

펄스 체이싱을 이용한 바이스테틱 레이더에서 수신 빔 조향 오차와 MTI(Moving Target Indication) 성능에 대한 연구

A Study on Receiving Beam Pointing Error and MTI(Moving Target Indication) Performance in a Bistatic Radar Using Pulse Chasing

양진모 · 이민준 · 김환우*

Jin-Mo Yang · Min-Joon Lee · Whan-Woo Kim*

요약

펄스 체이싱을 이용한 바이스테틱 레이더는 탐지 영역을 효과적으로 스캔하기 위해 수신 빔을 이용하여 송신 펄스를 추적함으로써 표적을 탐지한다. 수신 빔을 이용한 펄스 추적시 펄스-펄스간 빔 포인팅 오차에 의해 수신 펄스의 타이밍 오차와 신호 세기의 변화가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 수신 빔 포인팅 오차에 의해 발생된 에러가 MTI 필터의 성능을 제한할 수 있음을 제안하였고, 바이스테틱 구조만의 고유한 특성인 기하학적 요소와 MTI 성능의 관계식을 유도하였다. 시뮬레이션을 통해 수신 빔 조향 오차에 의한 개선 성능 제한을 고찰하였고, 수신 빔의 조향 오차를 0.5도 이하로 유지함으로써 성능 개선에 기여할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

A bistatic radar using the pulse chasing can detect a target to track successive transmitted pulses using a receive beam for effectively scanning the cosite search area. When tracking a transmitted pulse with the receive beam, some beam pointing errors within pulse-to-pulse can cause the timing error in received pulse and the variation of the signal strength. In this paper, we have proposed that some errors due to the receive beam pointing error could limit the MTI filter's performance and derived that the relationship between the MTI performance and the geometric factors which are the inherent properties in bistatic configuration. Through the simulation, we have considered the limitations of the improvement performance restricted by the receiving beam pointing error and confirmed the contribution to the performance improvement in maintaining the receiving beam pointing error of under 0.5 degrees.

Key words : Bistatic Radar, Pulse Chasing, Beam Pointing Error, Improvement Factor Limitation

I. 서론

바이스테틱 레이더는 송신기와 수신기가 분리되어 설치된 상태에서 표적을 탐지, 추적하는 레이더 구조의 하나로 레이더 유효 단면적(RCS: Radar Cross Section)이 작은 스텔스 표적 탐지, 항공기용 GMTI (Ground Moving Target Indication)^[1] 및 위성 탐제

되어 지상의 영상 정보 획득^[2] 등에 활용되고 있다. 최근 들어, 위상 배열 안테나 기술의 발전과 함께 빔 교차 영역을 효과적으로 스캔할 수 있는 펄스 체이싱(pulse chasing) 기법의 구현 가능성이 높아지고, 이와 병행하여 송신기와 수신기의 시간 및 주파수/위상 동기^{[3],[4]} 기술이 급속히 발전함에 따라 펄스-펄스 단위의 수신 신호 처리를 통해 획득할 수 있는 MTI 필

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*충남대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20100920-117

· 교신저자 : 양진모(e-mail : jmy1965@dreamwiz.com)

· 수정완료일자 : 2010년 11월 4일

터와 같은 코히런트 프로세싱의 적용 가능성에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다.

고이득 수신기 안테나를 이용하여 송신 펄스를 수신 빔이 추적하는 방식인 펄스 체이싱 기법은 제한된 송신 출력으로 효율적으로 스캔하기 위한 방법 중 하나로 기존의 빔 스캔 방식에 비해 체이싱 기법은 다중 빔 수신기의 복잡도와 비용을 감소하면서 동시에 탐지 영역을 효과적으로 스캔할 수 있는 방법 중 하나이다^{[3],[4]}. 펄스 체이싱 기법은 송신 펄스 단위로 수신 빔이 추적을 수행하기 때문에 연속된 펄스에 대한 펄스 추적시 수신 빔 안테나의 포인팅(pointing) 오차에 의해 동일한 지점을 조향하지 못할 수 있다. 만약, 수신 빔이 조향하는 지점에 클러터와 표적이 함께 존재한다면, 빔 포인팅 오차에 의해 클러터의 상관 관계가 저하될 수 있다. 클러터의 상관 정도는 상관 함수로 표현되며, MTI 수신기의 클러터 제거 성능을 결정짓는 중요한 요소이다.

본 논문에서는 단일 채널 수신기를 이용하여 탐지 영역을 효율적으로 스캔할 수 있는 펄스 체이싱 기법을 이용하고, 클러터로부터 작은 RCS를 갖는 표적을 효과적으로 분리하기 위한 방법으로 코히런트 MTI 신호 처리 방식을 적용한 바이스테틱 레이더 수신기 구조에서 수신 빔 포인팅 에러에 의해 펄스-펄스간 발생될 수 있는 시스템 불안정(system instability) 요인들을 대해 식별하여 제안하고, 시스템 개선 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 바이스테틱 구조에서만 고려되는 기하학적(geometric) 요소 중 하나인 바이스테틱 각(β)과 MTI 성능 간의 관계식을 유도하여 시뮬레이션을 통해 시스템 성능에 미치는 영향과 펄스 체이싱시 빔 포인팅 에러가 가져야 하는 허용 범위에 대해 분석하였다.

논문은 다음과 같이 구성되었다. II장에서는 펄스 체이싱을 적용하기 위한 수신 빔의 운용 개념에 대해 살펴보았으며, 단일 지연선 상쇄기(SDC: Single Delay-line Canceller)를 적용한 MTI 수신기에서 수신 빔 포인팅 에러에 의한 펄스 타이밍 에러와 신호 진폭 변화에 대한 성능 관계식을 유도하였다. III장에서 시뮬레이션을 통해 제안된 모델의 성능을 분석하였고, IV장에서는 결론을 맺었다.

