

바이스태틱 레이더의 시스템 불안정 요소들에 대한 분석

Analysis of System Instability Factors in a Bistatic Radar

양진모* 이민준* 윤재룡* 김환우**
 Jin Mo Yang Min Joon Lee Jae Ryong Yun Whan Woo Kim

Abstract

In this paper, we have identified the system instability factors in a bistatic radar system using pulse chasing and considered their effects on the bistatic receiver's MTI(Moving Target Indication) improvement performance. The pulse chasing is a method to efficiently scan a restricted search area within the limited transmitter power and time in a bistatic radar and to track a series of transmitted pulses using the receiver beam which has ideally matched to the pulse propagation rate. In this paper, we have discussed the interrelationship between the pulse chasing and time and frequency/phase synchronization and described the effects of the identified system instability factors on two kinds of MTI filter configuration, single delay-line and double delay-line, in the bistatic radar. And also, we have confirmed that the overall system improvement is restricted by a lower improvement factor among identified them, and discussed the allowable tolerance of the time and frequency/phase synchronization in the bistatic system.

Keywords : Bistatic Radar(바이스태틱 레이더), Moving Target Indication(기동 표적 지시), Pulse Chasing(펄스 체이싱), Synchronization(동기), Improvement Factor(개선 인자)

1. 서론

바이스태틱(bistatic) 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) 및 위성에 탑재되어 지상의 영상정보 획득 등에 활용되고 있다.

바이스태틱 레이더는 모노스태틱(monostatic) 구조에 비해 송/수신기 분리에 의한 고유한 특징들을 가진다. 수신기의 설치위치가 자유롭기 때문에 표적의 aspect 각도가 다양할 수 있으며 작은 RCS를 갖는 표적의 가능성이 향상될 수 있고 바이스태틱 레이더의 수신기는 반사 신호의 수신만을 목적으로 동작하는 수동 시스템 이므로 전자전 상황에 유리하다. 또한, 단일 송수신 안테나를 이용하는 모노스태틱 레이더에서 송수신 신호의 분리를 위해 사용되어야 하는 송수신용 초고주파 스위치나 듀플렉서가 필요하지 않는다. 따라서 송수신 경로의 초단에서 야기되는 RF신호의 손실이 감소하며, 모노스태틱 레이더에서 필요로 하는 송신 전력에 비해 상대적으로 작은 송신전력이 요구된다.

† 2010년 9월 24일 접수~2010년 12월 10일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University)

책임저자 : 양진모(jmy1965@dreamwiz.com)

바이스태틱 구조만이 갖는 고유한 특징들을 효과적으로 이용할 수 있는 반면, 주어진 시간 내에 송신빔과 수신빔이 교차하는 공동영역(‘탐지영역’이라함)을 제한된 레이더 에너지로 효율적으로 사용하고자 하는 방법에 대한 연구의 필요성이 대두되었다. 탐지영역을 한정된 에너지 자원을 이용하여 효과적으로 스캔하기 위한 방법들로 스텝 스캐닝, floodlight beams, 다중빔 수신기 및 시간-분할 빔, 펄스 체이싱(pulse chasing) 등 다양한 방법들이 제안되었다^[1,2]. 제안된 스캔 방식 중 펄스 체이싱 기법은 고이득 수신기 안테나를 이용하여 송신펄스를 수신빔이 추적하는 방식으로 다중빔 수신기의 복잡도와 비용을 감소하면서 동시에 탐지영역을 효과적으로 스캔할 수 있는 방법 중 하나이다.

탐지영역 내에 작은 RCS를 갖는 표적을 효과적으로 탐지하고 클러터와 같은 간섭으로부터 분리해 내기 위해서는 모노스태틱에서 사용되는 표적 분리 신호처리 기술들을 적용할 수 있으며, 대표적인 신호처리 기술로는 MTI(Moving Target Indication)과 도플러 프로세싱 등이 있다^[1].

본 논문에서는 단일채널 수신기를 이용하여 탐지영역을 효율적으로 스캔할 수 있는 펄스 체이싱 기법을 이용하고 클러터로부터 작은 RCS를 갖는 표적을 효과적으로 분리하기 위한 방법으로 MTI 신호처리 방식을 적용한 바이스태틱 레이더 수신기 구조에서 펄스-펄스간 발생될 수 있는 시스템 불안정(system instability) 요인들에 대해 식별하고 시스템 개선인자(IF : Improvement Factor)의 관점에서 그 영향을 분석하였다. II장에서는 펄스 체이싱의 원리와 시간동기, 주파수/위상 동기의 관점에서 살펴보았으며, III장에서는 펄스 체이싱을 적용한 수신기 구조에서 MTI 성능에 직접적인 영향을 주는 시스템 불안정 요소들의 의미와 각각의 에러들이 MTI 성능에 미치는 영향에 대해 논하였다. IV장에서 시스템 요구조건에 따라 MTI 성능에 영향을 주는 요소들을 분석하였고 V장에서는 결론을 맺었다.

