

ML 기반 모노 펄스 MR 커브의 수학적 유도

Derivation of the ML Based Monopulse Ratio Curve

임종환 · 김흥수 · 양훈기 · 정용식 · 배경빈*

Jong-Hwan Lim · Heung-Su Kim · Hoon-Gee Yang · Young-Seek Chung · Kyung-Bin Bae*

요 약

본 논문은 maximum likelihood(ML) 기반의 모노 펄스 monopulse ratio(MR) 커브에 대한 수학적 유도 과정을 보인다. 이를 위해 선형 배열 안테나를 가정하고 얻어진 수학적식이 배열 소자의 수, 배열 간격의 함수가 됨을 보인다. 시뮬레이션을 통해서 얻어진 수학적식이 MR 커브와 동일함을 보이고, 얻어진 복잡한 수학적식을 하나의 tangent 함수로 근사화할 수 있음을 보인다.

Abstract

This paper presents the mathematical derivation of a maximum likelihood(ML)-based monopulse ratio(MR) curve. The derived form is, with the linear array assumed, shown to be the function of the number of array elements and the elements' spacing. Through some simulations, the acquired form is equivalent to the expected MR curve. Furthermore, we show the form, which consists of several terms, can be simplified by one tangent function.

Key words : Linear Array, Maximum Likelihood, Monopulse Ratio Curve, Derivation

I. 서 론

신호의 입사각을 추정하는 문제는 오래 전부터 레이더나 통신 시스템에서 중요한 문제로 인식되어 군사적, 상업적으로 많이 연구되고 있다. 신호의 입사각 추정 기법으로는 빔 절환 방식(sequential), 원추형 주사 방식(conical scan), 모노 펄스(monopulse) 방식 등이 있다. 모노 펄스 방식은 빔 절환 방식과 원추형 주사 방식과 같이 안테나의 기계적인 동작이나 구조적인 형태로 빔 패턴을 형성하여 각도 오차를 추정하는 방식이 아니기 때문에, 좀 더 높은 안정성과 측정의 정확성을 달성할 수 있어서 최근에 가장 각광을 받고 있는 각도 추정 방식이다^[1].

신호의 입사각 추정은 실제 표적의 위치와 안테

나의 조향각 사이의 오차를 찾는 것으로, 일반적으로 ML 기법을 사용한다. ML(Maximum Likelihood) 기반의 모노 펄스의 경우, 목표물로부터 송신된 신호의 확률밀도 함수를 최대화 하는 방향 추정 값을 목표물의 방향으로 추정하는 방식으로 기존의 입사각 추정 방식에 비해 높은 정확도를 산출한다^{[2],[3]}.

모노 펄스 기술의 성능은 합 빔(sum beam) 및 차 빔(difference beam) 패턴으로 계산되는 MR(Monopulse Ratio) 커브에 의해 결정되는데, 일반적으로 차 빔의 가중치 벡터는 합 빔의 가중치 벡터에서 절반은 음수값으로 계산한다^{[5],[6]}. 그에 비해 Nickel이 제안한 모노 펄스 방식은 합 빔에 곱해지는 가중치 벡터의 미분 값을 이용하여 차 빔 패턴을 형성하기 때문에 전자의 경우보다 훨씬 정확하게 방향 추정을

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐자 감소 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다. 광운대학교 전자융합공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwanwoon University)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20110629-060

· 교신저자 : 양훈기(e-mail : hgyang@daisy.kw.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 25일

할 수 있다^[3]. 그러나 Nickel의 모노 펄스 방정식을 이용하여 추정된 수신 신호 방향은 기본적으로 오차를 가지고 있다. 안테나의 조향 방향과 실제 수신 신호와의 차이가 증가하면 추정값에 오차가 발생하여 모노 펄스의 성능이 급격히 감소한다^[4]. 이 때, 추정값과 실제 수신 신호 방향의 차이를 알기 위해서는 MR 커브에 대한 완성된 수식이 필요하지만, 아직까지는 ML 기반의 모노 펄스 방정식의 완성된 수식은 알려진 바가 없다.