II. 바이스테틱 레이더의 시스템 불안정 요소

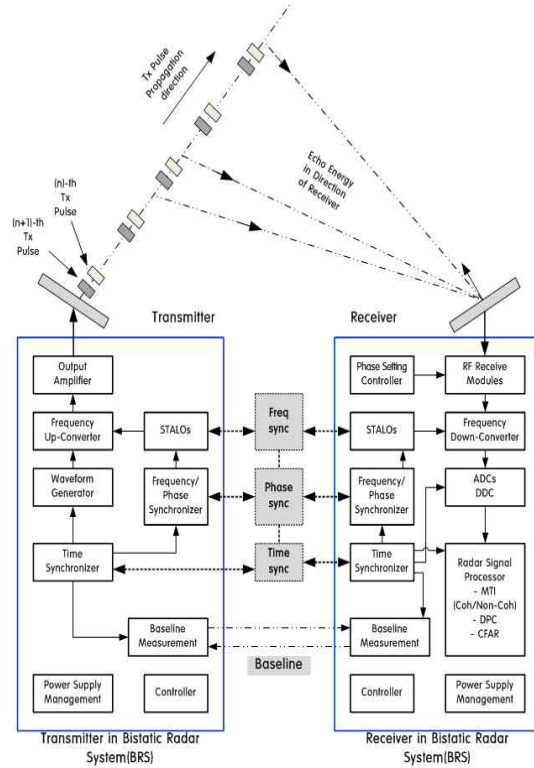


그림 1. 펄스 체이싱을 이용한 바이스테틱 레이더
Fig. 1. Bistatic radar using pulse chasing.

바이스테틱 레이더 시스템에서 한정된 공간을 효율적으로 탐색하기 위한 방법^{[5],[6]} 중 하나로 펄스 체이싱을 이용한다. 그림 1은 펄스 체이싱을 이용한 바이스테틱 시스템의 구성을 나타낸다.

펄스 체이싱^{[5],[8]} 스캔 방식은 단일 빔과 단일 수신기 및 신호 처리기를 이용하며, 송신 펄스를 수신 빔이 추적함으로써 빠른 시간 내에 제한된 탐지 영역을 스캔할 수 있는 방식이다. 수신 빔의 스캔율(scan rate)는 송신 펄스의 전파율(propagation rate)과 일치하여야 하는 제약^[6]이 있다.

그림 2는 펄스 체이싱 스캔 방식에서 수신기의 조향각(look angle)과 바이스테틱 삼각형을 형성하는 변수들 간의 관계를 나타내며, 송신 펄스가 송신기로부터 송신 빔 조향 방향으로 전파된 후 진행될 때 수신 빔 조향각^[6]은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_R = \alpha_T - 2 \tan^{-1} \left(\frac{L \cos \alpha_T}{R_T + R_R - L \sin \alpha_T} \right) \quad (1)$$

여기서 α_R , α_T 는 바이스테틱 평면(bistatic plane) 상

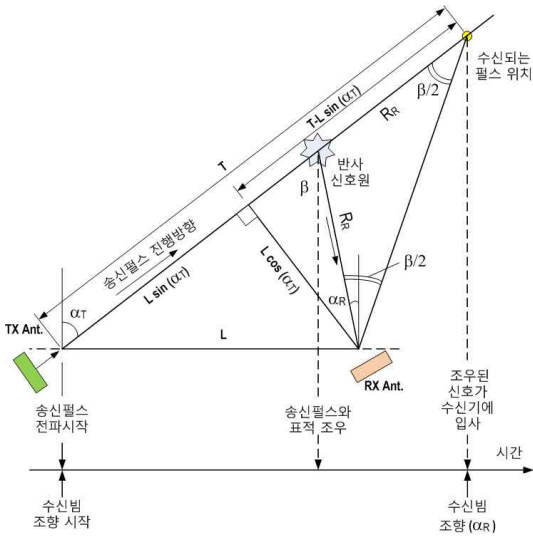


그림 2. 펄스 체이싱 설명
Fig. 2. Bistatic radar using pulse chasing.

에서 수신기와 송신기가 표적을 바라보는 조향각을 나타내며, R_R , R_T 는 수신기-표적간 거리와 송신기-표적간 거리를 나타내고 L 은 송신기와 수신기 간 직선 거리로 기준선(baseline)을 나타낸다.

그림 2는 Jackson^[6]이 제안한 펄스 체이싱 과정을 재구성한 것이며, 그림 2에서와 같이 송신 펄스가 임의의 송신 빔 지향각(α_T) 방향으로 전파되어 진행할 때 수신기의 수신 빔 지향각(α_R)이 시간에 동기되어 변하면서 송신 펄스를 추적하게 되고, 이때 표적이 존재한다면 표적의 반사 신호를 수신하여 탐지를 수행한다.

수신 빔은 송신 펄스의 펄스 반복 주기에 동기되어 수신 빔의 지향각을 제어하게 되며, 수신 빔의 반복 스캔 횟수는 시스템의 요구 조건에 따라 결정된다. 만약 바이스태틱 레이더 구조에서 표적과 클러터를 구분하여 표적의 탐지 성능을 개선하기 위해서는 일반적으로 사용되는 코히런트 신호 처리 기술들이 적용되어야 한다. 특히, 클러터로부터 작은 RCS를 갖는 표적을 효과적으로 분리하기 위한 방법으로 코히런트 MTI 신호 처리 방식을 적용한 바이스태틱 레이더 수신기 구조를 생각할 수 있으며, MTI 신호 처리를 위해서는 적어도 2개 이상의 동일한 거리 셀(range cell)과 빔 조향 각에서 수집된 신호가 요구된다. 클러터로부터 표적을 효과적으로 분리하기 위해

서는 수신된 신호의 상관도가 유지되어야 한다. 즉, 동일한 거리 셀과 빔 조향각에 대해 수신된 신호의 상관도에 의해 MTI 필터의 성능이 좌우된다^[7]. MTI 필터의 성능을 결정하는 중요 요소들로는 클러터 자체의 특성, 시스템의 불안정 요소들^[8]과 회전하는 안테나의 안테나 빔 변조의 영향과 레이더 플랫폼의 기동에 의한 영향들^[9]이 있다.

2.1 수신 빔 조향각 오차에 의한 수신 펄스 폭 변화

일반 레이더 시스템에서 수신되는 펄스 폭의 변화 원인으로 송신기에 의한 송신 펄스 폭 변화와 수신기의 샘플링 오류^[9] 등이 있다.

