

모노펄스 추적 알고리즘 성능 향상을 위한 능동위상배열안테나 제어 기법 (Active Phased Array Antenna Control Scheme for Improving the Performance of Monopulse Tracking Algorithm)

정진우*, 박성일**, 이태원***

(Jinwoo Jung, Sungil Park, Teawon Lee)

요약

모노펄스 추적 알고리즘은 대국의 송신 신호를 기반으로 대국의 위치를 추정하는 추적 알고리즘이다. 모노펄스 추적 알고리즘에 의한 추정 위치는 안테나의 합 및 차 신호 패턴에 의한 모노펄스 비율 곡선(MR-C; Monopulse Ratio curve)을 기반으로 산출된다. 따라서 MR-C의 선형 구간에 비례하여 높은 정확도의 추정 위치를 산출할 수 있는 범위가 증가하게 된다. 본 논문에서는 능동위상배열안테나가 적용된 추적 안테나 시스템에 있어, 능동위상배열안테나의 빔 형성 기법을 적용하여 MR-C의 선형 구간을 확장하는 방법을 제안하였다. 동일한 안테나 시스템을 기반으로 모의실험을 수행한 결과, 제안된 기법의 적용 유/무에 따라 MR-C의 선형 구간이 약 2배 정도 차이가 남을 확인하였다.

■ **중심어** : 모노펄스 추적 알고리즘 ; 모노펄스 비율 곡선 ; 능동위상배열안테나 ; 빔 형성 기법

Abstract

The monopulse tracking algorithm can estimate the location of a partner station based on an RF (Radio Frequency) signal. The location of the partner station is estimated based on the monopulse ratio curve (MR-C), which is calculated based on the sum and difference signal patterns of an antenna. Therefore, the range in which the estimated location can be calculated with high accuracy increases in proportion to the linear region of MR-C. In this paper, we proposed a method to extend the linear region of the MR-C curve using the beamforming technique for the tracking antenna system using the active phased array antenna. Simulation results based on the same antenna system, it was confirmed that the linear region of MR-C was enlarged by about twice as much as the general case where the proposed method was not applied.

■ **keywords** : Monopulse tracking algorithm ; Monopulse ratio curve ; Active phased array antenna ; Beamforming

I. 서론

최근 무인기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)를 다양한 분야에 활용하는 사례가 증가하고 있다. 특히, 산림 환경 감시, 재난 및 사고 대응 그리고 국방 분야 등 영상 정보를 획득하여 감시 정찰하는 분야에서 활용성이 증가하고 있다[1-3].

무인기를 활용하여 획득한 영상 정보의 활용성을 증가시키기 위해서는 관제국에서 무인기를 원활하게 조종 통제할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 획득한 영상 정보를 실시간으로 확인할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 항공국과 지상국(관제국) 사이에 대용량 데이터 링크(Data Link)가 구축되어야 한다[4].

원활한 데이터 링크 구축을 위해서는 항공국을 향해 지속적으로 빔을 조향할 수 있는 추적 안테나 시스템이 필요하다.

항공국 추적 안테나 시스템에 있어, 안테나는 이동중인 항공국을 고려해 빠른 빔 조향이 필요하다. 능동위상배열안테나(Active Phased Array Antenna)는 각 방사소자에 여기되는 급전신호의 위상 및 크기 값을 가중하여 빔을 조향 및 형성할 수 있는 안테나로 빠르고 정밀한 빔 조향이 가능하다[5].

추적 방법으로는 MUSIC(MULTiple SIGNAL Classification) 알고리즘, 순차 로빙(Sequential Lobing) 알고리즘 그리고 모노펄스(Monopulse) 추적 알고리즘 등 다양한 추적 알고리즘을 기반으로 구현되어 왔다[6-8]. 이중 모노펄스 추적 알고리즘은 대국에서 방사하는 전파를 다수의 안테나로 수신한 후, 신호 합

* 정회원, 동신대학교 에너지IoT전공, 조교수

** 정회원, 동신대학교 정보통신공학과, 부교수

*** 정회원, 동신대학교 컴퓨터공학과, 조교수

성을 통해 대국의 위치를 추정하는 알고리즘으로, 추정각 산출 속도가 빨라 항공국과 같이 이동중인 대국을 추적하는 분야에 많이 사용되고 있다.

