

다중경로 환경에서 다중빔 탐색레이더에 적용 가능한 표적 고각오차 혼성 보정 기법

Hybrid Compensation Technique on Low Elevation Angle Errors for Multibeam Surveillance Radar in Multipath Environment

김관성* 정명수* 정창식*
Kwan Sung Kim Myung Soo Chung Chang Sik Jung

ABSTRACT

The multibeam surveillance radar is a state-of-art of 3D radar technology. It applies the stacked beams realized by a digital beamformer. In this paper, a hybrid compensation technique on elevation angle errors for low elevation angle targets over the sea in multipath radar environments is proposed. The proposed method can be applied to stacked beam radars. Double null algorithm based on maximum likelihood method in 3-D beamspace domain works well unless the phase difference between the two rays(direct and specular path) is close to 0° and the magnitude of reflection coefficient is close to 0. To overcome these problems, we propose a hybrid compensation technique which uses the selective double null algorithm and the beam-ratio compensation technique for low-elevation errors on a log scale. Results of computer simulation show that the proposed method outperform conventional monopulse method and double null algorithm only under various multipath environments.

Keywords : Mutibeam Surveillance Radar(다중빔 탐색 레이더), Digital Beamformer(디지털 빔형성기), Multipath(다중경로), Monopulse(모노펄스)

1. 서론

다중빔 탐색레이더를 운용함에 있어서 다중경로 환경은 표적의 고각 오차를 증가시키는 중요한 원인이 된다. 특히 함정용 레이더에서 해수면이 잔잔한 상황은 거울반사(Specular Reflection)가 강해져서 한 개의

수신빔 안에 실패적과 영상표적이 합성되어 탐지 고각 오차가 상대적으로 크다. 난반사(Diffuse Reflection)가 많이 일어나면 코히런트(Coherent)특성이 적어서 실제 고각 오차에는 큰 영향이 없으나, 거울반사 같은 경우에는 실패적과 영상표적이 펄스마다 코히런트(Coherent) 특성을 가지기 때문에 저고도 표적 고각 정확도에 큰 영향을 준다. 이러한 문제들을 극복하고 정확한 표적고각을 추출하기 위해 많은 연구들이 진행되어 왔다^[1,2]. 그 중 최근 대표적인 방법으로 ML(Maximum Likelihood) 추정기법^[3]이 있다. 이 방법은

† 2013년 2월 5일 접수~2013년 5월 17일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김관성(kims@add.re.kr)

이론적으로 간단한 수식으로 이루어져 있어서 구현이 용이한 장점이 있으나, 다차원 공간의 그리드(Grid)상에서 해답을 찾기 위해 많은 연산량이 필요하여 실효적과 영상표적의 위상이 0도에 가까울수록 성능이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 다중경로에 의해 왜곡된 저고도 표적의 고각오차를 보정하기 위해 디지털 빔 형성에 의한 다중빔 중 수평선 부근 5개의 빔을 이용하고, 비선형 최소자승(Nonlinear Least Squares) 기법에 기반한 Double Null 알고리즘을 적용하여 고각오차를 보정하는 방법을 소개한다. 이 알고리즘을 실제 다중빔 탐색 레이더에 적용하기 위해서는 몇 가지 문제점들이 존재한다. 첫째, 다중경로현상이 작은(거울반사 영향이 작을 때) 상황에서는 이 알고리즘을 적용하면 오히려 오차가 더 커질 수 있다. 둘째 다중경로가 있는 상황에서 실효적과 영상표적의 위상차이가 0도에 가까워질 때 오차가 커지는 문제가 있다. 첫 번째 문제를 해결하기 위해 다중경로 영향을 추정하여 선별적으로 알고리즘을 적용할 수 있는 방법을 제안한다. 두 번째 문제 해결을 위해 가장 다중경로 현상이 많이 발생하는 2개 빔의 상호비를 대수적으로 계산하고 LUT(Look-up Table)을 구성하여 고각오차를 직접 보정할 수 있는 방법을 제안한다. 위의 2가지 방법을 혼성된 고각오차 보정기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. Double Null 알고리즘

저고도 표적고각을 정확하게 추정할 수 있는 기법으로 3-D BDML 방법^[3]을 참조하여 다중빔 탐색레이더에 적용할 수 있는 Double Null 알고리즘을 소개한다.