수신 빔의 조향각 오차가 없는 경우 이상적인 경우, 펄스 체이싱 과정에서 수신 빔은 동일한 지점을 포인팅하며, 동일한 유효 펄스 폭을 갖는 신호를 수신하게 된다. 그러나 실제 시스템에서는 위상변위기의 비트 에러에 의한 조향 오차와 온도와 같은 운용 환경에 의해 변위기 성능 변화에 의해 빔 조향 오차^{[10],[11]}가 존재하게 된다. 바이스태틱의 경우, 추가적인 발생 원인으로 수신 빔 조향 오차가 수신 펄스 폭의 변화에 미치는 영향에 대해 살펴본다.

바이스태틱 레이더의 분해능은 기하학적 요소인 바이스태틱 각(β)이 포함되어 다음과 같이 정의된다^[6].

$$\delta R_B = \frac{1}{2} c \tau \sec\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{2}$$

여기서 τ 는 송신 펄스 폭, $c(=3 \times 10^8 \text{ m/s})$ 는 전파의 속도를 의미한다.

분해능은 펄스 폭과 바이스태틱 각에 의해 결정되며, 펄스 폭과 바이스태틱 각의 곱을 유효 펄스 폭이라 정의하자.

$$\tau_B \equiv \tau \sec\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{3}$$

바이스태틱 각(β)는 $\alpha_T - \alpha_R$ 로 표현되며, 송신 빔의 조향각 오차가 없다면, 수신 빔 조향 오차($\Delta \alpha_R$)에 의한 바이스태틱 각 오차($\Delta \beta$)는 $\Delta \alpha_R$ 이라 할 수 있다. 바이스태틱 각 오차가 수신 빔 조향 오차에 비례하여 발생되고 발생된 바이스태틱 각 오차는 수

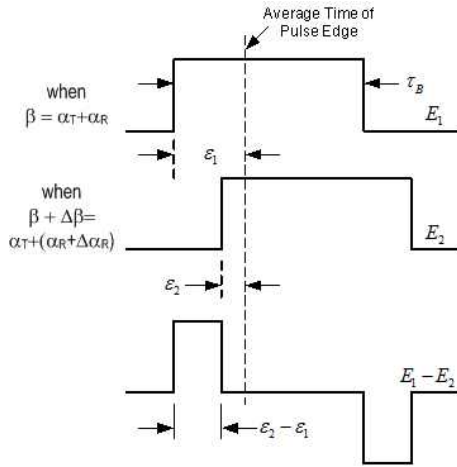


그림 3. 수신 빔 조향 오차가 존재할 때, 송신 펄스 단위의 수신 펄스 폭 변화 설명
 Fig. 3. Illustration of receiving pulse width variation based on transmit pulses, when existing receiving beam-pointing error.

신호의 수신 펄스 폭의 변화(ϵ)를 야기한다. 수신 빔 조향 오차가 존재할 때 수신되는 펄스 폭의 변화를 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

수신 빔 조향 오차가 $\Delta\beta$ 만큼 존재할 때, 식 (3)은

$$\tau'_B = \tau \sec\left(\frac{\beta + \Delta\beta}{2}\right) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있으며, $\sec(x)$ 함수를 $1 + x^2/2 + 5x^4/24 + \dots$ 로 근사하였을 때, 식 (3)과 식 (4)는 각각

$$\tau_B \approx \tau \left[1 + \frac{1}{8}\beta^2 + \frac{5}{384}\beta^4 \right] \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \tau'_B &\approx \tau \left[1 + \frac{1}{8}(\beta + \Delta\beta)^2 + \frac{5}{384}(\beta + \Delta\beta)^4 \right] \\ &= \tau \left[1 + \frac{\beta^2}{8} \left(1 + \frac{\Delta\beta}{\beta} \right)^2 + \frac{5\beta^4}{384} \left(1 + \frac{\Delta\beta}{\beta} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (5b)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (5b)에서 $\Delta\beta$ 가 β 에 비해 매우 작은 값을 가질 수 있기 때문에 binominal series를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau'_B \approx \tau \left[1 + \frac{\beta^2}{8} \left(1 + 2\frac{\Delta\beta}{\beta} \right) + \frac{5\beta^4}{384} \left(1 + 4\frac{\Delta\beta}{\beta} \right) \right] \quad (6)$$

식 (6)를 정리하면,

$$\tau'_B = \tau \left[1 + \frac{\beta^2}{8} + \frac{5\beta^4}{384} \right] + \tau \left[\frac{\beta}{4} \Delta\beta + \frac{5\beta^3}{96} \Delta\beta \right] \quad (7)$$

와 같이 표현할 수 있으며, 첫 번째 항은 빔 조향 오차가 없을 때의 수신 타이밍(식 (3)의 근사식인 식 (5a))을 나타내며, 두 번째 항은 빔 조향 오차에 의한 수신 신호의 수신 타이밍 에러를 나타낸다.

$$\epsilon \equiv \tau \left[\frac{\beta}{4} \Delta\beta + \frac{5\beta^3}{96} \Delta\beta \right] \quad (8)$$

식 (8)과 같이 수신 타이밍 에러를 갖는 신호가 MTI 필터에 입력될 때 모노스태틱에서와 같이 펄스 타이밍 에러에 의한 영향과 유사하게 클러터 감쇄 성능 및 개선 성능에 영향을 줄 수 있다. 참고문헌 [7]의 펄스 폭에 의한 단일지연선 상쇄기(SDC) 구조를 갖는 MTI 필터의 클러터 감쇄 특성 유도 과정을 적용하면, MTI 필터의 출력에서의 잔여 신호 세기, E_{res} 은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$E_{res} = E \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\tau_B} \quad (9)$$

여기서 ϵ_1 과 ϵ_2 는 펄스 체이싱 과정에서 단일지연선 구조를 갖는 MTI 필터의 첫 번째와 두 번째 펄스에 대한 수신 타이밍 에러들을 나타낸다. ϵ_1 과 ϵ_2 이 서로 독립이라 할 때, 두 펄스에 대한 평균 잔여 전력은

$$\frac{\overline{E_{res}^2}}{E^2} = \frac{2(\overline{\epsilon_1 - \epsilon_2})^2}{\tau_B^2} = \frac{4\sigma_\epsilon^2}{\tau_B^2} \quad (10)$$