모노펄스 추적 알고리즘은 합성 신호인 합신호와 차신호의 패턴을 기반으로 산출된 모노펄스 비율 곡선(Monopulse Ratio Curve)의 선형 구간을 기준으로 추정각을 산출한다. 따라서 선형 구간이 넓은 수록 넓은 범위에 대한 정밀추적 수행 확률이 일반적으로 증가하게 된다. 더불어, 선형 구간이 넓으면, 항공기 운항에 따른 자세제어 상황에서 발생하는 간헐적 전파 가시선(LOS; Line of Sight) 차단 상황에서도 유연하게 재추적을 수행할 확률이 증가하게 된다[9].

모노펄스 비율 곡선의 선형 구간 확장을 위한 연구로 모노펄스 수신기를 구성하는 소자의 값을 휴리스틱(Heuristic) 알고리즘을 이용하여 최적화하는 방법이 연구되었다[10]. 그러나 안테나의 합 및 차 신호 패턴을 기반으로 산출되는 모노펄스 비율 곡선의 특성상, 안테나 방사 특성의 개선 없이는 선형 구간 확장에 한계가 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 항공국과 지상국 사이의 데이터 링크 구축을 위한 능동위상배열안테나 기반 추적 안테나 시스템에 있어, 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간을 확장하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 배열된 각 방사소자에 여기되는 급전신호의 가중치에 따른 합신호 패턴을 분석하였으며, 이를 기반으로 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간 분석을 수행하였다.

II. 능동위상배열안테나

그림 1은 모노펄스 선형구간 확장에 관한 연구를 수행하기 위한 능동위상배열안테나의 구성도를 보여준다.

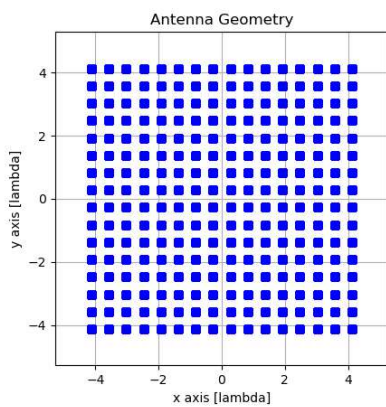


그림 1 제시된 능동위상배열안테나 구성

제시된 능동위상배열안테나는 $x-y$ 평면에 등간격으로 배열된 구조로, 각 축 기준 16개의 방사소자가 배열되어 있다. 더불어 각 축 기준 방사소자간 간격은 0.55λ 로 설정하였다. 이에

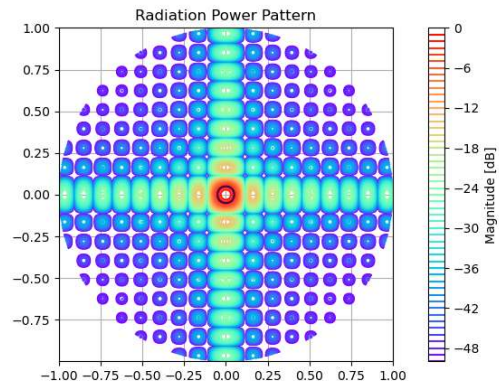
따른 각 방사소자의 중심 위치 기준, x 및 y 좌표는 식 (1)과 같다.