가. Double Null 알고리즘 이론적 배경

다중경로환경에서는 하나의 표적신호가 직접경로(Direct Path)로 수신되어 탐지되는 실효적 신호와 간접경로(Specular Path)로 수신되어 탐지되는 영상표적 신호가 합성되어 디지털 빔형성된 각 빔의 신호크기와 위상에 영향을 미친다. Fig. 1은 이러한 개념을 잘 보여준다. 이 때 수신신호는 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$x(n) = a(u_1)c_1(n) + a(u_2)c_2(n) + n(n) \quad (1)$$

$n = 1 \sim N$ ($N =$ 전체 거리셀 수)

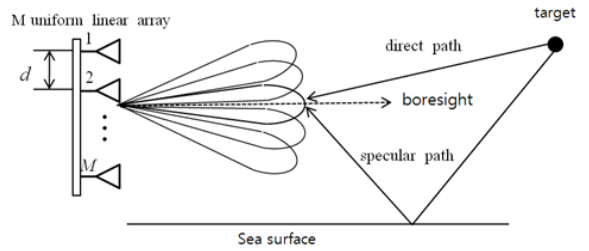


Fig. 1. Operational principle of multibeam radar in a multipath environment

$c_1(n)$ 는 n 번째 거리 샘플에서 $u_1 = \sin\theta_1$ 방향의 직접경로로 수신되는 복소포락(Complex Envelope)값이다. $c_2(n)$ 는 간접경로 방향에서의 복소포락 값이며, $n(n)$ 은 각 수신채널의 복소 백색 잡음이다. $a(u_1)$, $a(u_2)$ 는 각 경로방향의 조향벡터(Steering Vector)이고 M 개의 선형배열식 수신채널인 경우 식 (2)와 같이 표현된다.

$$a(u) = [e^{-ikdu} \ e^{-i2kdu} \ \dots \ e^{-iMkdu}]^T \quad (2)$$

여기서 $k = 2\pi\sin(\theta)/\lambda$ 이고 d 는 배열안테나 간격이다. 수신신호 $x(n)$ 에 빔형성계수를 곱하여 빔형성 출력을 구하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_B(n) &= S^H x(n) \\ &= S^H [a(u_1) \ a(u_2)] s(n) + S^H n(n) \\ &= [d(u_1) \ d(u_2)] s(n) + n_B(n) \\ &= Ds(n) + n_B(n) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $s(n) = [c_1(n) \ c_2(n)]^T$, $D = [d(u_1) \ d(u_2)]$ 이고 $S = [a(u_1) \ a(u_2) \ a(u_3) \ a(u_4) \ a(u_5)]$ 는 빔형성 가중치 행렬로써 $M \times 5$ 행렬이다. n 번째 샘플에서 식 (4)에서와 같이 오차를 최소화하기 위한 u_1 과 u_2 를 구하기 위해서는 비선형 최소 자승식을 풀면 된다.

$$\min_{u_1, u_2, c(n)} \| x_B(n) - Dc(n) \|^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 $c(n)$ 은 최소 자승 오차식의 해로써 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$c_{LS}(n) = [D^T D]^{-1} D^T x_B(n) \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입해서 정리하면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\min_{u_1, u_2} (x_B^H(n) P_B^\perp x_B(n)) = \min_{u_1, u_2} E(u_1, u_2) \quad (6)$$

여기서 $P_B^\perp = I^3 - D[D^T D]^{-1} D^T$ 는 투영연산자이며, Hermitian 행렬특성을 가지고 있다. 그러므로 다중경로 효과에 의해 합성된 실표적과 영상표적의 수신신호는 식 (6)의 에너지함수 $E(u_1, u_2)$ 를 최소화 할 수 있는 u_1, u_2 를 찾는 문제로 볼 수 있다. 여기서 P_B^\perp 을 Nulling Matrix라고 부를 수 있다. 그 이유는 입력신호를 빔 형성한 값이 $x_B(n) = D(u_1, u_2)s(n)$ 일 때 $E(u_1, u_2)$ 값이 0이 되게 하기 때문이다. 즉 실표적과 영상표적 방향으로 $P_B^\perp(u_1, u_2)$ 를 잘 조정하여 2개의 널(Null)을 각 방향으로 맞추게 되면 에너지 함수가 최소로 되어 직접경로의 실표적과 간접경로의 영상표적의 방향을 정확히 알 수 있다. 그리고 이것을 Double Null 알고리즘이라 한다. 다중경로 환경에서 에너지함수 $E(u_1, u_2)$ 은 Fig. 2와 같이 등고선 모양으로 그릴 수 있으며, 다중경로가 주로 발생할 수 있는 고각범위 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 사이에서 에너지 값이 최소인 지점을 구할 수 있다. 이 때 각 방향에서 빔형성 출력값인 $d(u)(5 \times N$ 행렬)값을 알기위해 근접전계에서 측정된 수신빔 패턴을 이용한다. 그림에서 보듯이 에너지함수 $E(u_1, u_2)$ 값은 1, 3사분면을 가로지르는 대각선에 대칭으로 형성된다. 그러므로 계산부하를 줄이기 위해 에너지함수의 최소 값은 그림의 삼각형 점선영역 안에서 찾을 수 있다. 여기서 최소 지점을 찾는 알고리즘은 Nelder-mead Simplex Method^[4] 같은 방법을 이용해서 구할 수 있다. β_1 축에서 θ_1 , β_2 축에서 θ_2 로 최소지점이 구해지며 양의 값은 실표적의 고각이며 음의 값은 영상표적의 고각으로 판단할 수 있다.