여기서 상수 '2'는 그림 3에서 알 수 있듯이, $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 성분이 두 번 나타나기 때문에 고려된 상수이다. 수신 타이밍 에러에 의한 분산값을 구하기 위해 식 (8)의 제곱의 평균을 구하면

$$\sigma_\epsilon^2 = \tau^2 \left[\frac{\beta}{4} + \frac{5\beta^3}{96} \right] \overline{\Delta\beta^2} \quad (11)$$

과 같이 나타낼 수 있으며, MTI 필터의 입력에 대한 출력에서의 전력의 비를 클러터 감쇄(CA: Clutter Attenuation)이라 정의하면 빔 조향 오차에 의한 수신 타이밍 에러가 존재할 때 클러터 감쇄 값은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{CA_{PW}} &= \frac{\overline{E_{res}^2}}{E^2} = 4 \frac{\overline{\sigma_\epsilon^2}}{\tau_B^2} \\ &= 4 \frac{[A_3\beta + A_4\beta^3]^2 \sigma_{\Delta\beta}^2}{[1 + A_1\beta^2 + A_2\beta^4]^2} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 상수 A_1, A_2, A_3, A_4 는 각각 1/8, 5/384, 1/4와 5/96을 나타낸다. $\sigma_{\Delta\beta}^2$ 는 빔 조향 오차의 분산값을 나타낸다.

MTI 필터의 성능은 클러터 감쇄 성능과 함께 개선 인자(I: Improvement Factor)로도 표현되며, 단일지연선인 경우, 신호 성분의 필터에 대한 이득값^[9]인 '2'을 고려하여 CA에 곱하면 된다. 즉, 식 (12)를 이용하면 빔 조향 오차에 의해 발생된 펄스 폭 변화가 MTI 시스템의 개선 성능을 제한하는 표현식은 다음과 같이 주어진다.

$$I_{PW} = 2CA_{PW} = \frac{1}{2} \frac{[1 + A_1\beta^2 + A_2\beta^4]^2}{[A_3\beta + A_4\beta^3]^2} \frac{1}{\sigma_{\Delta\beta}^2} \quad (13)$$

펄스 채이싱 과정에서 수신 빔의 빔 조향 오차 ($\Delta\beta$)가 존재한다면, 수신 타이밍 에러를 야기하고 이에 의한 클러터 감쇄 특성 또는 시스템 개선 성능의 제한은 빔 조향 각(β)와 오차의 함수로 주어짐을 식 (12)와 (13)을 통해 알 수 있다.

2-2 수신 빔 조향 오차에 의한 수신 신호 세기 변화

펄스 채이싱 과정에서 신호 세기의 변화 역시 빔 조향 오차에 의해 펄스 단위로 영향을 받을 수 있으며, 바이스태틱 레이더에서 펄스 단위의 수신 전력은 다음과 같이 모델링^[6]할 수 있다. 표적 및 클러터의 레이더 유효 단면적은 상수값을 갖는다고 가정하고 신호의 세기를 전압으로 표현했을 때,

$$E_i = E \sec\left(\frac{\beta}{2}\right) \cos(\omega_{IF}t + \phi_0) \quad (14)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, E 는 레이더 방정식 포함된 변수들과 표적 및 클러터의 레이더 유효 단면적을 포함한 상수이고, 아래 첨자는 송신 펄스의 순서를 의미한다. 2-1절에서 유도 과정과 유사한 방법을 이용하여 $\sec(x)$ 함수의 근사식을 적용하면 식 (14)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i \approx E \left[1 + \frac{\beta^2}{8} + \frac{5\beta^4}{384} \right] \cos(\omega_{IF}t + \phi_0) \quad (15)$$

빔 조향 오차($\Delta\beta$)가 존재한다면, 식 (14)는 식 (5b)의 대괄호와 같이 표현되고, $\Delta\beta$ 가 β 에 비해 상

대적으로 작은 값을 가지기 때문에 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_i \approx E \left[\left(1 + \frac{\beta^2}{8} + \frac{5\beta^4}{384} \right) + \left(\frac{\beta\Delta\beta}{4} + \frac{5\beta^3\Delta\beta}{96} \right) \right] \times \cos(\omega_{IF}t + \phi_0) \quad (16)$$

식 (16)의 괄호 안 첫 번째 항은 앞에서와 마찬가지로 조향 오차가 없을 때 $\sec(x)$ 의 근사식으로 표현된 신호 세기를 나타내고, 두 번째 항은 조향 오차에 의한 신호 세기의 변화량을 나타낸다. 따라서 빔 조향 오차에 의해 발생된 신호 세기 변화는

$$\Delta E_i \approx E(A_3\beta\Delta\beta + A_4\beta^3\Delta\beta) \cos(\omega_{IF}t + \phi_0) \quad (17)$$

와 같이 표현할 수 있다.

단일지연선으로 구성된 MTI 필터의 입력이 식 (12)와 같을 때, 출력은 두 개의 송신 펄스($i=1$ 과 $i=2$)에 대한 수신 신호의 차로 주어지며, MTI 필터의 클러터 감쇄 특성은 두 신호의 차이의 크기에 대한 입력 신호의 크기의 비로 주어지고 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때 레이더 송신기의 출력 변화 또는 수신 경로상의 이득 변화는 없다고 가정한다.

$$E_{res} = |\Delta E_1| - |\Delta E_2| = E(A_3\beta + A_4\beta^3)(\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2) \quad (18)$$

식 (18)에서 $\overline{\Delta\beta^2}$ 는 빔 조향 오차의 분산값을 나타내며, 빔 조향 오차값이 서로 독립적이라고 가정하였다. MTI 필터의 출력에서 클러터 감쇄 성능과 개선 인자의 성능은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{CA_{AE}} = \frac{\overline{E_{res}^2}}{E^2} = 2(A_3\beta + A_4\beta^3)^2 \sigma_{\Delta\beta}^2 \quad (19a)$$

$$I_{AE} = 2CA_{AE} = \frac{1}{(A_3\beta + A_4\beta^3)^2 \sigma_{\Delta\beta}^2} \quad (19b)$$

2-1절의 결과와 유사하게 펄스 채이싱 과정에서 수신 빔의 빔 조향 오차($\Delta\beta$)가 존재한다면, 신호 세기의 변화가 발생할 수 있고, 따라서 클러터 감쇄 특성 및 시스템 개선 성능의 제한은 빔 조향 각(β)와 오차의 함수로 주어짐을 식 (19)를 통해 알 수 있다.

