의실험 수행 조건은 그림 5의 수행 조건과 같다. 평균 제곱근 오차는 단일 수행에서 발생할 수 있는 오차의 실효 평균값을 보여주어 아날로그 빔 형성 능동 위상배열 레이다에 제안 방법을 적용하였을 때 평균적으로 발생하는 오차를 확인할 수 있게 해 준다. 그림 6의 결과로부터 신호대잡음비가 좋아질수록 추적 정확도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 제안 방법은 반복연산을 수행하지 않음에도 불구하고, 신호대잡음비가 30 dB인 경우 약 5 km 이내 거리에서, 40 dB인 경우, 약 8 km 이내의 거리에서 5가지의 적응빔 형성 기법 모두 0.05° 이하의 높은 정확도를 갖는 것을 보여준다.

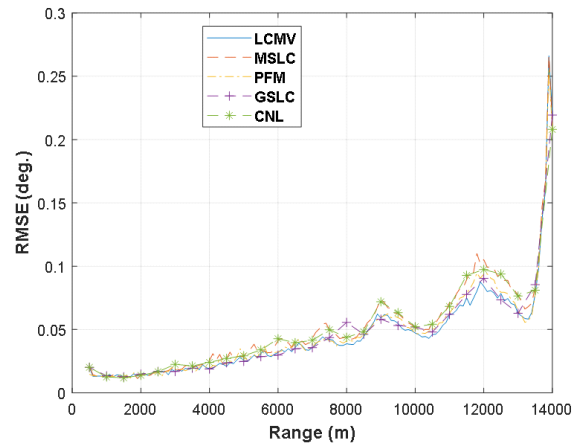
평균 제곱근 오차의 비교는 각 적응빔 형성 기법의 대략적인 정확도를 확인할 수 있지만, 특정 상황에서 어떠한 적응빔 형성 기법이 우수한지 직관적으로 비교하기에는 어려움이 있다. 따라서 더욱 명확하게 적응빔 형성 기법에 따른 추적 정확도를 비교하기 위하여 모든 측정 거리에서의 평균 제곱근 오차에 대해 다시 한번 평균을 취하여 신호대잡음비가 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB, 50 dB, 60 dB인 조건에서 비교해 보았다. 그림 7은 비교 결과를 보여주며, 가로축은 신호대잡음비, 세로축은 해당 신호대잡음비에서의 거리별 평균 제곱근 오차의 평균이며, 이는 해당하는 신호대잡음비에서 가장 큰 값을 기준으로 정규



(a) 20 dB



(b) 30 dB



(c) 40 dB

그림 6. 평균 제곱근 오차 (1,000회 반복 수행)

Fig. 6. Root mean square error (1,000 iterations).

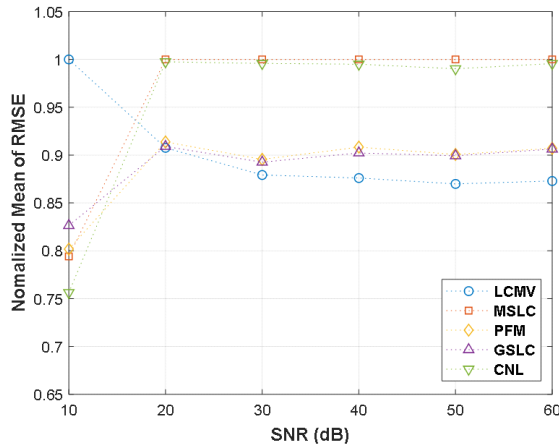


그림 7. 정규화된 평균 제곱근 오차의 평균(1,000회 반복 수행)

Fig. 7. Normalized mean of root mean square error(1,000 iterations).