$$p_{nm}^x = (2n - \frac{N-1}{2})d_x, \quad \forall m \tag{1-1}$$

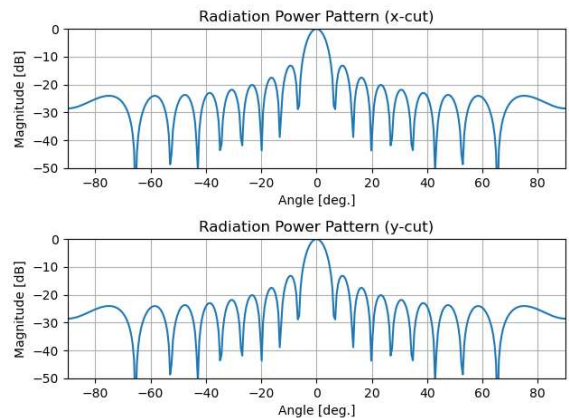
$$p_{nm}^y = (2m - \frac{M-1}{2})d_y, \quad \forall n \tag{1-2}$$

여기서 n 과 m 은 각 축 기준 방사소자 인덱스(Index), N 과 M 은 각 축 기준 방사소자 배열 수, d_x 와 d_y 는 각 축 기준 등간격으로 설정된 방사소자 간 간격이다.

배열 안테나의 방사특성은 방사소자를 점 전하원으로 대치한 Array Factor(AF)를 기반으로 분석된다. 균일 급전된 평면배열안테나의 AF는 식 (2)와 같다.



(a) Contour 방사 패턴



(b) x 및 y cut 기준 방사 패턴

그림 2 제시된 능동위상배열안테나 방사 특성

$$AF = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \exp(jk\vec{r} \cdot \hat{r}_{nm}) \tag{2}$$

여기서 k 는 전파 상수(Wave Number), \bar{r} 은 구 좌표계 기준 r 방향 단위 벡터, 그리고 \hat{r}_{nm} 은 $[n, m]$ 번째 방사소자의 위치 벡터이다.

그림 2는 제시된 능동위상배열안테나를 기준으로 식 (2)에 따른 방사 특성을 보여준다. 제시된 능동위상배열안테나에 있어, 균일 급진된 경우의 방사특성 분석 결과, 방위각(x cut) 및 양각(y cut) 반치각(HPBW; Half Power Beam Width)는 각각 약 5.8 deg.로 확인되었으며, 지향성(Directivity)는 약 27.5 dBi로 확인되었다.

III. 모노펄스 비율 곡선 분석

모노펄스 추적 알고리즘은 대국에서 방사하는 전파를 다중 안테나를 이용하여 수신한 후, 신호 합성을 통해 합신호와 차신호를 획득하고 이들의 비를 기반으로 대국의 위치를 추정하는 알고리즘이다. 여기서 합신호와 차신호 패턴에 관한 비를 모노펄스 비율 곡선이라 하고, 이는 수신 신호를 기반으로 대국의 위치를 추정하기 위한 지표로 사용된다.

식 (3)은 모노펄스 추적 알고리즘 기반 추정 각도 산출 수식을 보여준다. 여기서 식 (3-1)은 추정각도 값을 산출하는 식이고, 식 (3-2)는 안테나 중심축을 기준으로 대국의 방향(좌/우)을 구분하기 위한 식이다.

$$\text{angle} = c_r \left| \frac{\Delta}{\Sigma} \right| \quad (3-1)$$

$$\text{direction} = \arctan\left(-\text{Im}\left(\frac{\Delta}{\Sigma}\right)\right) \quad (3-2)$$

여기서, Σ 은 합신호, Δ 은 차신호, $\text{Im}()$ 은 허수부 산출 함수, c_r 는 모노펄스 비율 곡선 제어 계수이다.

모노펄스 비율 곡선은 일반적으로 기울기가 '1'로 설정한다. 이는 산출값을 추정각도로 1:1 대응시키기 위함이다. 이를 위해 c_r 계수가 사용된다.