2. 시스템 불안정 요소와 개선성능 제한

가. 바이스태틱 시스템

바이스태틱 레이더 시스템에서 한정된 공간을 효율적으로 탐색하기 위한 방법 중 하나로 펄스 체이싱을 이용한다. 펄스 체이싱은 송신펄스가 임의의 송신빔

지향각 방향으로 공간을 전파되어 진행할 때 수신기의 수신빔 지향각이 시간에 따라 변하면서 송신펄스를 추적한다는 의미에서 펄스 체이싱이라 한다^[2,3].

Fig. 1은 펄스 체이싱을 적용한 바이스태틱 레이더 시스템의 구성을 나타낸다. 송신기에서 송신된 송신펄스가 전파하여 진행되는 과정에서 수신기는 송신기로부터 전송받은 펄스관련 정보와 송신빔의 조향각 정보 등을 이용하여 송신펄스의 위치를 포인팅하고 펄스의 전파율과 동일한 변화율을 갖는 수신빔의 변화율을 유지함으로써 표적에 대한 반사 신호를 수신한다^[3]. 수신기의 수신빔 변화율과 송신펄스의 펄스 전파율이 일정하게 유지되기 위해서는 송신기와 수신기의 시간, 주파수 및 위상동기가 유지되어야 한다.

펄스 체이싱 구조에서 펄스형태의 레이더 파형은 시간에 동기되어 펄스반복주기(PRI : Pulse Repetition Interval), 펄스폭(pulse width) 및 파형 등을 생성하게 된다. 고정된 펄스반복주기를 갖는 경우, 송신기와 수신기간 펄스반복주기의 불일치가 발생하게 되면 클러터 감쇄 특성의 저하, 펄스압축 이득의 감소, 시간부엽의 증가, 거리 분해능의 저하 및 거리 측정 에러의 증가 등 시스템 성능에 영향을 미치게 된다^[4].