2-3 다른 시스템 불안정 요소들

펄스 채이싱 과정에서 수신 빔의 조향각 오차가

수신 타이밍 에러와 신호 세기의 변화를 야기할 수 있으며, 이 때 조향각 오차와 MTI 필터의 클러터 감쇄 및 개선 성능과의 관계를 유도하였다. 이와 별개로 모노스태틱에서와 동일하게 고려되어야 하는 시스템 불안정 요소들로 시간 동기의 흔들림(지터링)에 의한 펄스 폭 변화, 송신 주파수의 편차에 의한 영향, STALO(Stale Local Oscillator) 또는 COHO(Coherent Oscillator)의 주파수 차이에 의한 영향 및 COHO의 위상 변화에 의한 영향 등이 있다.

펄스 폭 변화는 송신기에서 방사되는 송신 펄스 폭이 펄스마다 변화하여 수신 신호의 펄스 폭이 변화함으로써 MTI 필터의 클러터 감쇄 성능이 저하된다. 또한, 바이스태틱 구조에서도 모노스태틱에서와 동일하게 RF 신호의 주파수 상향/하향 변환 과정에서 사용되는 로컬 신호(STALO: Stale Local Oscillator 또는 COHO, Coherent Oscillator)의 주파수 편차에 의해 MTI 필터 과정에서 클러터 감쇄 특성이 영향을 받을 수 있다. 또한, 송신기의 출력 증폭기로 사용되는 진행파관 증폭기, 클라이스트론 및 최근 많이 사용되는 TRM(Transmit Receive Module)의 주파수 특성 변화에 의해 로컬 신호의 주파수 편차에서와 같은 유사한 클러터 감쇄 성능 제한이 일어날 수 있다. 이와 같은 시스템 불안정 요소들은 펄스 체이싱 과정과 관련되어 발생되지 않지만, 송신기와 수신기가 분리되어 원격으로 주파수 동기 및 위상 동기를 유지해야 하는 바이스태틱 레이더 구조에서 MTI 신호 처리과정을 적용한다면, 시스템 설계시 충분히 고려되어야 한다.

주파수 편차의 주요 원인 중 하나는 기준 신호(reference signal)의 장시간 안정도(long-term stability)가 있다. 주파수 신호원의 장시간 안정도는 초 단위, 분 단위 또는 시간 단위 등으로 정의될 수 있으며, 송신 주파수와 관련된다. 예를 들어, X-대역 송신 주파수에 대해 수 Hz의 주파수 안정도를 유지하기 위해서는 상대적으로 매우 안정적인 주파수 합성 기술들이 사용되어야 하며, 대표적인 주파수 합성 기술로는 위상 잠금 루프(PLL: Phase-Locked Loop)가 많이 이용된다.

실제 시스템의 경우, 하드웨어의 차이 및 온도와 같은 운용 환경 등 조건에 따라 송수신기의 주파수

변환 과정에 사용된 로컬 신호 간의 주파수 편차가 존재하게 되며, 모노스태틱 시스템의 펄스-펄스간 송신 주파수 변위에 의한 MTI 개선 인자^[13]와 유사하게 개념을 바이스태틱 수신기의 MTI 필터에 대한 개선 인자의 유도 과정에 적용할 수 있으며, 결과는 다음과 같다.

$$I_f^L = \pi^2 \tau^2 \Delta f_L^2 \quad (20)$$

여기서 τ 는 송신 펄스의 폭, Δf_L 는 송수신 신호의 주파수 변환 과정에 사용된 STALO 또는 COHO 로컬 신호의 주파수 에러 범위를 나타낸다. 위 첨자 'L'은 로컬 신호를 의미한다. 이와는 별도로 송신기의 송신 주파수는 적용된 출력 증폭기의 형태에 따라 영향을 받을 수 있다. 특히, 출력 증폭기는 레이더의 탐지거리를 좌우하는 중요 소자 중 하나로 온도 특성에 따라, 주파수 대역에 따라 송신 주파수의 변화를 겪게 된다. 아래의 식은 송신기의 송신 주파수 변화와 시스템의 개선 인자가 제한되는 관계를 나타낸다^[13].

$$I_f^T = 4\pi^2 T^2 \Delta f^2 \quad (21)$$

여기서 T 는 레이더의 탐지 거리에 의해 결정되는 값으로 100 km인 경우, 6.6×10^{-4} 초의 값을 가지고 Δf 는 송신 주파수의 변화 범위를 나타낸다.

주파수 안정도와 함께 바이스태틱 레이더 구조에서 또 하나 고려되어야 할 설계 변수로 COHO 신호의 위상 편차가 있다. COHO 신호는 중간 주파수 대역의 신호를 신호 처리가 용이한 기저대역으로 주파수 하향 변환시 사용되는 로컬 신호로 펄스 단위의 위상 편차는 곧바로 MTI 필터의 클러터 감쇄 특성에 영향을 주게 된다. 그러나 최근 들어 SDR(Software Defined Radio)에 적용된 디지털 주파수 하향 변환 기술^[12]이 레이더 수신기의 구현에 많이 이용됨에 따라 아날로그 방식의 복조기에서 고려되어야 했던 COHO 신호의 위상 편차에 의한 영향은 상대적으로 줄어들었다고 할 수 있다. 이와 같은 시간 동기의 흔들림, 주파수 편차 및 위상 편차 역시 MTI 신호 처리 기술을 적용한 바이스태틱 레이더 수신기 성능 분석 및 설계 시 고려되어야 한다.

III. MTI 성능 분석

펄스 채이싱을 적용한 바이스태틱 수신기에서 펄스-펄스간 수신 빔의 조향 오차와 MTI 필터의 클러터 감쇄 성능 및 개선 인자와의 관계에 대해 살펴보았으며, 수신 빔 조향 오차에 의한 MTI 필터의 성능 영향을 분석하기 위해 다음과 같은 시스템 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

- 송신 주파수 대역 : L-대역/S-대역/X-대역
- 펄스 반복 주파수 : 펄스 채이싱 범위에 의해 결정
- MTI 필터 : 단일지연선 상쇄기(SDC)
- 클러터 스펙트럼 특성 : 표 1 참조
- 빔 조향 오차 범위 : 0.01도~2도

먼저, 펄스 채이싱 과정에서 수신 빔의 조향 오차가 0.01도에서 2도까지 변화할 때, 바이스태틱 각에 따른 클러터 감쇄 성능과 개선 성능에 대해 살펴본다. 빔 조향 오차에 의해 수신 타이밍 에러가 존재할 때, 오차값이 커질수록 클러터 감쇄 특성이 저하되고 따라서 개선 성능이 저하됨을 그림 4와 5를 통해 알 수 있다. 또한, 동일한 빔 조향 오차에 대해 신호 세기의 변화가 발생하게 되면 그림 6과 7에서 알 수 있듯이 클러터 감쇄 성능이 저하된다.