나. 탐색레이더에 적용할 때의 문제점

Double Null 알고리즘을 탐색레이더에 적용할 때는 모든 상황에서 잘 동작하여야 실제 구현하여 사용할 수 있다. 즉, 다중경로현상이 있을 때와 없을 때, 다중경로현상이 있다면 실표적과 영상표적 2개만 있는 경우 및 2개 이상 표적이 있는 경우에 모두 적용될 수 있어야 한다. 각각의 경우에 Double Null 알고리즘이 가질 수 있는 문제점에 대해 아래에 기술해 보았다.

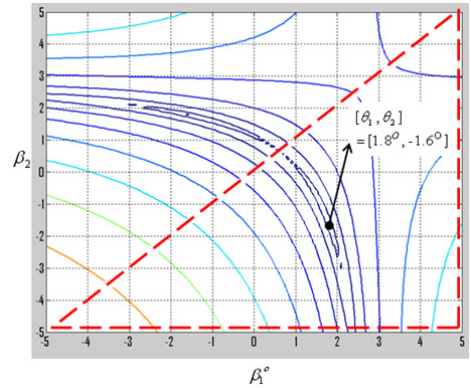


Fig. 2. Contour of the energy function ($E(u_1, u_2)$) (Elevation via direct path = 1.8° , Elevation via reflected path = -1.6°)

1) 다중경로현상이 없는 경우(실표적만 존재)

다중경로 현상이 없는 경우에는 실표적 하나만 존재하므로 식 (7)에서와 같이 $Dc(n)$ 이 표현되므로 실표적 고각방향에 널이 생기고 다른 하나는 잡음벡터가 가장 가까운 쪽에 발생함으로 랜덤하게 발생한다.

$$Dc(n) = c_1(n)d_1(n) \text{ or } Dc(n) = c_2(n)d_2(n) \quad (7)$$

Fig. 3은 실표적 고각이 2° 인 경우로서 θ_1 과 θ_2 모두 양수로 될 가능성이 있다. 이러한 경우 어떤 것이 실표적인지 판단이 모호하며 고각 오차를 급격하게 증가시키는 원인이 될 수 있다.

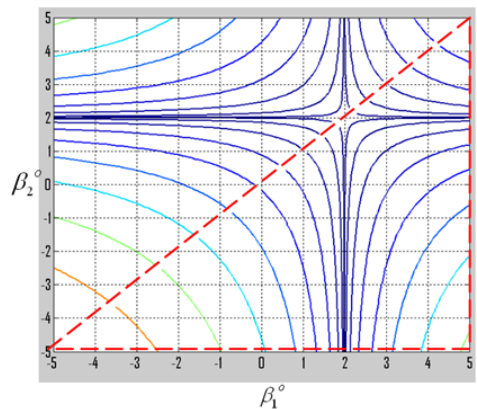


Fig. 3. Contour of the energy function with the signal via direct path only(Elevation via direct path = 2°)

2) 3개 이상의 표적이 있는 경우

이 경우는 다중반사표적이 발생한 경우로서 비교적 하나의 표적고각이 다른 표적들보다 상대적으로 많이 떨어져 있다면 그 쪽으로 깊은 널이 발생하고 다른 표적 고각 쪽에는 약한 널들이 발생한다. 이러한 경우는 위에서 설명했듯이 다중경로 현상이 없는 경우와 비슷한 문제점을 나타낸다. 하지만, 3개 이상의 표적고각들이 인접해 있다면 정확한 실 표적 고각을 판별해 내기는 어렵다.

3) 아주 낮은 고각에 실 표적이 있는 경우

이러한 경우는 실표적과 영상표적의 고각차이가 작게 나는 경우인데, 즉 $|\theta_1 - \theta_2|$ 이 작으면 작을수록 신호대 잡음비(SNR)의 영향을 크게 받는다. 즉 SNR이 작을 때 $|\theta_1 - \theta_2|$ 이 작으면 두 표적의 고각분리가 잘 안되고 분리되더라도 오차가 커지게 되는 단점이 있다.

4) 실표적과 영상표적의 위상차이가 0°일 때

실표적과 영상표적의 위상차이가 180°일 때는 신호 크기 벡터가 서로 상쇄함으로써 탐지가 되지 않아 실제 히트가 없을 수도 있다. 이러한 경우에는 탐색레이더에서는 추적필터로 표적의 고각을 예측하여 보간(Interpolation)하는 방법으로 고각 정확도를 개선시킬 수 있으나, 실표적과 영상표적의 위상차이가 0°일 때는 신호크기는 상대적으로 더 커지며 고각오차가 많이 생기는 경우이다. 이러한 경우에는 실제 Double Null 알고리즘의 결과도 오차가 커지게 되는 단점이 있다.