본 논문에서는 모노 펄스 추적용 배열 안테나에서 기존의 Nickel이 제시한 모노 펄스 방정식^[4]을 수학적으로 분석하여 합 빔과 차 빔의 비가 배열 소자의 수와 관련된 다수의 tangent 함수들의 합으로 나타남을 보이고 모의 실험을 통해 증명하였으며, 이를 근사화 시킬 수 있는 수식을 제안한다. 본 논문의 개요는 II장에서는 기존의 Nickel이 제안한 모노 펄스 알고리즘에 대해서 살펴보고, III장에서는 MR 커브에 대한 수학적 유도 과정을 보이고 IV장에서는 모의 실험을 통하여 이를 증명하고, V장에서는 결론을 맺는다.

II. ML 기반의 모노 펄스 기법

u_1 방향에 위치한 표적에 반사된 레이더 펄스가 선형 배열 안테나에 수신될 때 수신 신호 벡터 \mathbf{z} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{a}b + \mathbf{n} \quad (1)$$

식 (1)에서 b 는 신호의 진폭이며, \mathbf{n} 은 백색 잡음 벡터를 나타내며, \mathbf{a} 는 아래 식으로 표현되는 u_1 방향에서 입사하는 입력 신호 벡터이다.

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \exp\left[\frac{j2\pi}{\lambda}x_1u_1\right] \\ \vdots \\ \exp\left[\frac{j2\pi}{\lambda}x_Nu_1\right] \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 x_i ($i=1, 2, \dots, N$)는 배열 소자들의 위치이고, N 은 배열 소자들의 수, u_1 는 방위각이 θ_1 일 때 $u_1 \triangleq \sin\theta_1$ 으로 정의되며 방향 변수를 나타낸다. \mathbf{n} 이 AWGN인 경우 \mathbf{z} 에 대한 확률 밀도 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\mathbf{z}/u_1, b) = \frac{1}{(2\pi)^N} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{z}-\mathbf{a}b)^H(\mathbf{z}-\mathbf{a}b)\right] \quad (3)$$

방향 탐지의 목적은 측정된 데이터 \mathbf{z} 로부터 u_1 을 추정하는 것으로 ML 기법을 적용시키는 방법은 likelihood 함수 $p(\mathbf{z}/u_1, b)$ 를 최대로 만드는 $9u_1 = \hat{u}_1$ 을 찾는 것이다. 참고문헌 [4]에서 제시한 과정을 통해서 $\max\{p(\mathbf{z}/u_1 = \hat{u}_1)\}$ 인 \hat{u}_1 은 다음 식에서 정의된 $P(u)$ 를 최대로 만든다.

$$P(u) = |\mathbf{a}^H(u)\mathbf{z}(u_1)|^2 \quad (4)$$

$S(u) = \mathbf{a}_u^H(u)\mathbf{z}(u_1)$ 은 가중치가 $\mathbf{a}^H(u)$ 인 디지털 빔 포머의 출력이고, $P(u)$ 는 디지털 빔 포머의 출력 전력이므로 $P(u)$ 를 최대로 만드는 $u = \hat{u}_1$ 이 표적의 방향이 된다. $\ln(\cdot)$ 함수는 asymptotically 증가 함수이므로 $P(u)$ 를 최대로 만드는 u 값은 $F(u) = \ln P(u)$ 로 정의된 $F(u)$ 도 최대로 만들며, $u = u_1$ 에서 $P(u)$ 가 최대가 되므로 $F(u)$ 의 미분 함수 $F_u(u)$ 는 $F_u(u_1) = 0$ 을 만족한다.

$t = nT$ 순간에 레이더가 $u = u_0$ 방향을 향하고 있고, 표적은 $u = u_1$ 에 위치해 있는 경우 수신 신호 벡터 $\mathbf{z}(u_1)$ 으로부터 u_1 을 추정하는 경우를 생각하자. $F_u(u)$ 의 $u = u_0$ 에서의 값은 $u = u_1$ 에서의 함수 값을 이용해서 Taylor series로 전개한 후 근사화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_u(u_0) \cong F_u(u_1) + F_{uu}(u_1)(u_0 - u_1) \quad (5)$$

이 때 $F_u(u_1) = 0$ 이므로 식 (5)를 정리하면 다음과 같다.