바이스태틱 각이 0도에 가까워질수록 조향각 오차에 무관하게 클러터 감쇄 특성이 급격히 증가하게 되며, 이는 pseudo-monostatic 영역에서 동작하기 때문에 바이스태틱 레이더에서만 나타나는 기하학적

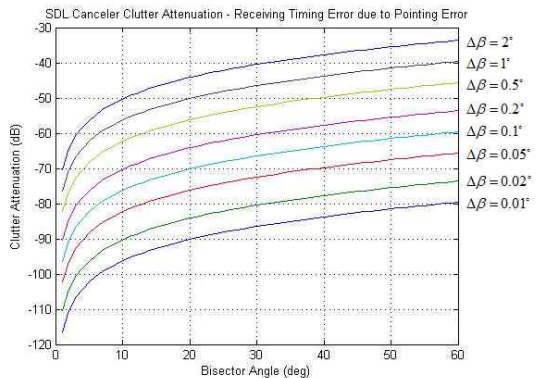


그림 4. 수신 펄스 폭 변화에 의한 클러터 감쇄 성능
Fig. 4. Clutter attenuation for receiving pulse width variation.

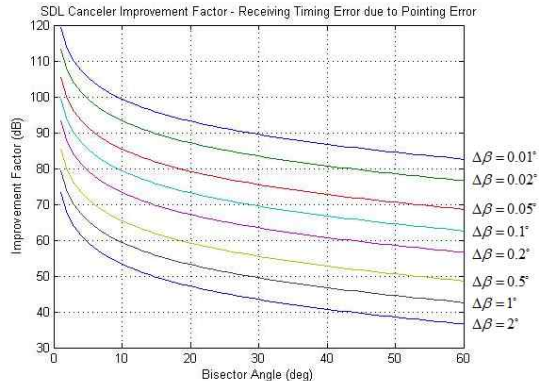


그림 5. 수신 펄스 폭 변화에 의한 개선 인자
Fig. 5. Improvement factor for receiving pulse width variation.

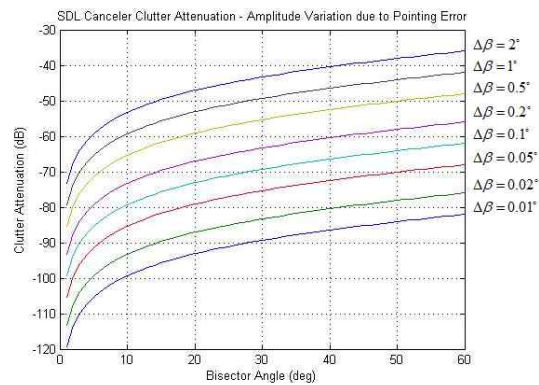


그림 6. 신호 세기 변화에 의한 클러터 감쇄 특성
Fig. 6. Clutter attenuation for signal strength variation.

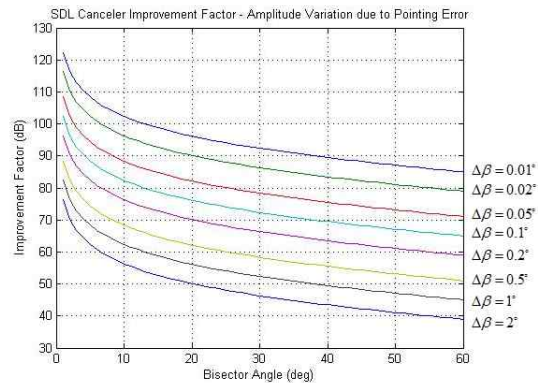


그림 7. 신호 세기 변화에 의한 개선 인자
Fig. 7. Improvement factor for signal strength variation.

효과가 사라지기 때문이다. 반면, pseudo-monostatic 영역에서 벗어나 cosite 영역을 조향하는 경우, 바이

표 1. 클러터 특성과 송신 주파수 대역에 따른 MTI 개선 인자

Table 1. MTI improvement factor according to clutter characteristics and transmit frequency band.

클러터 특성		MTI 개선 인자 (dB)		
형태	σ_v (m/s)	L-대역	S-대역	X-대역
Wood hills	0.040	58.5	49.0	38.5
	0.220	43.7	34.2	23.7
Sea state	0.480	36.9	27.4	17.0
	1.100	29.7	20.2	10.0
Rain cloud	1.900	25.0	15.5	5.7
	4.000	18.6	9.3	1.2

스태틱 각에 의한 영향이 나타나기 시작하며, 클러터 감쇄 성능이 각에 따라, 그리고 조향 빔의 오차 크기에 따라 저하됨을 알 수 있다.

펄스 체이싱 과정에서 빔 조향 오차가 발생하였을 때, 클러터 형태에 따른 주파수 대역별 개선 성능에 대해 생각해 본다. 시스템 불안정 요소들이 없다고 가정했을 때, 클러터만에 의한 MTI 개선 성능은 표 1과 같이 주어진다.

클러터에 의한 개선 성능은 파장이 작을수록 zero-도플러에 대한 클러터의 퍼진 정도를 나타내는 σ_v 가 클수록 저하됨을 알 수 있다. 클러터의 퍼짐은 MTI 필터를 통과한 후, 남겨지는 잔여 전력의 크기를 결정하기 때문이며, 클러터의 퍼짐은 클러터 자체의 고유한 특성이므로 레이더 시스템의 설계시 어떤 형태의 클러터들이 존재할 것인지 결정되면 시스템 마진으로 고려될 수 있다. 표 1과 같이 클러터에 대한 개선 성능이 주어지고 수신 빔 조향 오차가 존재할 때, cosine 영역에서 $\beta=30^\circ$ 에 대한 전체 개선 성능은 표 2와 같이 주어진다. 신호 세기의 변화가 조향 빔 오차에 의해 발생하였다고 가정하고, cosine 영역에서 $\beta=60^\circ$ 에 대한 개선 성능의 제한은 표 3과 같이 주어진다.