3. 저고도 표적 고각 오차 혼성 보정 알고리즘

Double Null 알고리즘을 탐색레이더에 그대로 적용하기 위해서는 위에서 언급했던 단점들을 보완하여 적용해야 한다. 먼저 다중경로 발생 예상 고각 범위 -5°~5°내의 모든 플롯에 대해 Double Null 알고리즘을 적용하지 않고, 특정기준을 만족하는 플롯에 한해 선별적으로 적용함으로써 실시간 고속처리를 위한 처리 부하를 줄일 수 있고, 다중경로가 발생하지 않는 상황에서는 기존 모노펄스의 결과를 그대로 이용할 수 있게 함으로써 고각 정확도를 향상시킬 수 있다. 그러나 선별에 의해 선택되지 않은 낮은 고각의 표적 혹은 실표적과 영상표적의 위상차이가 0°에 가까운 표

적들은 선별되지 않을 수 있다. 이러한 플롯들은 근접전계의 수신 빔 패턴을 이용하여 오차고각만큼 직접 보정하는 방법을 통해 고각 정확도를 향상시킬 수 있다. 전체적인 알고리즘의 순서는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

가. 선별적 Double Null 알고리즘 적용

Fig. 4에서 모노펄스의 출력인 플롯의 고각은 디지털 빔형성 이후의 2개의 수신빔 크기의 무게중심치 계산을 통해 계산된다. 다중경로가 없는 경우라면 계산된 플롯의 고각지점의 5개 빔 출력크기 비율과 같은 고각지점의 근접전계에서 측정된 5개 빔 출력크기 비율이 유사해야 할 것이다. 하지만, 다중경로가 발생하면 그 비율이 많이 달라지게 된다. 식 (8)은 식 (6)에 있는 에너지 함수(E)에 실표적의 고각(β)만을 대입하고 정규화하여 표현한 식이다.

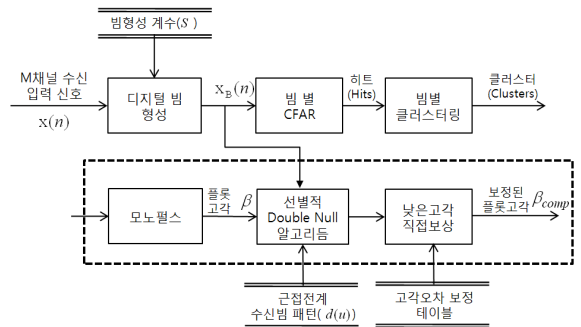


Fig. 4. Overall procedure of the plot extraction and the estimation of target elevation

$$\begin{aligned}
 Q_d(\beta) &= \frac{x_B^H P_B^{-1} x_B}{x_B^H x_B} \\
 &= \frac{1}{\|x_B\|^2} \left(x_B^H x_B - \frac{x_B^H D(\beta) D^H(\beta) x_B}{\|D(\beta)\|^2} \right) \\
 &= 1 - \left(\frac{|x_B^H D(\beta)|}{\|x_B\| \|D(\beta)\|} \right)^2
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서 제일 마지막 행의 두 번째 항은 오프라인에서 가지고 있는 고각(β)지점의 5개 수신 빔 크기, $D(\beta)$,와 실제 측정된 5개 수신 빔 크기인 x_B 의 정규화된 벡터곱으로 나타난다. 즉, 다중경로가 발생하지 않으면 $Q_d(\beta)$ 는 0에 가까워질 것이고 다중경로가 발

생하여 서로의 빔패턴 비율이 달라진다면 그 값이 커질 것이다. 그러므로 $Q_d(\beta)$ 는 다중경로가 발생한 것을 알 수 있는 척도가 된다. 즉, $Q_d(\beta)$ 가 크다는 것은 다중경로 영향이 큰 것을 의미한다.

Fig. 5의 그림은 해상 파도높이가 0.3m(표준편차) 일 때 200m 고정고도로 탐색레이더방향으로 접근하는 비행표적의 고각을 나타낸다. 실선은 다중 경로가 없는 환경에서의 표적의 고각이며 점선은 다중경로 환경에서 모노펄스방식에 의해 계산된 고각이다. Fig. 6에서 실패표적과 영상표적의 위상차이가 180° 에 가까워질수록 표적의 고각이 위로 튀게 되고 위상차이가 0° 에 가까워질수록 고각이 아래로 내려가는 경향이 있다. Fig. 7을 보면 다중경로 때문에 표적의 고각이 주기적으로 크게 될 때 마다 Q_d 값이 같은 주기로 커짐을 알 수 있다. 그러므로 Q_d 값이 어느 정도 이상 커질 때만 Double Null 알고리즘을 적용하면 처리부하를 줄일 수 있고, 다중경로가 없는 환경에서는 Q_d 값이 작게 나오게 되며, 이 때는 모노펄스 결과 값을 그대로 이용함으로써 표적 고각 정확도를 더 향상시킬 수 있다. 하지만, 위상차이가 0° 에 가까워지면서 고각오차가 생기는 부분에서는 Q_d 값이 역시 작게 되므로 오차보정을 위해 선별되지 않는 문제점이 있다.