일반적으로 모노펄스 추적을 위해서는 다수의 안테나를 배치하고 모노펄스 비교기(Monopulse Comparator)를 이용하여 합신호와 차신호를 합성한다. 능동위상배열안테나의 경우, 모노펄스 비교기 없이 각 방사소자에 여기되는 급진신호에 크기 및 위상을 가중하여 합신호와 차신호를 생성할 수 있다. 이를 위한 능동위상배열안테나의 AF는 식 (4)와 같이 유도된다.

여기서, I_{nm} 과 α_{nm} 은 $[n, m]$ 번째 인덱스에 해당하는 방사소자의 신호크기 및 위상천이 가중치이다.

$$AF = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{nm} \exp(jk\bar{r} \cdot \hat{r}_{nm} + j\alpha_{nm}) \quad (4)$$

일반적인 능동위상배열안테나의 합신호 패턴은 식 (4)의 AF에 식 (5)의 조건이 반영되었을 때의 패턴이다.

$$I_{nm} = 1 \angle 0^\circ, \quad \forall [n, m] \quad (5-1)$$

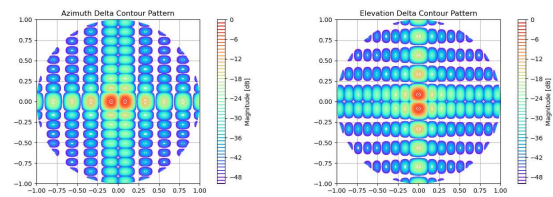
$$\alpha_{nm} = 0, \quad \forall [n, m] \quad (5-2)$$

이는 식 (2)와 동일함을 알 수 있고, 결과적으로 능동위상배열안테나의 일반적인 합신호 패턴은 그림 2와 동일함을 알 수 있다.

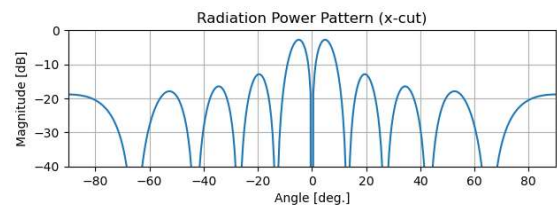
차신호 패턴은 방위각(x 축)과 양각(y 축)을 기준으로 구분하여 형성한다. 이는 대국의 위치를 방위각과 양각 기준으로 구분하여 추정하기 위함이다. 방위각 및 양각 기준 차신호 패턴은 식 (6)의 조건이 식 (4)에 반영되었을 때 형성된다. 여기서 급진신호 가중치(I_{nm}) 값은 식 (5-1)과 동일하다.

$$\alpha_{nm}^x = \begin{cases} 0, & (1 \leq n \leq 8, \forall m) \\ \pi, & (9 \leq n \leq 16, \forall m) \end{cases} \quad (6-1)$$

$$\alpha_{nm}^y = \begin{cases} 0, & (1 \leq m \leq 8, \forall n) \\ \pi, & (9 \leq m \leq 16, \forall n) \end{cases} \quad (6-2)$$



(a) 방사 패턴 (contour)



(b) 방사 패턴 (x-cut)

그림 3 능동위상배열안테나의 차신호 패턴

여기서 α_{nm}^x 및 α_{nm}^y 는 방위각 및 양각 차신호 패턴 생성을 위한 식 (4)의 위상 가중치이다.

그림 3은 식 (6)의 조건에 따른 방위각 및 양각 차신호 패턴

을 보여준다.

모노펄스 비율 곡선은 식 (3-1)과 같이 합신호 패턴과 차신호 패턴의 크기 비이다. 그림 4는 그림 2의 합신호 패턴과 그림 3의 차신호 패턴을 기반으로 산출된 방위각 및 양각 모노펄스 비율 곡선을 보여준다.