클러터 자체의 개선 인자가 작은 경우, rain cloud인 경우를 생각해 보자. Rain cloud인 경우, 단일지연선 구조에서 5.7 dB의 개선 성능을 가진다. 클러터의 퍼짐이 커 MTI 필터를 통과하고 남게 되는 잔여 클러터 전력이 크기 때문에 수신 빔이 펄스 체이싱 동안 조향 오차를 가진다고 하더라도 영향을 주지 못

표 2. $\beta=30^\circ$ 에서 수신 빔 조향 오차에 의한 수신 펄스 폭 변화의 개선 인자(단위: dB)

Table 2. Improvement factor of receiving pulse variation due to receiving beamforming error at $\beta=30^\circ$ (unit: dB).

클러터 특성		L-대역			S-대역			X-대역		
형태	σ_v	0.01°	0.1°	1°	0.01°	0.1°	1°	0.01°	0.1°	1°
Wood hills	0.040	58.5	58.2	49.0	49.0	48.9	46.2	38.5	38.5	38.2
	0.220	43.7	43.7	42.7	34.2	34.2	34.1	23.7	23.7	23.7
Sea state	0.480	36.9	36.9	36.7	27.4	27.4	27.4	17.0	17.0	17.0
	1.100	29.7	29.7	29.7	20.2	20.2	20.2	10.0	10.0	10.0
Rain cloud	1.900	25.0	25.0	25.0	15.5	15.5	15.5	5.7	5.7	5.7
	4.000	18.6	18.6	18.6	9.3	9.3	9.3	1.2	1.2	1.2

표 3. $\beta=60^\circ$ 에서 수신 빔 조향 오차에 의한 신호 세기 변화의 개선 인자(단위: dB)

Table 3. Improvement factor of signal strength variation due to receiving beamforming error at $\beta=60^\circ$ (unit: dB).

클러터 특성		L-대역			S-대역			X-대역		
형태	σ_v	0.01°	0.1°	1°	0.01°	0.1°	1°	0.01°	0.1°	1°
Wood hills	0.040	58.5	57.6	44.8	49.0	48.9	43.6	38.5	38.5	37.6
	0.220	43.7	43.7	41.3	34.2	34.2	33.8	23.7	23.7	23.7
Sea state	0.480	36.9	36.9	36.3	27.4	27.4	27.3	17.0	17.0	17.0
	1.100	29.7	29.7	29.6	20.2	20.2	20.2	10.0	10.0	10.0
Rain cloud	1.900	25.0	25.0	25.0	15.5	15.5	15.5	5.7	5.7	5.7
	4.000	18.6	18.6	18.5	9.3	9.3	9.3	1.2	1.2	1.2

함을 표 2와 3을 통해 알 수 있다. 즉, 전체 시스템 개선 성능은 각각의 개선 성능 중 가장 작은 개선 성능에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 반면, wooded hill이 단일지연선 MTI 필터를 통과한 경우를 생각해 보자. L-대역에서는 58.5 dB, X-대역에서 38.5 dB의 개선 성능을 가지는 wooded hill은 수신 빔의 조향 오차가 증가함에 따라 시스템 불안정 요인들에 의한 개선 성능 제한 현상이 나타나기 시작한다. 클러터 자체의 개선 성능보다는 시스템 불안정 요인들에 의한 개선 성능에 의해 전체 시스템의 성능이 결정됨을 알 수 있다.

따라서, 저속으로 기동하는 표적을 클러터로부터 분리해야 할 때, 클러터와 표적만 존재한다면 MTI 필터를 이용하여 구분이 가능하지만, 추가적인 시스

템 불안정 요소들이 발생한다면 클러터 제거 능력이 제한되고 MTI 필터만을 이용하여 표적을 분리하는데 한계가 있게 된다. 또한, MTI 필터로 단일지연선 보다는 이중지연선 또는 그 이상의 구조를 갖도록 설계함으로써 시스템의 전체 개선 성능을 향상할 수 있지만, 수신 빔 조향 오차에 의한 수신 타이밍 에러와 신호 세기 변화 및 다른 시스템 불안정 요소들의 허용 범위를 엄격히 제한함으로써 시스템에서 요구하는 성능을 보장할 수 있도록 해야 한다.

바이스태틱 레이더에서 추가적으로 고려되어야 할 시스템 불안정 요소들로 시간 동기 오차 및 주파수/위상 동기 오차 등에 의해 발생하는 시간 동기의 흔들림(지터링)에 의한 펄스 폭 변화, 송신 주파수의 편차에 의한 영향, STALO(Stale Local Oscillator) 또는 COHO(Coherent Oscillator)의 주파수 차이에 의한 영향 및 COHO의 위상 변화 등이 있다. 바이스태틱 수신기에 적용된 MTI 필터는 단일지연선이라고 가정하고, 개선 인자는 10 dB에서 80 dB까지의 범위를 가질 때, 시스템 불안정 요인 중 송신 주파수와 STALO, COHO 주파수의 변화는 다른 시스템 불안정 요소들에 비해 상대적인 영향이 크게 나타날 수 있다. 그림 8과 9는 탐지 거리가 100 km일 때, 각 주파수 대역별(L-/S-/X-대역) STALO 주파수와 COHO 주파수의 허용 범위를 개선 인자에 대해 계산한 결과들을 나타낸다.

STALO 주파수의 변화 범위는 40 dB 이상의 개선 인자에 대해 2.4 Hz 이하를 유지해야 한다. L-밴드인 경우, 2.5×10^{-9} 의 안정도를, S-밴드에서는 8×10^{-10} 의

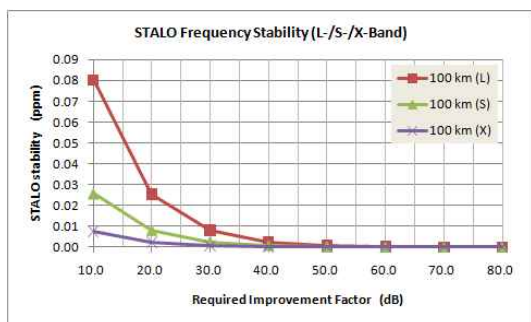


그림 8. MTI 개선 인자에 따른 STALO 주파수 변화 허용 범위
Fig. 8. STALO frequency variation tolerance according to MTI improvement factor.