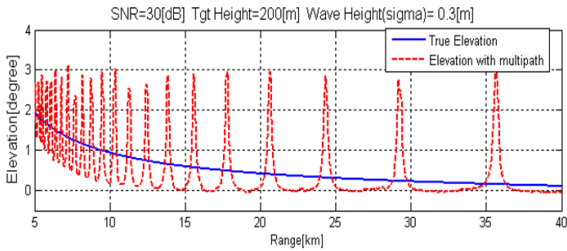


Fig. 5. Target elevation estimated by a conventional monopulse in a multipath environment

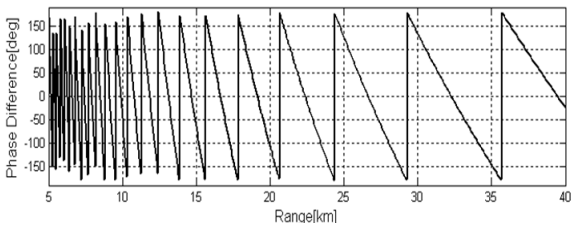


Fig. 6. Phase difference between direct and reflected paths

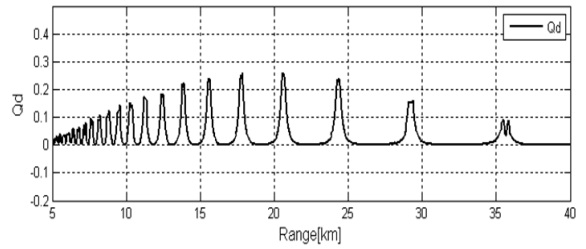


Fig. 7. Estimation of Q_d

나. 낮은 고도 표적의 고각오차 직접보정 기법

낮은 고도의 표적의 경우, 특히 실패표적과 영상표적의 위상차이가 0° 에 가까워질수록, Fig. 6과 Fig. 7에서 보듯이 Q_d 값 또한 굉장히 작음을 알 수 있다. 즉 5개 수신빔의 벡터곱으로는 $D(\beta)$ 와 x_B 가 유사하다고 판단하게 되어 선별적 Double Null 알고리즘이 적용이 안 될 수 있으므로 다른 방법이 필요하다. 다중경로에 의해 고각이 낮아지고 선별이 안된 플롯들은 수평빔의 신호크기와 그 아래 빔의 신호크기 비가 시뮬레이션 상에서 미세하게 달라짐을 알 수 있다. 여기에 착안하여 수평빔과 그 아래 빔의 신호크기 비를 로그스케일로 표현한 값을 이용하여 고각오차를 직접 보정하는 방법을 제안한다.

Fig. 8은 200m 고도로 수평비행하는 표적의 수신신호를 다중경로 상황에 맞게 모사하여 모노펄스 단계까지 처리하여 플롯의 고각 $\beta(n)$ 을 구하였다.

빔형성 출력인 $x_B(n)$ 는 5×1 벡터이며 5개 빔의 선형크기 값으로 아래 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_B(n) = [B1(n) B2(n) B3(n) B4(n) B5(n)]^T \quad (9)$$

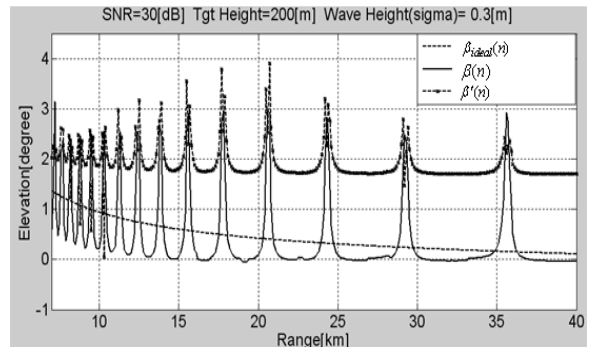


Fig. 8. The first estimation of the target elevation using equation (10)

빔형성 출력 수평빔 크기($B3(n)$)의 절대 값과 그 아래빔 크기($B2(n)$)의 절대 값의 차이를 대수적으로 변환하여 상수 α 를 곱하여 이를 모노펄스 출력 고각인 $\beta(n)$ 에서 빼주면, 식 (10)과 같이 일차 보정된 고각($\beta'(n)$)을 구할 수 있게 된다. 그림에서 $\beta_{ideal}(n)$ 은 다중경로현상이 없을 때의 고각이다.

$$\beta'(n) = \beta(n) - real(\alpha \log_{10}(1 - 10^{\frac{(|B3(n)| - |B2(n)|)}{20}})) \quad (10)$$