$$u_1 \cong u_0 - \frac{F_u(u_0)}{F_{uu}(u_1)} \triangleq \hat{u}_1 \quad (6)$$

여기서 $F_u(u_0)$ 와 $F_{uu}(u_1)$ 은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[4]

$$F_u(u_0) = 2Re\left\{\frac{\mathbf{a}_u^H(u_0)\mathbf{z}(u_1)}{\mathbf{a}^H(u_0)\mathbf{z}(u_1)}\right\} \quad (7)$$

$$F_{uu}(u_1) = -\frac{2}{N}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (8)$$

식 (7)에서 $\mathbf{a}_u(u_0)$ 는 $\mathbf{a}(u_0)$ 의 u 에 관한 1차 미분

을 나타내며, 식 (7)의 분모식은 합 빔 패턴을, 분자식은 차 빔 패턴을 나타내며, 식 (8)의 $F_{uu}(u_1)$ 는 u 에 무관한 상수 값을 갖는다.

식 (7)의 합 빔, 차 빔 값 및 안테나 구조가 정해지면 고정되는 상수값 $F_{uu}(u_1)$ 을 식 (6)에 적용해서 u_1 의 추정값 \hat{u}_1 을 계산할 수 있다. x 축에 $u_1 - u_0$ 값, y 축에 $\hat{u}_1 - u_0$ 값을 매핑시켜 그려진 커브가 MR 커브다(IV절 그림 1 참조). 일반성을 해치지 않는 범위에서 u_0 를 보통 0으로 가정한다.

III. $F_u(u_0)$ 의 전개

배열 안테나의 중심을 $x=0$ 으로 가정하고, 배열 소자의 간격이 d , 배열 소자의 개수가 짝수 N 개일 때 배열 소자의 좌표 x 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & 9(x_1, \dots, x_N) \\
 & = \left(i - \frac{N-1}{2}\right)d, \quad i=0, 1, \dots, N-1 \quad (9)
 \end{aligned}$$

이 때 배열 소자의 좌표는 $x_i = -x_{N-(i-1)}$ 의 관계가 있다. 식 (7)에서 $\mathbf{a}^H(u_0)\mathbf{z}(u_1)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{a}^H(u_0)\mathbf{z}(u_1) = b \sum_{i=1}^N \exp\left[\frac{j2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right] \quad (10)$$

같은 방식으로 $\mathbf{a}_u^H(u_0)\mathbf{z}(u_1)$ 를 연산하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{a}_u^H(u_0)\mathbf{z}(u_1) \\
 & = -\frac{j2\pi b}{\lambda} \sum_{i=1}^N x_i \exp\left[\frac{j2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

이 때 b 는 분모와 분자에 모두 포함되어 있기 때문에 약분된다. 따라서 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & F_u(u_0) \\
 & = 2Re \left\{ \frac{-j \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^N x_i \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right]}{\sum_{i=1}^N \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right]} \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

식 (11)의 분모와 분자에 있는 지수 함수들을 오일러 공식 ($e^{ix} = \cos x + i \sin x$)을 이용하여 $F_u(u_0)$ 를

cosine과 sine의 식으로 변환하고, MRC 커브에 필요한 실수 성분만을 남기면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_u(u_0) = 2 \left\{ \frac{\frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^N x_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right)}{\sum_{i=1}^N \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right)} \right\} \quad (13)$$

배열 안테나의 구조가 원점을 중심으로 대칭이기 때문에 전체 합 빔과 차 빔 패턴은 원점을 중심으로 한 쪽에 위치한 소자들의 합 빔과 차 빔 패턴으로 표현할 수 있으며, 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$F_u(u_0) = 2 \left\{ \frac{2 \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} x_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right)}{2 \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x_i (u_1 - u_0)\right)} \right\} \quad (14)$$

여기서 y_i 는 $y_i \triangleq -x_i$ 라 정의하고, 식 (14)의 x_i 를 $-y_i$ 로 치환하면 다음과 같다.

$$F_u(u_0) = 2 \left\{ \frac{2 \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} y_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} y_i (u_1 - u_0)\right)}{2 \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} y_i (u_1 - u_0)\right)} \right\} \quad (15)$$