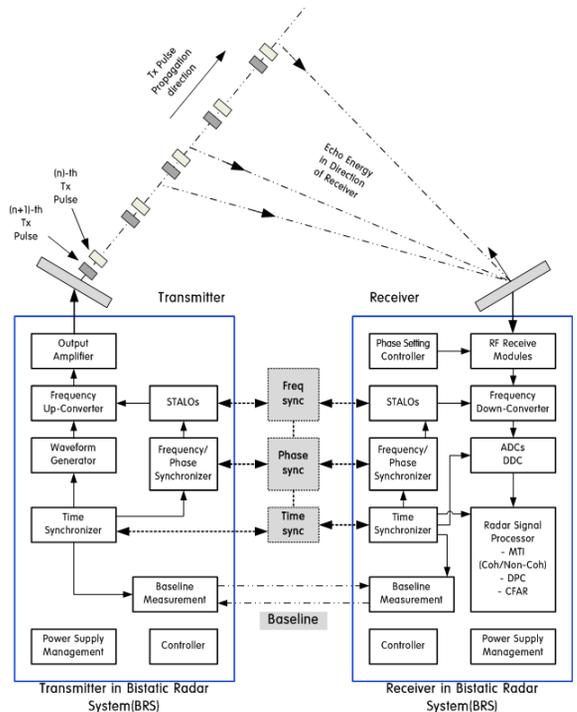


Fig. 1. 바이스태틱 레이더 구조

바이스태틱 시스템에서 또 하나 고려되어야 할 동기 기준으로 주파수 및 위상 동기(frequency/phase synchronization)가 있다. 주파수 동기는 송신기에서 사용된 로컬신호(STALO)의 주파수와 수신기 사용되는 로컬신호의 주파수가 일치하여야 함을 의미한다. 주파수 상향/하향 변환과정에 적용된 로컬신호의 차이는 MTI 클러터 감쇄 특성을 악화시킬 수 있다. 주파수 동기와 함께 위상동기는 코히런트 시스템에서 반드시 고려되어야 한다. 위상동기는 대부분의 레이더 시스템이 표적의 속도 값을 추출하기 위해 위상정보를 사용하기 때문에 송신기와 수신기간 위상의 코히런스(coherency)는 중요한 설계 변수가 된다. 도플러정보는 표적의 속도정보로부터 추출되고 속도정보는 송신펄스의 위상을 기준으로 표적으로부터 반사되어 수신된 신호의 위상 차이로부터 획득된다. 따라서 송신기와 수신기의 주파수 상향/하향 변환과정에서 사용된 코히런트 발진기(COHO : Coherent Oscillator) 위상의 불일치는 바로 도플러 정보의 오차로 나타나게 된다. 또한, 위상 동기의 불일치는 MTI필터의 클러터 감쇄 능력을 제한하는 요인으로 작용한다.

나. 시스템 불안정 요소들과 MTI 개선 성능

펄스 체이싱을 적용한 바이스태틱 레이더에서의 MTI 필터와 펄스-펄스 및 주파수 변화 등에 의해 발생될 수 있는 시스템 불안정 요소들을 식별하고 성능지수로 개선인자를 정의하여 각각의 요소들이 제공할 수 있는 개선의 한계에 대해 논의한다.

MTI 필터의 목적은 구름, 숲, 언덕 또는 섬과 같은 고정된 물체들로부터 반사된 신호들을 억제하고 항공기와 같은 기동 표적을 탐지하기 위해 사용되는 일반적인 레이더 신호처리 기법 중 하나이다. Fig. 2의 (a)는 단일 지연선 상쇄기(single delay-line canceler)와 이중 지연선 상쇄기(double delay-line canceler)를 이용한 MTI 필터 구조를 나타내며, (b)는 각각의 필터에 대한 출력 응답 특성을 나타낸다. Fig. 2의 (b)에서 알 수 있듯이, 이중 지연선을 사용한 경우, zero 도플러 주파수 근처의 클러터 제거 능력이 단일지연선에 비해 좋으며, 클러터 퍼짐이 적은 클러터에 대한 감쇄 특성이 우수함을 알 수 있다.

클러터의 형태에 따라 클러터 스펙트럼의 퍼짐 정도가 다르게 나타나며, MTI 필터 구조에 따라 클러터 감쇄 성능과 개선인자의 특성이 결정됨을 알 수 있다. Table 1은 다양한 클러터 형태에서 MTI 필터에 대한

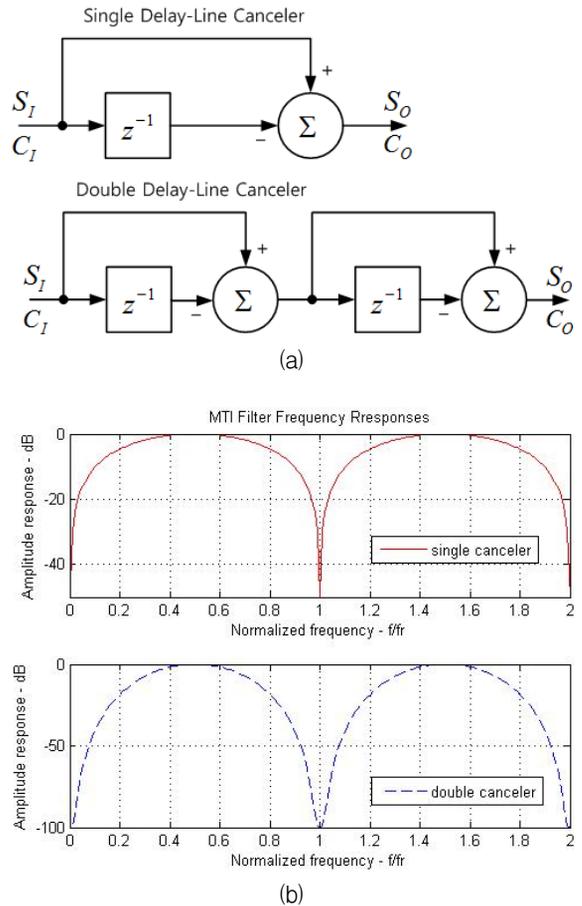


Fig. 2. MTI 필터 - (a) 단일/이중지연선, (b) 응답 특성

Table 1. 다양한 클러터 조건에 대한 MTI 필터의 성능 (X-대역, fPRF=1kHz)^[6]