그림을 보면 $\beta'(n)$ 이 $\beta(n)$ 보다 고각방향 변동이 더 작아졌고 $\beta_{ideal}(n)$ 과의 오프셋이 발생함을 알 수 있다. 이러한 오프셋은 근접전계에서 측정된 수신빔 패턴을 이용하여 오프라인에서 계산하여 보정할 수 있다. 여기서 n 번째 거리셀에서의 오프셋을 $\varphi_{offset}(n)$ 이라고 하면 식 (11)과 같이 최종적으로 고각오차가 보정된 고각 β_{comp} 를 얻을 수 있다. 식 (10)에서 상수 α 는 $\beta'(n)$ 의 고각방향 변동을 최소화하는 방향으로 조정하여 정하면 된다. 본 논문에서 α 는 2.8로 정해져 있다.

$$\beta_{comp} = \beta'(n) - \varphi_{offset}(n) \quad (11)$$

오프셋 $\varphi_{offset}(n)$ 은 오프라인에서 구하여 식 (12)에서 표현한 것처럼 해당 주파수와 β' 를 이용하여 Look-up 테이블로 저장한 값을 이용하여 적용한다.

$$\varphi_{offset}(n) = LUT_Offset(freq, \beta'(n)) \quad (12)$$

Look-up 테이블은 Fig. 9에서 보듯이 다중경로환경이 없는 상황에서 특정고도 비행시 표적고각 β_{ideal} 을 계산하고 식 (10)의 계산에 의해 β'_{ideal} 을 계산한다. 이때 $x_B(n)$ 값은 근접전계에서 측정된 수신빔 패턴값을 이용한다. 여기서 오프셋 값, $\beta'_{ideal} - \beta_{ideal}$ 를 계산하여 Fig. 10에서와 같이 다항식 근사를 하고 다항식 계수를 구하여 각 주파수별로 저장한다. 이렇게 저장된 Look-up 테이블이 식 (12)의 오른쪽항이다. 주파수가 높아질수록 수신빔 패턴이 뾰족하게 형성되기 때문에 그림에서 보듯이 주파수에 따라 다항식 계수가 다르게 적용되어야 한다. 다중경로에 의해 왜곡된 수신빔 패턴은 고각오차를 발생시키므로 알고 있던 빔패턴과 달

라진 양만큼을 대수적으로 변환하여 고각오차를 보정함으로써 다중경로가 없는 환경에서는 플롯의 고각을 보정하지 않고 다중경로에 의해 고각이 왜곡되면, 그 고각 오차만큼만 보정하게 된다.

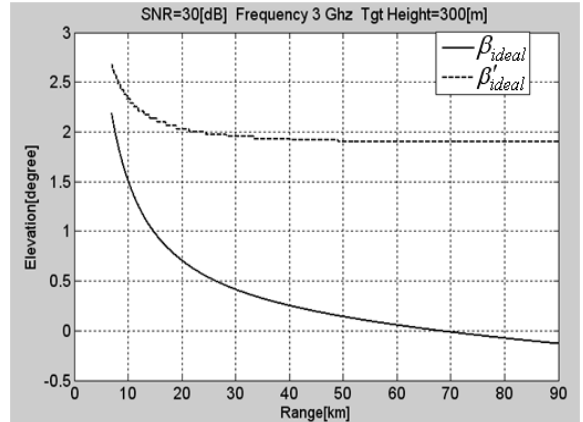


Fig. 9. Computation of the offsets between β_{ideal} and β'_{ideal}

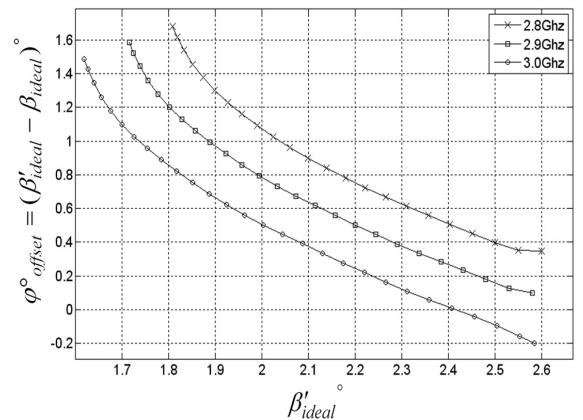


Fig. 10. Polynomial fitting of the nonlinear offsets($\beta'_{ideal} - \beta_{ideal}$) with respect to various frequencies

4. 시뮬레이션 결과

가. 시뮬레이션 환경

함정용 탐색레이더를 감안하여 다중경로 환경을 시뮬레이션 하였으며, 해수면의 전자파 반사 특성에 대한 모델링은 대기권의 전자파 굴절 현상에서 표준

대기의 유효 지구 반경이 지구 반경의 4/3배로 되게 적용하였다. 실험표적과 영상표적이 합성되어 반사되는 환경에서 발산계수 및 지표면 반사계수 등의 세부적인 내용은 참고문헌을 참조하여 구현하였다^[5,6]. 레이더 비행표적은 고정고도로 탐색레이더 방향으로 수평비행(Level Flight)하며, RCS는 고정이고 레이더의 높이는 해수면에서 25m인 상황으로 시뮬레이션 하였다.