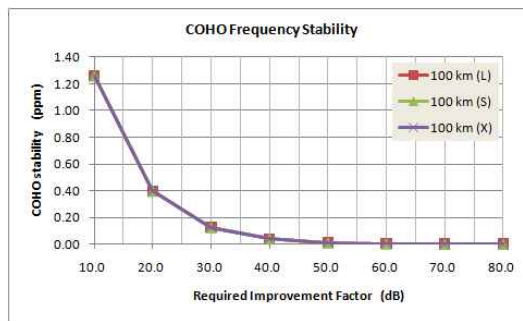


그림 9. MTI 개선 인자에 따른 COHO 주파수 변화 허용 범위
Fig. 9. COHO frequency variation tolerance according to MTI improvement factor.

안정도를, X-밴드에서는 2.4×10^{-10} 의 안정도를 유지함을 의미한다. 동일한 탐지거리에 대해 COHO 주파수의 허용 변화 범위는 40 dB 이상의 개선 인자에 대해 STALO의 허용 범위와 동일하게 2.4 Hz 이하를 유지해야 한다.

송신기와 수신기의 주파수 동기는 위상 잠금 루프를 이용하여 시스템에서 요구하는 안정도 범위를 제공할 수 있다. 위상 잠금 루프의 성능^[4]은 기준 주파수의 특성과 전압 제어 발진기(VCO: Voltage Controlled Oscillator)의 특성 및 루프 필터의 특성에 의해 결정된다. 펄스 체이싱을 이용한 바이스태틱 시스템의 경우, 펄스 체이싱 동안 STALO와 COHO의 주파수가 허용 범위 이하로 유지되어야 할 뿐 아니라 MTI 필터링 동안 안정하게 유지되어야 시스템에서 요구되는 개선 인자를 제공할 수 있다.

IV. 맺음말

본 논문에서는 단일 채널 수신기를 이용하여 탐지 영역을 효율적으로 스캔할 수 있는 펄스 체이싱 기법을 이용하고 클러터로부터 작은 RCS를 갖는 표적을 효과적으로 분리하기 위한 방법으로 코히런트 MTI 신호 처리 방식을 적용한 바이스태틱 레이더 수신기 구조에서 수신 빔 조향 에러에 의해 펄스-펄스 간 발생될 수 있는 시스템 불안정(system instability) 요인들을 식별하고, 시스템 개선 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

바이스태틱 레이더에서 펄스 체이싱 과정은 송신

펄스 단위로 수행되며, 펄스-펄스간 발생될 수 있는 시스템 불안정 요소들로 수신 빔 조향 오차에 의한 수신 타이밍 에러와 신호 세기 변화가 있으며, 각각의 불안정 요소들은 MTI 필터의 클러터 감쇄 및 개선 성능에 직접적인 영향을 미침을 확인하였고 관계식을 유도하였다. 또한, 출력 증폭기에 의한 송신 주파수 변화 및 송신기와 수신기의 STALO/COHO 주파수 차이에 의한 불안정 요소들 역시 모노스테틱 시스템에서와 유사하게 시스템 성능을 제한하는 요소들이다.

수신 빔 조향 오차가 0.5도 이하로 유지되면 50 dB 이상의 개선 성능을 제공할 수 있으며, 클러터에 의한 개선 성능은 가장 열화된 시스템 불안정 요소들에 의해 결정되고, 이 요소가 전체 시스템의 개선 성능이 제한됨을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 또한, STALO와 COHO 로컬 신호의 주파수 안정도 범위에 대해서도 분석하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Damini, "X-band wideband experimental airborne radar for SAR, GMTI and maritime surveillance", *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, vol. 150, no. 4, pp. 305-312, Aug. 2003.
- [2] P. K. Lee, D. C. Lorti, "Space-based bistatic radar: Opportunity for future tactical air surveillance", *IEEE Int. Radar Conf.*, Washington D.C., pp. 322-329, 1985.
- [3] Terje Johnsen, "Time and frequency synchronization in multistatic radar. Consequences to usage of GPS disciplined references with and without GPS signals", *Radar Conference, Proceedings of the IEEE*, 22-25, pp. 141-147, Apr. 2002.
- [4] C. K. Bovey, C. P. Home, "Synchronization aspects for bistatic radars", *IEE International Conference RADAR-87*, Oct. 1987.
- [5] Nicholas J. Willis, *Bistatic Radar*, Scitech Publishing Inc., 2nd Ed., 2005.
- [6] M. C. Jackson, "The geometry of bistatic radar systems", *IEE Proc.*, 133(7), Pt. F, pp. 604-612, Dec. 1986.
- [7] F. E. Nathanson, *Radar Design Principles, Chapter 9. Moving Target Indicators(MTI)*, McGraw-Hill, 2nd Ed., 1991.
- [8] M. I. Skolnik, *Radar Handbook, Chapter 2. MTI Radar*, McGraw-Hill, 3rd Ed., 2008.
- [9] D. K. Barton, *Radar System Analysis, Chapter 7. MTI Techniques in Search Radar*, Artech House, 1989.
- [10] L. E. Brennan, "Angular accuracy of a phased array radar", *IRE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 9, no. 3, pp. 268-275, May 1961.
- [11] Keith R. Carver, et al., "Beam-pointing errors of planar-phased arrays", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 21, no. 2, pp. 199-202, Mar. 1973.
- [12] <http://www.analog.com>: Digital Down Conversion.
- [13] Eyung W. Kang, *Radar System Analysis, Design, and Simulation, Chapter 11. Moving Target Indicator*, Artech House, 2008.
- [14] V. Manassewitsch, *Frequency Synthesizers Theory and Design*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, 1987.

양진모



1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

1991년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)

1991년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

2006년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 초고주파 시스템, 위상 배열 레이더 시스템

김환우



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1979년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1988년 6월: University of Utah 전자공학과 (공학박사)

1980년~현재: 충남대학교 전자전파정보통신공학부 정교수

[주 관심분야] 통신 시스템 및 신호 처리 등

이민준



1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1988년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더 시스템 등