클러터 형태	wind 속도	σ_v (m/s)	$\frac{\sigma_v}{\lambda f_{PRF}}$	단일지연선		이중지연선	
				CA ₁ (dB)	I _{clu} ¹ (dB)	CA ₂ (dB)	I _{clu} ² (dB)
Wooded hills	10	0.04	0.00133	35.52	38.53	66.26	74.05
	20	0.22	0.00733	20.72	23.73	36.68	44.46
Sea State	8-20	0.48	0.01600	13.98	16.99	23.24	31.02
		1.1	0.03667	6.96	9.97	9.44	17.22
Rain Cloud	-	1.9	0.06333	2.65	5.66	1.34	9.12
		4.0	0.13333	-1.79	1.22	-6.07	1.72

클러터 감쇄 및 개선인자에 대한 성능을 나타내며, 시스템 변수인 송신주파수는 X-대역, 펄스 반복 주파수 (PRF : Pulse Repetition Frequency)는 1kHz로 가정하였고 MTI 필터로 입력되는 클러터의 스펙트럼은 가우시안이고 zero 평균속도와 σ_C 의 스펙트럼 표준 편차 (standard deviation)을 갖는다고 가정하였다.

동일한 클러터 스펙트럼 퍼짐에 대해 이중 지연 선을 적용하게 되면 클러터 감쇄 특성이 향상되며 개선인자 또한 좋아짐을 알 수 있다. 이는 Fig. 2의 (b)에서 알 수 있듯이 이중지연선인 경우, 클러터 제거특성이 단일지연선에 비해 우수함으로써 얻게 되는 당연한 결과이다. 펄스 채이싱을 적용한 바이스태틱 레이더 수신기에서 MTI 필터를 이용하여 클러터를 제거하기 위해서는 클러터 스펙트럼의 퍼짐 정도에 따라 구조가 결정될 수 있으며, RCS가 작은 항공기 표적을 지상에서 탐지하기 위해서는 rain 클러터 조건에서 이중지연선 구조를 갖는 MTI 필터가 유리함을 알 수 있다.

본 절에서는 펄스 채이싱이 적용된 바이스태틱 시스템에서 야기될 수 있는 시스템 불안정 요소들의 원인과 MTI 성능에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

1) 펄스-펄스간 타이밍 에러

(n)번째 송신펄스와 (n+1)번째 송신펄스를 수신빔이 채이싱할 때, 수신 빔의 포인팅 에러^[7,8]에 의해 동일한 지점을 조향하지 못하거나 송신기와 수신기의 시간동기에 오차가 발생하여 송신펄스의 주기와 수신기에서 처리하는 펄스의 주기에 에러^[9]가 발생하는 경우이다. Fig. 3은 펄스 채이싱 동안 수신빔 포인팅 오차 또는 시간 동기 에러에 의해 펄스 주기오차가 (n)번째 송신펄스와 (n+1)번째 송신펄스에 발생하였을 때 MTI필터에 입력되는 수신신호가 $\Delta\tau$ 만큼의 타이밍 에러를 가짐을 나타낸다. 펄스-펄스간 타이밍 에러에 의한 MTI 필터의 개선인자는 단일지연선 구조에 대해 다음과 같이 주어진다.

$$I_{t1} = 2 \left(\frac{\tau}{\sigma_\tau} \right)^2 \tag{1}$$

여기서, σ_τ^2 는 Fig. 3의 타이밍 에러($\Delta\tau$)의 분산값을 나타내며, '2'는 단일지연선의 평균 신호이득을 나타낸다.

클러터 스펙트럼의 퍼짐이 큰 경우, 즉 큰 속도 표

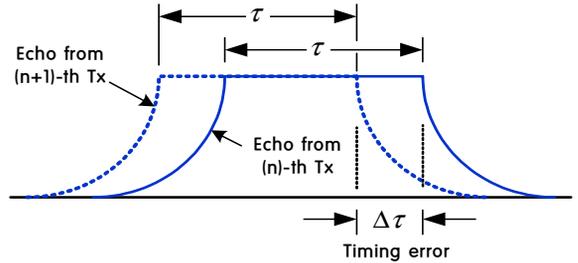


Fig. 3. 펄스-펄스간 타이밍 에러

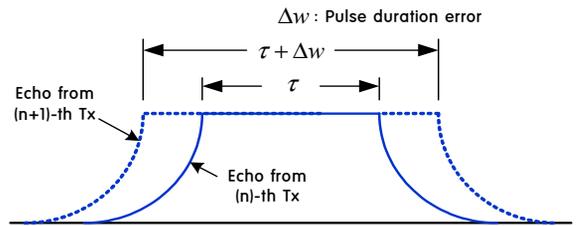


Fig. 4. 펄스폭 변화에 의한 에러

준편차를 가지는 클러터의 경우 이중지연선 구조를 선택함으로써 많은 클러터 성분을 제거할 수 있으며, 이때 개선 인자는 다음과 같이 주어진다^[10].

$$I_{t2} = 2 \left(\frac{\tau}{\sigma_\tau} \right)^2 \tag{2}$$

개선인자 관점에서, 이중지연선과 단일지연선의 성능이 동일함을 알 수 있다. 그러나 클러터 감쇄량은 이중지연선이 단일지연선에 비해 약 7.8dB(= 10 log₁₀(6)) 정도 우수하다.