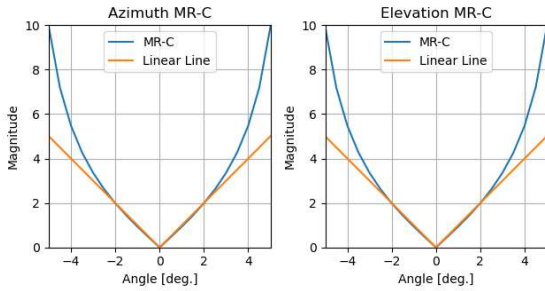


그림 4 방위각 및 양각 기준 모노펄스 비율 곡선

여기서, 모노펄스 비율 곡선의 기울기로 '1'로 설정하기 위해 c_r 은 3.8로 설정되었다. 이는 식 (7)과 같이 MMSE(Minimum Mean Squared Error)를 기반으로 산출된 결과이다.

$$c_r^{opt} = \min_{c_r} \mathbf{E} \left| \theta - c_r \frac{\Delta}{\Sigma} \right|^2, \theta \in \mathbb{R}^+ \quad (7)$$

일반적인 모노펄스 비율 곡선의 분석 결과, 방위각 및 양각 기준 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간은 약 4.6 deg.임을 확인하였다. 이는 합신호 패턴의 반치각 대비 약 0.8배임을 알 수 있다.

IV. 모노펄스 비율 곡선 개선

3장에서 분석한 일반적인 모노펄스 비율 곡선의 경우, 차신호 패턴 변화 대비 합신호 패턴 변화가 급격하게 변하기 때문에 선형 구간이 좁다. 따라서 본 논문에서는 능동위상배열안테나의 빔 형성(Beamforming) 기법을 기반으로 합신호 패턴을 변형하여 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간을 확장하는 방법을 제시하였다. 능동위상배열안테나는 각 방사소자에 여기되는 급전신호의 가중치를 기반으로 빔을 형성할 수 있다. 여기서 가중치는 식 (4)의 I_{nm} 이다. 본 논문에서 합신호 패턴은 차신호와 동일하게 방위각 및 양각으로 구분하여 변형하였다. 이를 위해 식 (4)의 가중치를 식 (8)과 같이 각 축 기준 가중치의 곱으로 표현하였다.

$$I_{nm} = I_n^x I_m^y \quad (8)$$

합신호 패턴의 변형 방법으로, 합신호 패턴을 저대역 통과 필터와 유사한 패턴으로 변화시키는 방법을 사용하였다. 이는 차신호 대비 합신호 패턴의 변화가 급격하게 변화되는 것을 억제하여 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간을 확장하기 위함이다.

상기와 같은 합신호 패턴 변화를 위한 급전신호 가중치 산출 방법으로 주파수 영역에서 저대역 통과 필터를 형성하기 위한 이산 신호 푸리에 역변환 기법을 적용하였다. 이는 등간격 배열 안테나에 있어 AF가 이산 신호에 대한 푸리에 변화 형태와 동일하기 때문이다. 상기 원리와 식 (4)를 기반으로 방위각 및 양각 기준 합신호 가중치에 관한 AF 기반 푸리에 역변환 식은 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$I_n^x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\psi_c}^{\psi_c} AF(\psi_x) d\psi_x \quad (9-1)$$

$$\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\phi \quad (9-2)$$

$$I_m^y = \frac{1}{2\pi} \int_{-\psi_c}^{\psi_c} AF(\psi_y) d\psi_y \quad (10-1)$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta \sin\phi \quad (10-2)$$

본 논문에서 제시된 능동위상배열안테나 설정과 식 (9) 및 식 (10)을 기반으로 주파수 영역 기준 저대역 통과 필터와 유사한 합신호 패턴을 구현하기 위한, 각 축 기준 급전신호 가중치는 식 (11)과 식 (12)와 같이 유도된다. 여기서 통과 대역 범위는 $-\psi_c \leq \psi \leq \psi_c$ 으로 설정되었다.