식 (9)의 x_i 역시 $-y_i$ 로 치환하면 y_i 는 d 와 $y_i = (2i-1)\frac{d}{2}$ 의 관계임을 알 수 있고, 이를 식 (15)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & F_u(u_0) \\
 & = 2 \left\{ \frac{\frac{\pi d}{\lambda} \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} (2i-1) \sin\left((2i-1) \frac{\pi d}{\lambda} (u_1 - u_0)\right)}{\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} \cos\left((2i-1) \frac{\pi d}{\lambda} (u_1 - u_0)\right)} \right\} \quad (16)
 \end{aligned}$$

$\frac{\pi d}{\lambda} = \alpha$, $\frac{\pi d}{\lambda} (u - u_0) = \beta$ 로 치환하고 $N=2^M$ 으로 정의된 M 에 의해 식 (16)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & F_u(u_0) \\
 & = \frac{2\alpha \{\sin(\beta) + \dots + (2^M - 1)\sin((2^M - 1)\beta)\}}{\{\cos(\beta) + \dots + \cos((2^M - 1)\beta)\}} \quad (17)
 \end{aligned}$$

여기서 식 (17)의 분모 수식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \cos(\beta) + \dots + \cos((2^M - 1)\beta) \\ &= 2\cos(2^{M-1}\beta) \\ & \quad \times \{\cos((2^{M-1} - 1)\beta) + \dots + \cos(\beta)\} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (17)의 분자식의 경우 첫 항 $\sin\beta$ 과 마지막 항 $(2^M - 1)\sin((2^M - 1)\beta)$ 은 각각 다음과 같이 변형시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin\beta &= \sin(((2^{M-1}) - (2^{M-1} - 1))\beta) \\ &= \sin((2^{M-1})\beta)\cos((2^{M-1} - 1)\beta) \\ & \quad - \cos((2^{M-1})\beta)\sin((2^{M-1} - 1)\beta) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & (2^M - 1)\sin((2^M - 1)\beta) \\ &= (2^M - 1)\sin(((2^{M-1}) + (2^{M-1} - 1))\beta) \\ &= (2^M - 1)\sin(2^{M-1}\beta)\cos((2^{M-1} - 1)\beta) \\ & \quad + (2^M - 1)\cos(2^{M-1}\beta)\sin((2^{M-1} - 1)\beta) \end{aligned} \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)을 이용해서 두 항을 합하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sin\beta + (2^M - 1)\sin((2^M - 1)\beta) \\ &= 2(2^{M-1})\sin(2^{M-1}\beta)\cos((2^{M-1} - 1)\beta) \\ & \quad + 2(2^{M-1} - 1)\cos(2^{M-1}\beta)\sin((2^{M-1} - 1)\beta) \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)의 과정을 반복하면 식 (17)의 분자식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sin(\beta) + \dots + (2^M - 1)\sin((2^M - 1)\beta) \\ &= 2(2^{M-1})\sin(2^{M-1}\beta)\cos((2^{M-1} - 1)\beta) \\ & \quad + 2(2^{M-1} - 1)\cos(2^{M-1}\beta)\sin((2^{M-1} - 1)\beta) \\ & \quad + \dots + 2(2^{M-1})\sin(2^{M-1}\beta)\cos(\beta) \\ & \quad + 2\cos(2^{M-1}\beta)\sin(\beta) \\ &= 2(2^{M-1})\sin(2^{M-1}\beta) \\ & \quad \times \{\cos((2^{M-1} - 1)\beta) + \dots + \cos(\beta)\} \\ & \quad + 2\cos(2^{M-1}\beta) \\ & \quad \times \{2(2^{M-1} - 1)\sin((2^{M-1} - 1)\beta) + \dots + \sin(\beta)\} \end{aligned} \quad (22)$$

식 (18)과 식 (22)에 의해서 식 (17)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} F_u(u_0) &= 2\alpha 2^{M-1} \tan(2^{M-1}\beta) \\ & \quad + 2\alpha \{2^{M-2} \tan(2^{M-2}\beta) + \dots + 2^0 \tan(2^0\beta)\} \end{aligned} \quad (23)$$

$$+ 2\alpha \left\{ \frac{(2^{M-1} - 1)\sin((2^{M-1} - 1)\beta) + \dots + \sin(\beta)}{\cos((2^{M-1} - 1)\beta) + \dots + \cos(\beta)} \right\} \quad (23)$$