2) 펄스폭 변화에 의한 에러

송신 펄스폭은 송신기와 수신기의 시간동기 깨짐에 의해 발생할 수 있고 펄스채이싱 과정에서 수신빔의 포인팅 에러가 송신펄스 단위로 발생하여 바이스태틱 거리분해능 오차가 발생되었을 때 MTI 필터에 입력된 펄스폭이 (n)번째와 (n+1)번째 송신펄스에 대해 다르게 나타나는 경우, Fig. 4에서와 같이 펄스폭 변화, $\sigma_w^2 (= \overline{\Delta w^2})$,에 의해 영향을 받을 수 있고 단일지연선과 이중지연선 구조의 클러터 감쇄 특성과 개선인자는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{w1} = I_{w2} = \left(\frac{\tau}{\sigma_w} \right)^2 \tag{3}$$

개선인자 관점에서, 이중지연선과 단일지연선의 성능이 동일하게 주어진다.

3) 코히런트 발진기 위상 변화에 의한 에러

바이스태틱의 경우, 주파수 및 위상동기 과정을 통해 송신기와 수신기가 동기를 유지한다 하더라도 송신시 사용된 로컬 신호의 위상과 수신기에 사용된 COHO 로컬 신호의 위상 차이가 연속된 송신 펄스에 대한 수신시 존재할 수 있으며, 모노스테틱에서와 유사하게 MTI 필터의 성능에 영향을 주게 된다. Fig. 5는 펄스 체이싱을 적용한 바이스태틱 구조에서 연속된 송신펄스에 대해 수신기 COHO 발진기의 위상 변화에 대한 영향을 나타낸다. 단일지연선 구조와 이중지연선 구조에 대해 COHO 발진기 위상 변화에 의한 개선인자는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{c1} = \frac{2}{\Delta\phi^2} \tag{4-a}$$

$$I_{c2} = \frac{6}{\Delta\phi^4} \tag{4-b}$$

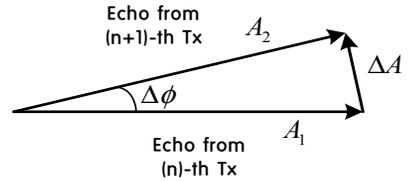
여기서 $\Delta\phi$ 는 Fig. 5에서 보듯이 연속된 수신 신호 A_1 과 A_2 의 위상차를 나타낸다.

4) 펄스-펄스 신호의 진폭 변화에 의한 에러

MTI 필터의 클러터 감쇄 성능을 저하할 수 있는 또 다른 요인으로 펄스-펄스간 송신신호 전력의 변화 또는 수신기 이득의 변화가 있다. 펄스 체이싱 구조에서는 이와 같은 요인이외에 수신빔의 포인팅 에러에 의해 연속된 송신펄스의 동일한 위치를 포인팅하지 못함으로써 펄스-펄스간 신호 전력의 변화에 의한 영향과 매우 유사한 형태로 MTI 필터의 성능에 영향을 미칠 수 있다.

펄스-펄스간 송신신호의 진폭이 일정하고 바이스태틱 수신기의 이득의 변화가 없다고 가정했을 때, 펄스-펄스간 수신빔의 포인팅 에러에 의한 수신 전력의 변화는 MTI 성능 관점에서 단일지연선과 이중지연선 구조에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{a1} = I_{a2} = \left(\frac{A}{\sigma_A} \right)^2 \tag{5}$$



$\Delta\phi$: COHO Phase Variation

Fig. 5. COHO 위상 변화에 의한 에러

여기서 A 는 (n)번째 송신펄스를 추적 했을 때 수신 신호의 진폭이고 σ_A^2 는 (n+1)번째 송신펄스에 대한 수신신호의 상대적 차이(ΔA)에 대한 분산값을 나타내며, 개선인자 관점에서, 이중지연선과 단일지연선의 성능이 동일하게 주어진다.