$$I_n^x = \text{sinc}\left(\frac{\psi_c}{\pi} \frac{P_{nm}^x}{d_x}\right) \quad (11)$$

$$I_m^y = \text{sinc}\left(\frac{\psi_c}{\pi} \frac{P_{nm}^y}{d_y}\right) \quad (12)$$

그림 5는 제시된 능동위상배열안테나를 기반으로 ψ_c 가 0부터 $6\pi/16$ 까지 $2\pi/16$ 간격으로 변화할 때, 방위각 기준 정규화된 AF를 보여준다. 분석 결과, 급전신호 가중치에 따른 합신호 패턴이 저대역 통과 필터와 유사한 형상으로 변형되었음을 확인할 수 있다. 양각 기준 합신호 패턴 또한 ψ_c 에 따라 방위각 기준 합신호와 동일하게 변형된다. 본 논문에서는 합신호 패턴 또한 차신호 패턴과 동일하게 방위각 및 양각 기준으로 변형한다고 하였다. 이에 따른 식 (8)의 급전신호 가중치를 산출함에 있어, 방위각 기준 합신호 패턴이 변형될 때에는 식 (11)과 함께 $I_n^x = 1$ 의 조건이 반영되고, 양각 기준으로 변형될 때에는 식 (12)와 함께 $I_m^y = 1$ 의 조건이 반영된다.

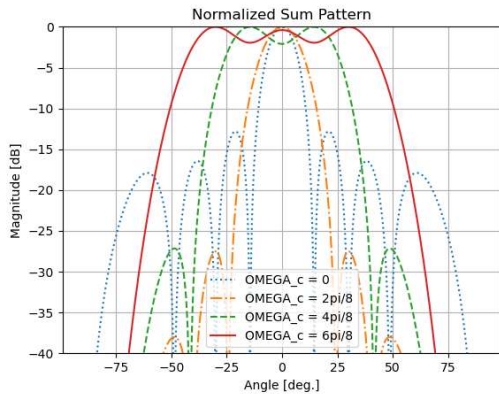
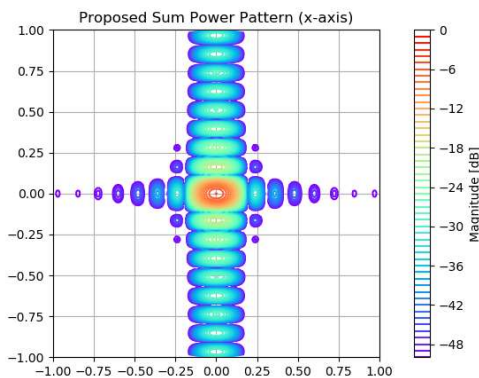
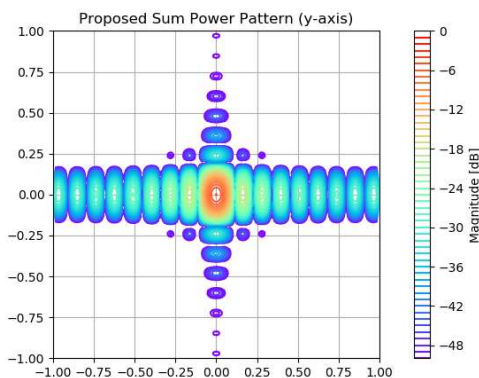
그림 5 ψ_c 에 따른 정규화된 AF

그림 6은 상기 기술된 빔 형성을 기반으로, ψ_c 가 $2\pi/16$ 인 경우의 방위각 및 양각 합신호 패턴을 보여준다.