식 (23)에서 중괄호 안의 분수식은 식 (17)의 분수식과 같은 꼴을 취하고 있다. 따라서 위의 과정을 반복하면 식 (23)은 다음과 같이 간소화 된다.

$$\begin{aligned} F_u(u_0) &= 2\alpha 2^{M-1} \tan(2^{M-1}\beta) \\ & \quad + 2\alpha \{2^{M-2} \tan(2^{M-2}\beta) + \dots + 2^0 \tan(2^0\beta)\} \\ &= 2\alpha \sum_{k=1}^M 2^{k-1} \tan(2^{k-1}\beta) \end{aligned} \quad (24)$$

α 와 β 를 재 치환하면 식 (24)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_u(u_0) = \frac{2\pi d}{\lambda} \sum_{k=1}^M 2^{k-1} \tan\left(2^{k-1} \frac{\pi d}{\lambda} (u_1 - u_0)\right) \quad (25)$$

$F_u(u_0)$ 은 M 개의 tangent 항으로 이루어져 있으며, 각각의 tangent 항들은 주기가 2배씩 감소하며, 기울기가 2배씩 증가하는 특징을 보인다.

IV. 시뮬레이션

16개의 배열 소자를 갖는 선형 배열 안테나에 대해 Nickel이 제시한 식 (7)과 식 (8)을 이용해서 그림 1과 같은 MR 커브를 얻었다($u_0 = 0$ 으로 가정했음). 본 논문에서 유도된 식 (25)의 타당성을 검증하기 위해서 식 (25)를 식 (6)에 대입한 후 단순 계산에 의해 MR 커브를 얻었다. 두 커브가 정확하게 일치하였다.

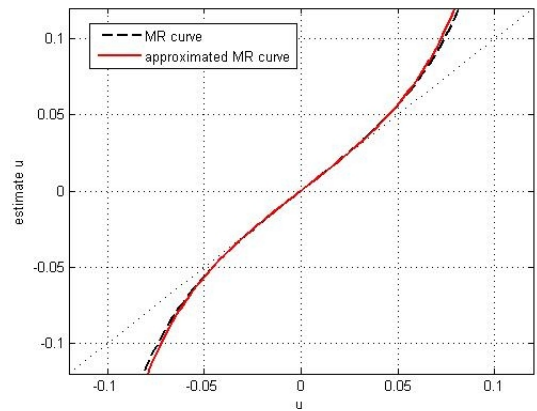


그림 1. MR 커브와 근사식을 이용한 MR 커브
Fig. 1. MR curve and approximated MR curve.

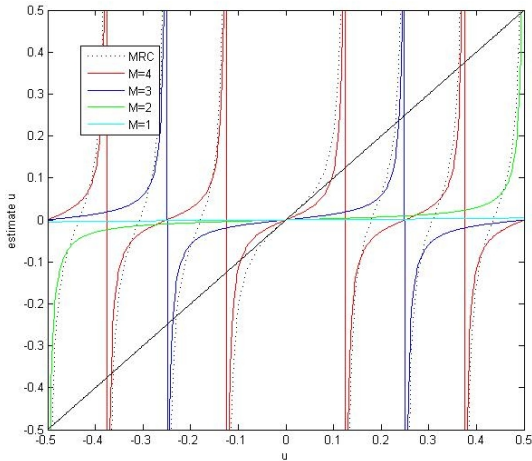


그림 2. 각 성분별 MR 커브
Fig. 2. MR curve for each component.