5) 송신 주파수 변화와 STALO/COHO 주파수 차이에 의한 에러

바이스태틱 구조에서도 모노스테틱에서와 동일하게 송신신호의 주파수 변환과정과 수신신호의 주파수 변환과정에서 동일한 로컬신호(STALO/COHO)를 사용하여야 하며 따라서 송신기에 사용된 주파수와 동일한 주파수를 수신기에서 생성하기 위해서는 주파수 및 위상 동기회로가 사용되어야 한다^[12,13].

실제 시스템의 경우, 하드웨어의 차이 및 온도와 같은 운용환경 등 조건에 따라 송수신기의 주파수 변환 과정에 사용된 로컬신호간의 주파수 편차가 존재하게 되며, 모노스테틱 시스템의 펄스-펄스간 송신 주파수 변위에 의한 MTI 개선인자와 유사하게 개념을 바이스태틱 수신기의 MTI 필터에 대한 개선인자의 유도 과정에 적용할 수 있으며, 결과는 다음과 같다.

$$I_f^L = \pi^2 \tau^2 \Delta f_L^2 \tag{6}$$

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 로컬신호를 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 온도특성에 따라, 주파수 대역에 따라 송신 주파수의 변화를 겪게 된다. 아래의 식은 송신기의 송신 주파수 변화와 시스템의 개선인자가 제한되는 관계를 나타낸다.

$$I_f^T = 4\pi^2 T^2 \Delta f^2 \quad (7)$$

여기서 T 는 레이더의 탐지거리에 의해 결정되는 량으로 100km인 경우, 6.6×10^{-4} 초의 값을 가지고 Δf 는 송신 주파수의 변화범위를 나타낸다.

3. 성능분석

펄스 채이싱을 적용한 바이스태틱 수신기에서 시간 동기 예러 및 주파수/위상 동기 예러와 시스템의 불안정 요인들 간의 관계에 대해 살펴보았으며, 각각의 요인들은 서로 독립적으로 작용하여 MTI 필터의 성능을 저하시킬 수 있다. 앞서 언급된 시스템 불안정 요인들 이외에 안테나 회전에 의한 영향과 플랫폼의 기동에 의한 영향 역시 수신되는 클러터 스펙트럼의 퍼짐에 영향을 준다^[1,5]. 본 논문에서는 지상에 고정된 수신기에 펄스 채이싱을 수행하기 위해 위상배열 안테나를 적용한 바이스태틱 구조만을 고려하기 때문에 이 두 요소들에 대한 영향은 무시할 수 있다. 본 장에서는 동기 예러들의 허용 범위에 의해 펄스 채이싱을 적용한 바이스태틱 수신기의 MTI 성능이 얼마나 영향을 받을 수 있는지 예를 들어 분석하였고 시스템 요구 조건으로 클러터 감쇄 성능이 주어졌을 때 각각의 시스템 불안정 요인들의 클러터 감쇄 값으로부터 시간동기 및 주파수/위상의 허용 범위를 추출하고 시스템에 미치는 영향을 분석하였다.

가. 시스템 불안정 요소들에 의한 MTI 성능영향

여러 가지 시스템 불안정에 의한 MTI 성능 영향을 분석하기 위해 바이스태틱 레이더의 시스템 변수들이 다음과 같다고 가정한다.

- 송신 주파수 대역 : L-대역/S-대역/X-대역
- 펄스반복주파수 : 펄스채이싱 범위에 의해 결정
- 송신 펄스폭 : 펄스반복주파수의 5~10%
- MTI 필터 : Fig. 1 (a)
- 시스템 불안정 요인들
 - 펄스-펄스 타이밍 예러(σ_T) < 20ns
 - 펄스폭 변화 예러(σ_δ) < 15ns
 - 코히런트 발진기 위상변화 예러($\Delta\phi$) < 10mrad
 - 신호의 진폭변화 예러(σ_A/A) < 0.005
 - 송수신 주파수의 차이에 의한 예러(σ_f) < 1000Hz