(a) 방위각 기준 합신호 패턴



(b) 양각 기준 합신호 패턴

그림 6 $\psi_c = 2\pi/16$ 인 경우의 합신호 패턴

상기와 같은 합신호 패턴 변형 방법을 기반으로 식 (13)과 같이 MMSE를 적용하여 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간이 최대가 되는 ψ_c 와 c_r 를 탐색하였다.

$$\{\psi_c^{opt}, c_r^{opt}\} = \min_{\psi_c, c_r} \mathbf{E} \left| \theta - c_r \frac{\Delta}{\sum(\psi_c)} \right|^2, \theta \in \mathbb{R}^+ \quad (13)$$

분석 결과, ψ_c^{opt} 와 c_r^{opt} 는 각각 $2.1\pi/16$ 과 2.4로 산출되었다.

그림 7은 ψ_c^{opt} 가 적용된 방위각 합신호 패턴과 그림 3의 차신호 패턴을 비교하여 보여준다. (양각 기준 패턴은 상기 설정에 의해 방위각 기준 패턴과 동일함.) 그림 7에서 아래 그림은 위 그림 중 주요 영역을 확대한 그림이다.

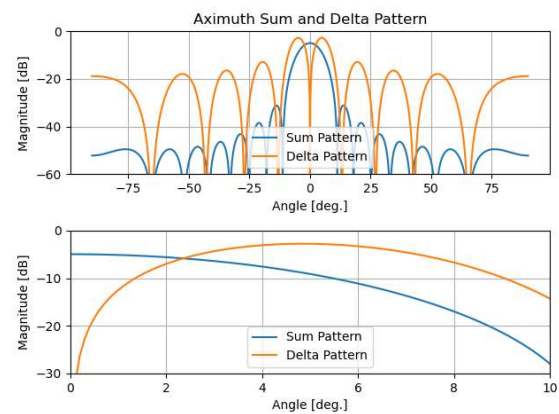
그림 7 $\psi_c = 2.1\pi/16$ 인 경우의 합신호 패턴

그림 7의 분석 결과, 주요 영역에서 합신호 패턴과 차신호 패턴의 변화 비율이 유사함을 확인할 수 있다. 그림 7에서 있어, 합신호 패턴의 지향성이 그림 2의 일반적인 합신호 패턴 대비 약 5 dBi 감쇄되었음을 알 수 있다. 이는 식 (11) 및 (12)에 의한 급전신호 가중치 값이 감소하기 때문이다. 그러나 이와 같은 문제는 전력 분배를 통해 해소할 수 있을 뿐만 아니라, 일반적으로 추적은 비콘(Beacon)신호를 기반으로 수행되기 때문에 지향성 감쇄가 추적 성능에 큰 영향을 주지 않는다.

그림 8은 상기 합 및 차신호 패턴을 기준으로 산출된 모노펄스 비율 곡선을 보여준다. 여기서 c_r 은 식 (13)의 결과에 의해 2.4로 적용되었다. 제안된 방법이 적용된 모노펄스 비율 곡선의 분석 결과, 방위각 및 양각 기준 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간은 약 9.2 deg. 임을 확인하였다. 이는 일반적인 경우의 모노펄스 비율 곡선대비 약 2배 정도 증가한 수치로, 제안된 합신호 패턴 적용에 따라 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간이 확장되었음을 알 수 있다.