나. 제안한 알고리즘 성능

Fig. 11, 12, 13은 다중경로환경에서 표적이 300미터 고도로 수평비행으로 탐색레이더 방향으로 접근하는 시나리오 환경이다. 거울반사가 강할 때(해면파도 높이가 낮다고 가정), 다중경로현상이 없을 때(반사계수 = 0)와 난반사가 강할 때(해면파도 높이가 높을 때)의 상황으로 나눠서 기존 무계중심치 방법으로 모노펄스했을 때(Monopulse)와 Double Null 알고리즘만을 사용했을 때(Double Null), 그리고 제안한 알고리즘(Proposed Method)으로 표적고각을 구했을 때의 성능을 비교 및 분석하였다. 이 때 운용주파수는 S밴드의 특정 주파수이고, SNR은 20dB이다. Fig. 11의 결과를 보면, 제안한 알고리즘이 Double Null알고리즘만 이용했을 때보다 고각 RMSE(Root Mean Square Error)가 약 3배가량 더 작음을 알 수 있다. 거울반사가 강할 때는 Double Null 알고리즘만 적용할 때는 낮은 고각이면서 실험표적과 영상표적의 위상차이가 0°에 가까운 표적의 고각계산 오차가 큼을 알 수 있다. 이에 비해 제안한 알고리즘은 안정적으로 실제 표적고각을 따라감을 알 수 있다. Fig. 12은 다중경로 현상이 없을 때의 결과이다. Double Null 알고리즘만 사용하는 경우는 위에서 설명했듯이 실제 고각위치를 찾는 데 많은 오차가 발생한다. 하지만, 제안된 방법은 선별적으로 Double Null 알고리즘이 적용되므로(Q_d 가 아주작음) 기존 모노펄스 결과를 이용한다. 그러나 잡음이나 보정오차에 의해 왜곡된 수신빔 패턴만큼 낮은 고도표적의 고각오차 직접보정 방식이 적용되기 때문에 약간의 오차가 발생하여 모노펄스 결과보다는 정확도가 약간 떨어지지만, Double Null만 이용한 경우보다는 상당히 좋은 고각 정확도를 보여주는 것을 알 수 있다. Fig. 13에서는 해면파도높이가 높을 때 즉 난반사가 강해서 영상표적의 영향이 적어질 때도 제안한 알고리즘이 더 정확한 고각계산 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 SNR(Signal to Noise Ratio)에 따른 두 방식의 고각계산 RMSE를 비교하여 보여준다. 표적의 고도는 200m이고, 파도의 높이는 0.2m(표준편차높이)로 설정하여 각 SNR마다 30회 반복 시뮬레이션을 통해 고각 RMSE 평균을 구했다. 두 방식 모두 SNR이 증가함에 따라 고각오차가 줄어들지만 제안한 방식이 SNR의 변화에도 상대적으로 작은 고각오차를 보임을 알 수 있다. Fig. 15는 표적 고도에 따른 두 방식의 고각계산 RMSE를 비교하여 보여준다. 표적의 SNR은 20dB, 파도 높이는 0.2m로 설정하여 각 표적의 고도마다 30회 반복 시뮬레이션을 통해 고각 RMSE 평균을 구했다. 그림에서 보면 Double Null만을 이용한 방식이 고도가 낮아질수록 더 큰 보정오차를 보임을 알 수 있다.

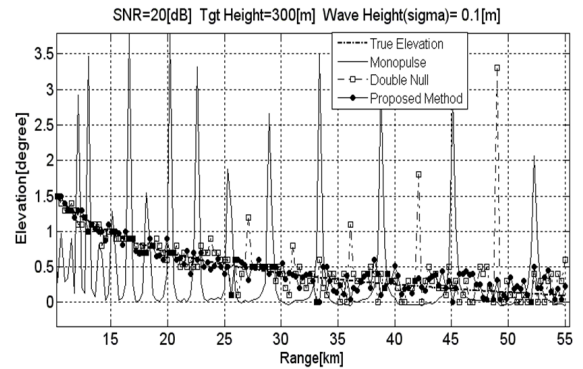


Fig. 11. RMSE of esitimated target elevation in the strong specualr reflection(monopulse = 0.82°, double null = 0.34°, proposed method = 0.13°)

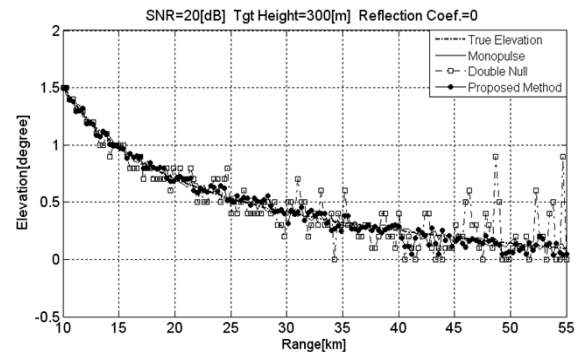


Fig. 12. RMSE of esitimated target elevation without any multipath(monopulse = 0.022°, double null = 0.19°, proposed method = 0.04°)