화되었다. 각 신호대잡음비에서 가장 큰 값의 거리별 평균 제곱근 오차의 평균으로 정규화되었기 때문에 그림 7에서는 신호대잡음비 별 적응빔 형성 기법에 따른 평균 제곱근 오차를 비교할 수 있다. 여기서 각각의 신호대잡음비에서 모두 다른 값의 거리별 평균 제곱근 오차로 정규화되었다는 것에 주의하자. 그림 7의 결과로부터 잡음 비율이 높을 때와 낮을 때 각각 더 높은 정확도를 보이는 적응빔 형성 기법이 있다는 것을 확인할 수 있다. 신호대잡음비가 매우 낮은 10 dB인 경우, LCMV 기법이 다른 적응빔 형성 기법에 비해 현저하게 낮은 정확도를 보인다. 나머지 적응빔 형성 기법들은 유사한 수준의 정확도를 보여주지만, 그 중 CNL 기법이 가장 높은 정확도를 갖는 것을 확인하였다. 그리고 신호대잡음비가 상대적으로 낮은 20 dB인 경우에는 CNL 기법과 MSLC 기법이 가장 큰 오차를 가지며 다른 기법들은 비슷한 수준의 정확도를 보여준다. 신호대잡음비 특성이 상대적으로 좋은 30 dB 이상인 경우에는 CNL 기법과 MSLC 기법을 제외한 나머지 기법들이 상대적으로 우수한 정확도를 보여주지만, 그중에서 LCMV 기법이 전체적으로 가장 뛰어난 정확도를 갖는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 아날로그 빔 형성 능동위상배열 레이더

에 적용 가능한 저고도 해상표적의 고각 추적 정확도 개선 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 저고도 해상표적의 고각 변화율이 매우 작다는 특징을 이용하여 이에 적합한 이동평균 기법의 적용으로 고각 산출 정확도를 높였다. 또한 기존 이중 널 방법의 제한조건에 부엽 제어 제한조건을 추가하여 표적의 고각 변화율이 상대적으로 큰 근접 거리에서의 고각 산출 정확도를 개선하였다. 이러한 방법을 통하여 제안 방법은 반복연산이 없음에도 불구하고, 다중경로 환경에서 높은 정확도로 표적 고각을 산출한다. 또한 LCMV 기법 등 5종류의 적응빔 형성 기법을 제안 방법에 적용하여 다양한 잡음 수준을 갖는 다중경로 환경에서 고각 산출 정확도를 비교하였으며, 비교 결과를 분석하여 특정 잡음 수준에서 어떤 적응빔 형성 기법이 가장 높은 추적 정확도를 갖는지를 확인하였다.

References

- [1] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [2] T. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 34, no. 4, pp. 806-811, Aug. 1985.
- [3] S. U. Pillai, B. H. Kwon, "Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 37, no. 1, pp. 8-15, Jan. 1989.
- [4] C. Qi, Z. Chen, Y. Wang, and Y. Zhang, "DOA estimation for coherent sources in unknown nonuniform noise fields," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no. 3, pp. 1195-1204, Jul. 2007.
- [5] A. Jaffer, "Maximum likelihood direction finding of stochastic sources: A separable solution," in *Proceedings of the 1988 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, New York, NY, Jul. 1988, pp. 2893-2896.
- [6] A. Sinha, Y. Bar-Shalom, W. Blair, and T. Kirubarajan, "Radar measurement extraction in the presence of