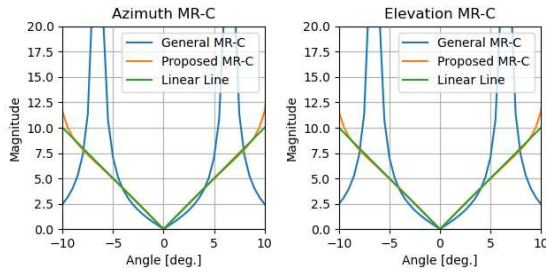


그림 8 방위각 및 양각 기준 모노펄스 비율 곡선

V. 결 론

무인기와의 원활한 데이터 링크 구축을 위해서는 추적 안테나 시스템의 빠른 빔 조향 성능과 함께 안정적인 추적 성능이 확보되어야 한다. 본 논문에서는 빠르고 정밀한 빔 조향을 위해 능동위상배열안테나가 적용된 추적 안테나 시스템에 있어, 추적 성능을 향상하기 위한 모노펄스 비율 곡선의 선형 구간 확장에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 능동위상배열안테나의 빔 형성 기법을 기반으로 합 신호 패턴을 변형하였으며, 그 결과 일반적인 모노펄스 비율 곡선 대비 선형 구간이 약 2 배 정도 확장 가능함을 확인하였다. 이와 같은 연구 결과는 모노펄스 추적 알고리즘을 기반으로 한 방향 탐지 혹은 DOA(Direction of Arrival)를 위한 분야에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] 김사웅, “무인항공기 기반 빅데이터 처리 시스템의 프로토타입 설계,” *스마트미디어저널*, 제5권, 제2호, 51-58쪽, 2016년 6월
- [2] 최현택, 김석관, 류갑상, “소형 무인기 통제를 위한 다자간 방식 관제시스템 구축방안-설계 중심으로,” *스마트미디어저널*, 제6권, 제4호, 65-71쪽, 2017년 12월
- [3] 강기준, 장세명, 나인호, 김선우, 김홍태, “농약 살포 드론의 노즐 유동 특성 및 시뮬레이션,” *스마트미디어저널*, 제8권, 제4호, 38-45쪽, 2019년 09월
- [4] 강위필, 송주형, 이경훈, 이대홍, 정성진, 최형진, “차세대 한국형 공용데이터링크 개발을 위한 국내외 고용데이터링크 기술 동향 분석,” *한국통신학회 논문지*, 제39권, 제3호, 209-222쪽, 2014년 3월
- [5] R. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Boston: Artech House, 1994.
- [6] 최윤섭, 진미현, 최현호, 이상정, 박찬식, “연산량 감소를 위한 2D MUSIC 알고리즘 설계,” *한국통신학회논문지*, 제37권, 제11호, 1077-1083쪽, 2012년 11월

- [7] 권혁자, 이영진, 정진우, “단일채널 모노펄스수신기에 관한 연구,” *전자공학회논문지*, 제51권, 제1호, 71-76쪽, 2014년 1월
- [8] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Boca Raton, FL: Chapman Hall/CRC, 2000.
- [9] 정진우, 임영석, “위상배열 추적 안테나 시스템의 추적 방법에 관한 연구,” *전자공학회논문지*, 제55권, 제7호, 9-18쪽, 2018년 7월
- [10] 정진우, 김재신, 류영재, “다변수 모노펄스 추적 시스템에서 유전 알고리즘 기반 선형구간 확장,” *한국군사과학기술학회지*, 제20권, 제2호, 272-278쪽, 2017년 4월

저 자 소 개



정진우(정회원)

2005년 전남대학교 정보통신공학과 학사 졸업
 2007년 전남대학교 전자정보통신공학과 석사 졸업
 2011년 전남대학교 전자컴퓨터공학과 박사 졸업
 2012년~2017년 국방과학연구소 선임 연구원

2018년~현재 동신대학교 에너지IoT전공 조교수
 <주관심분야 : 능동위상배열안테나, 빔 형성, 추적 알고리즘>



박성일(정회원)

2002년 동신대학교 정보통신공학과 학사 졸업
 2004년 동신대학교 정보통신공학과 석사 졸업
 2010년 전남대학교 전자정보통신공학과 박사 졸업
 2014년~현재 동신대학교 정보통신공학과 부교수

<주관심분야 : 전자회로, RF부품, 이동통신안테나>



이태원(정회원)

1993년 전남대학교 전자공학과 학사 졸업
 1998년 전남대학교 전자공학과 석사 졸업
 2003년 전남대학교 전자공학과 박사 졸업

2003년~2018년 LG 전자
 2018년~현재 동신대학교 컴퓨터공학과 조교수
 <주관심분야 : IoT, 센서, 반도체>