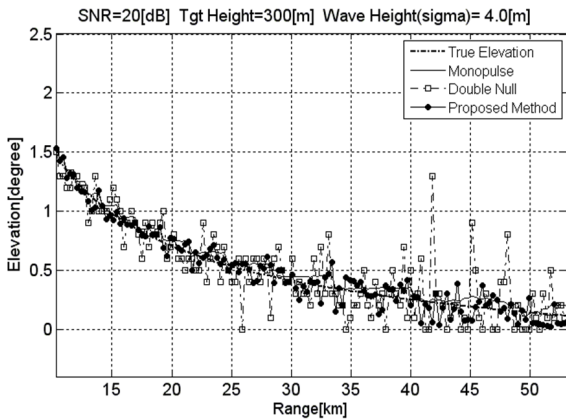


Fig. 13. RMSE of esitimated target elevation in the strong diffuse reflection(monopulse = 0.06°, double null = 0.24°, proposed method = 0.08°)

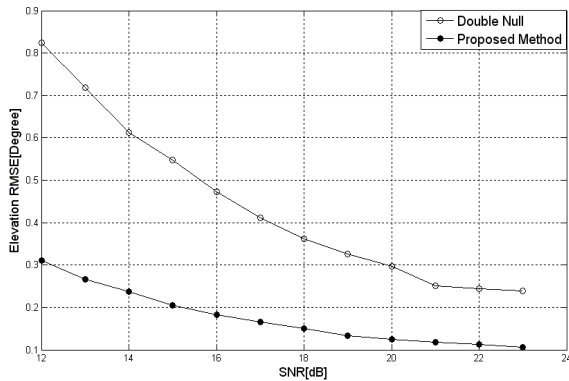


Fig. 14. RMSE of estimated target elevation vs. SNR by the double null and proposed methods

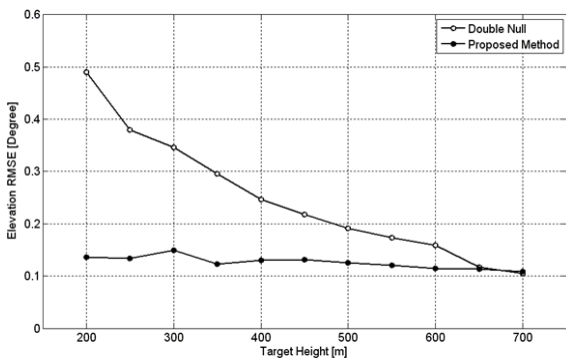


Fig. 15. RMSE of estimated target elevation vs. target altitude by the double null and proposed methods

5. 결론

본 논문은 다중경로환경에서 다중빔 탐색레이더에 적용 가능한 저고도 표적 고각오차를 보정하는 혼성기법을 제안하였다. 기존에 이론적으로 정립되었던 Double Null방식에 대해 수식적으로 정리하고 실제 레이더에 적용할 때 발생할 수 있는 문제점에 대해 기술하였다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 선별적으로 Double Null 알고리즘을 적용하는 방식과 아주 낮은 고도의 표적에 대해 알고 있는 수신빔 패턴을 이용하여 고각오차를 직접 보정하는 방식을 적용함으로써 다중경로환경에서 보다 정확하고 안정된 고각오차보정 알고리즘을 제시하였다. 그리고 제안 방식이 다양한 다중경로 환경에서 Double Null 알고리즘만을 이용한 방식보다 더 좋은 성능을 보임을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

앞으로 실효적과 영상표적의 위상차이가 180°에 가까워져서 수신신호가 탐지되지 않아 발생하는 오차에 대한 연구가 후속적으로 진행되어야 할 것이다.

References

- [1] D. K. Barton, "Low-Angle Radar Tracking", Proceedings of the IEEE, Vol. 62, No. 6, pp. 687~704, June, 1974.
- [2] W. Ballance, A. G. Jaffer, "Low-Angle Direction Finding Based on Maximum Likelihood : A Unification", Proceedings of the 21st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. 2-4, 1987.
- [3] M. D. Zoltowski, T. S. Lee, "Maximum Likelihood Based Sensor Array Signal Processing in the Beamspace Domain for Low Angle Radar Tracking", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 39, No. 3, March, 1991.
- [4] J. A. Nelder, R. Mead, "A Simplex Method for Function Minimization", Computer Journal 7, pp 308~313, 1965.
- [5] Lamont V. Blake, "Radar Range-Performance", Artech House, Inc., Norwood, pp. 237~290, 1986.
- [6] Albert G. Huizing, Arne Theil, "Computer-Aided Radar Performance Evaluation Tool(CARPET) Ver.2.0 User Manual", TNO Physics and Electronics Laboratory, 2004.