- sea-surface multipath," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 550-567, Apr. 2003.
- [7] M. Djeddou, A. Belouchrani, and S. Aouada, "Maximum likelihood angle-frequency estimation in partially known correlated noise for low-elevation targets," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 8, pp. 3057-3064, Aug. 2005.
- [8] W. D. White, "Low-angle radar tracking in the presence of multipath," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 10, no. 6, pp. 835-852, Nov. 1974.
- [9] M. Sebt, A. Sheikhi, and M. Nayebi, "Robust low-angle estimation by an array radar," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 4, no. 6, pp. 780-790, Dec. 2010.
- [10] D. Park, E. Yang, S. Ahn, and J. Chun, "Adaptive beamforming for low-angle target tracking under multipath interference," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 2564-2577, Oct. 2014.
- [11] S. M. Sherman, D. K. Barton, *Monopulse Principles and Techniques*, Boston, MA, Artech House, 2011.
- [12] O. L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," in *Proceedings of the IEEE*, Aug. 1972, vol. 60, no. 8, pp. 926-935.
- [13] L. J. Griffiths, K. M. Buckley, "Quiescent pattern control in linearly constrained adaptive arrays," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 35, no. 7, pp. 917-926, Jul. 1987.
- [14] J. Kim, H. J. Yang, and J. Chun, "Sidelobe suppressing beamforming using linearly constrained adaptive arrays for low angle tracking," in *42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2008, pp. 407-410.
- [15] S. Applebaum, "Adaptive arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 24, no. 5, pp. 585-598, Sep. 1976.
- [16] S. P. Applebaum, D. J. Chapman, "Adaptive arrays with main beam constraints," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 24, no. 5, pp. 650-662, Sep. 1976.
- [17] D. T. Hughes, J. E. McWirtter, "Penalty function method for sidelobe control in least-squares adaptive beam forming," in *Proceedings Advanced Signal Processing Algorithms*, San Diego, CA, Jun. 1995, vol. 2563, pp. 170-181.
- [18] K. Buckley, L. Griffiths, "An adaptive generalized sidelobe canceller with derivative constraints," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 311-319, Mar. 1986.
- [19] J. D. Hiemstra, "Colored diagonal loading," in *Proceedings of the 2002 IEEE Radar Conference*, Long Beach, CA, 2002, vol. 02CH37322, pp. 386-390.
- [20] D. C. Livingston, *The Physics of Microwave Propagation*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1970.
- [21] L. V. Blake, *Radar Range-Performance Analysis*, Norwood, MA, Artech House, 1986.
- [22] S. J. Wu, A. K. Fung, "A theory of microwave apparent temperature over the ocean," *University of Kansas Center for Research, Lawrence, KS, NASA Contractor Report NASA CR-2329*, 1973.
- [23] D. Y. Northam, "A stochastic simulation of low grazing angle, forward scatter, over-water multipath effects," *Naval Research Laboratory, Washington, DC, NRL Report 5658*, Dec. 1981.
- [24] S. Kingsley, S. Quegan, *Understanding Radar Systems*, Raleigh, NC, SciTech, 1999.
- [25] D. E. Kerr, *Propagation of Short Radio Waves*, New York, NY, McGraw-Hill, 1964.
- [26] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [27] J. I. Bowditch, *American Practical Navigator*, 2nd ed. Defense Mapping Agency Hydrographic Center, 1920.

이 창 현 [LIG 넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0297-2204>



2013년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2015년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2020년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2020년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 선임연구원

구원

[주 관심분야] 위성 배열 안테나, 메타구조 안테나, 능동 위성 배열 안테나 시스템 등

나 형 기 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3031-8998>



1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
1996년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 연구원

원

[주 관심분야] 레이더, 안테나 등

전 상 미 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4047-8474>



1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2006년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2006년 5월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 안테나 및 능동 위성 배열 레이더, 다기능 레이더 시스템 설계 등

김 상 현 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2923-1788>



2002년 2월: 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)
2017년 2월: 고려대학교 국방기술경영학과 (공학석사)
2007년 4월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연구원

[주 관심분야] 능동 위성 배열 안테나, 체계설계, 사격통제체계, 구동장치, 진동/충격/소음 등

박 중 국 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 8월: 서울대학교 전자컴퓨터공학부 (공학박사)
2001년 11월~현재: LIG 넥스원(주) 수석연구원

연구원

[주 관심분야] 능동 위성 배열 안테나 시스템, 다기능 레이더 시스템, 적응형 빔 형성 및 전자파 수치해석 등