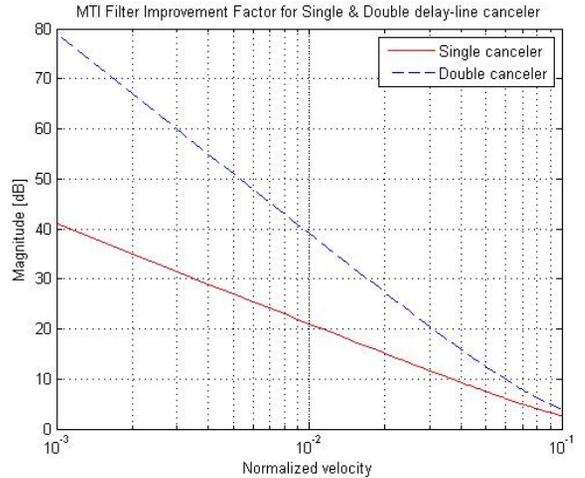


Fig. 6. MTI 필터의 개선인자 - 단일지연선(실선)과 이중지연선(점선)

- 클러터 스펙트럼 특성 : zero mean, σ_C 의 표준편차를 갖는 가우시안이며, Table 1의 클러터 형태에 따라 클러터 속도의 표준편차(σ_v)를 가짐.

위의 시스템 변수 중 바이스태틱 레이더의 펄스 반복주파수는 모노스태틱에서와 같이 단순히 거리 모호성 없이 측정하고자 하는 최대 거리에 의해 결정되지 않고 송신기와 수신기의 설치 위치에 의존하여 결정된다^[2]. 본 논문에서는 cosite 영역내에서 펄스 채이싱을 이용하여 표적을 탐지하기 위해 요구되는 펄스반복주파수 범위로 제한한다. MTI 필터에 입력되는 클러터의 형태와 속도의 표준편차에 따라, Fig. 6의 정규화된 속도($\sigma_v/\lambda f_{PRF}$)에 대한 개선인자(단일 또는 이중지연선)의 성능으로부터 Table 2와 같이 클러터에 의한 개선인자를 구할 수 있다. 이 값들은 레이더로 입력되는 클러터 자체의 고유한 개선인자이며, ‘2장 나’절의 시스템 불안정 요소들이 개선인자에 미치는 영향들은 고려되지 않은 값이다.

송신대역과 클러터의 속도 표준편차 및 펄스반복주파수를 이용하여 계산된 Table 2의 결과로부터 클러터 자체의 개선인자들을 선택하고 시스템 불안정 요소들에 의한 개선인자들(‘3장 나’절)을 이용하여 바이스태틱 시스템의 전체 시스템 개선인자를 추출한다.

Table 3과 4는 송신주파수 대역이 X-대역, 펄스반복주파수가 1kHz일 때 단일지연선과 이중지연선 MTI 필터의 개선인자를 나타낸다. 개선인자를 제한하는 가장

Table 2. 클러터 형태와 송신 주파수 대역에 따른 MTI 필터의 개선인자(단일/이중지연선) (단위 : dB)

클러터 특성 형태	σ_v	L-대역		S-대역		X-대역	
		I_{du}^1	I_{du}^2	I_{du}^1	I_{du}^2	I_{du}^1	I_{du}^2
Wood Hills	0.040	58.5	114.0	49.0	95.0	38.5	74.0
	0.220	43.7	84.4	34.2	65.3	23.7	44.5
Sea State	0.480	36.9	70.9	27.4	51.8	17.0	31.0
	1.100	29.7	56.5	20.2	37.5	10.0	17.2
Rain Cloud	1.900	25.0	47.0	15.5	28.1	5.66	9.1
	4.000	18.6	34.1	9.3	15.8	1.2	1.7

Table 3. 클러터 형태에 따른 시스템 불안정 요소들의 개선성능 제한 - 단일지연선 MTI 필터(X-대역, fPRF=1kHz)

클러터 형태	Wooded Hills	Sea State	Rain cloud	비 고
σ_v	0.04	0.48	1.9	(m/s)
I_{du}^1	38.53	16.99	5.66	Table 2
I_{l1}	33.98	33.98	33.98	
I_{w1}	32.22	32.22	32.22	
I_{c1}	43.01	43.01	43.01	
I_{a1}	46.02	46.02	46.02	
I_f^T	22.10	22.10	22.10	
I_f^L	41.54	41.54	41.54	
I_T	21.28	15.63	5.55	

큰 요인은 클러터 자체의 개선인자를 포함하여 가장 작은 개선 인자 값을 가지는 요소임을 알 수 있다. 주어진 시스템 불안정 요소들 중 가장 작은 개선인자 성능을 가진 요소가 전체 시스템의 개선을 제한함을 알 수 있다.