16개의 배열 소자가 있으므로 $F_u(u_0)$ 는 4개의 tangent 함수의 linear combination 형태를 갖는다. 그림 2는 $F_u(u_0)$ 가 식 (25)에서 $k=1, 2, 3$ 그리고 $k=4$ 일 때의 함수 값으로 가정하고, 각각의 경우에 대해서 MR 커브를 그려 보았고, 실제 MR 커브를 추가해서 비교해 보았다. 결과적으로 MR 커브는 각각의 경우에 얻어진 커브들의 합으로 구성된다. 각각의 파형이 주기 및 기울기가 다른 함수를 담았으므로 이들의 합은 좁은 각도의 구간에서는 하나의 tangent 함수를 닮을 수 있다고 가정할 수 있다. 이를 위해서 $F_u(u_0)$ 를 다음과 같이 가정하였다.

$$F_u(u_0) = \frac{2\pi d}{\lambda} \sum_{k=1}^M 2^{k-1} \tan\left(2^{k-1} \frac{\pi d}{\lambda} (u_1 - u_0)\right) \approx \mu 2^{M-1} \tan\left(2^{M-1} \frac{\pi d}{\lambda} (u_1 - u_0)\right) \quad (26)$$

합 빔의 3 dB 구간에서 식 (26)이 오차의 범위 안에 들도록 하는 μ 값을 계산에 의해 조사하였고, 계산 결과 μ 가 1.3이면 1.5 % 오차 이내의 값을 알 수 있다.

식 (26)의 근사식을 식 (6)에 대입해서 MR 커브를 얻은 후 실제 MR 커브와 비교하였다(그림 1 참조). 시뮬레이션 결과, 합 빔의 3 dB 영역에서 식 (26) 근사식의 오차는 1.5 % (약 0.056도) 이하로 나타나, 식 (26)에 의한 근사식의 타당성을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

Nickel이 제안한 모노 펄스 MR 커브는 합 빔에 곱해지는 가중치 벡터의 미분 값을 차 빔의 가중치 벡터로 사용하기 때문에, 기존의 입사각 추정 방법에 비해 높은 정확도를 산출하지만, 방정식에 대한 완성된 수식이 없어 안테나의 조향 방향과 실제 수신 신호와의 차이로 인해 발생하는 오차가 발생할 경우 보상이 불가하였다. 본 논문에서는 등 간격으로 배열된 모노 펄스 추적용 선형 배열 안테나에서 Nickel이 제안한 ML 기반의 MR 커브를 수학적으로 유도하였다. 방정식의 핵심이 되는 합 빔과 차 빔의 비는 배열 소자의 수와 배열 소자 간의 간격과 관련된 다수의 tangent 함수들의 합으로 나타남을 보였고, 이를 하나의 tangent 함수로 근사화하여 나타내었다. 또한 시뮬레이션을 통해 위의 근사화 식을 이용한 곡선은 그림 3과 같이 Nickel의 모노 펄스 방정식의 MR 커브와 거의 일치함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Samuel M. Sherman, *Monopulse Principle and Techniques*, Artech House Edition, 1984.
- [2] U. Nickel, "Radar target parameter estimation with array antennas", in Haykin, Litva, and Shepherd, *Radar Array Processing*, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, chapter 3, pp. 47-98, 1993.
- [3] U. Nickel, "Monopulse estimation with adaptive arrays", *IEE Proc. F, Radar Signal Process*, 140(5), pp. 303-308, 1993.
- [4] Wirth, Wulf-Dieter, *Radar Techniques Using Array Antennas*, Institution of Engineering and Technology, pp. 253-258, 2001.
- [5] K. B. Yu, D. J. Murrow, "Adaptive digital beamforming for angle estimation in Jamming", *IEEE trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 508-523, Apr. 2001.
- [6] He Yu-dong, "Adaptive sum and difference beamforming for monopulse system with array antennas", *IEEE Con. on Wireless Communications Networking and Mobile Computing*, pp. 1-5, 2010.

임 중 환



2011년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2011년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 레이더 신호 처리

정 용 식



1989년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
2003년: Syracuse 대학교 Post Doctor

2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통신공학과 조교수
2006년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 조교수
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, 안테나, EMI/EMC

김 흥 수



2010년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2010년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 레이더 신호 처리

배 경 빈



1975년: 부산대학교 전자공학과(공학사)
1987년: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
1975년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 레이더 연구 개발

양 훈 기



1985년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1987년: SUNY at Buffalo ECE (공학석사)
1992년: SUNY at Buffalo ECE (공학박사)
1993년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] 무선 통신 시스템, UWB, RFID, 스펙트럼 공학, 레이더 신호 처리