클러터 자체의 개선인자가 작은 경우, rain cloud인 경우를 생각해 보자. Rain cloud인 경우, 단일지연선 구조에서 5.66dB, 이중지연선에서 9.1dB의 개선인자를 가지지만, 시스템 불안정 요소들에 의해 각각 5.55dB, 8.87dB의 개선만을 제공하도록 제한된다. 반면, wooded hill의 경우 단일지연선은 38.5dB의 개선인자를 이중지

Table 4. 클러터 형태에 따른 시스템 불안정 요소들의 개선성능제한 - 이중지연선 MTI 필터(X-대역, fPRF=1kHz)

클러터 형태	Wooded Hills	Sea State	Rain cloud	비 고
σ_v	0.04	0.48	1.9	(m/s)
I_{du}^2	74.0	31.0	9.1	Table 2
I_{l2}	33.98	33.98	33.98	
I_{w2}	32.22	32.22	32.22	
I_{c2}	87.78	87.78	87.78	
I_{a2}	46.02	46.02	46.02	
I_f^T	22.10	22.10	22.10	
I_f^L	41.54	41.54	41.54	
I_T	21.39	20.94	8.87	

연선은 74dB의 개선인자를 제공할 수 있지만, 시스템 불안정 요인들에 의해 약 21dB의 개선인자만을 제공한다. 즉, 클러터 자체의 개선인자 보다는 시스템 불안정 요인들에 의해 결정됨을 알 수 있다. 즉, 시스템에서 저속으로 기동하는 표적을 클러터로부터 분리해야 할 때, 클러터만 존재한다면 MTI 필터만을 이용하여 구분이 가능하지만, 추가적인 시스템 불안정 요소들에 의해 클러터의 제거가 제한되고 따라서 MTI 필터만을 이용하여 표적을 분리하는 데 한계가 있게 된다. 시스템 설계시 MTI 필터로는 이중지연선 또는 그 이상의 구조를 갖도록 설계하는 것도 중요하나 송신 주파수의 주파수 변화를 최대한 제한하도록 주파수 생성 방식을 선택하는 것이 중요하다. 또한 클러터의 형태에 따라 시스템 불안정 요소들의 허용범위를 결정해야 한다.

나. 개선인자에 따른 시스템 불안정 요소의 허용 범위

앞 절에서는 시간동기, 주파수/위상 동기 및 신호크기의 변화에 대해 시스템 불안정 요인들로 인해 단일지연선과 이중지연선 구조를 갖는 바이스태틱 MTI 수신기의 성능 제한에 대해 논의하였다. 만약 클러터 제거 능력을 나타내는 시스템 변수인 개선인자가 설계 변수로 주어진다면 시스템 불안정 요인들의 허용범위를 결정할 수 있다. 즉, 시스템 불안정 요인들로부터 유도된 각각의 허용 범위들은 어떤 형태의 시간동기

방식이 가능한지 또는 주파수 및 위상 동기에 있어 적절한 방식이 무엇인지를 결정하는 중요한 설계 시작 변수가 된다. 앞 절에서 주어진 바이스태틱 레이더 시스템의 변수들을 이용하여 시스템에서 요구되는 개선인자에 따라 시간 및 주파수/위상 동기의 허용범위에 대해 고찰하였다.

바이스태틱 수신기에 적용된 MTI 필터는 단일지연선이라고 가정하고 개선인자는 10dB에서 80dB까지의 범위를 가질 때, 시스템 불안정 요인 중 펄스-펄스간 타이밍 에러는 40dB이상의 개선인자를 얻기 위해 펄스폭의 0.7%이하를 가져야 한다. 만약 25us의 펄스폭을 갖는 송신펄스가 사용될 때 177ns이하의 타이밍 에러를 가져야 한다. 펄스-펄스 타이밍 에러의 허용범위와 함께 펄스폭의 변화는 40dB이하의 개선인자에 대해 1%이하의 펄스폭 변화를 유지해야 한다. 역시 25us의 펄스폭에 대해 250ns의 펄스폭 변화를 유지하기 위해서 선택할 수 있는 시간동기 방식은 디지털 직접 합성방식을 이용하여 구현할 수 있다.

송신 주파수와 STALO, COHO 주파수의 변화는 다른 시스템 불안정 요소들에 비해 상대적인 영향이 크게 나타날 수 있다. Fig. 7은 탐지거리가 100km일 때, 각 주파수 대역별(L-/S-/X-대역) STALO 주파수의 허용범위를 개선인자에 대해 계산한 결과들을 나타낸다.

STALO 주파수의 변화 범위는 40dB이상의 개선인자에 대해 2.4Hz 이하를 유지해야 한다. L-밴드인 경우, 2.5×10^{-9} 의 안정도를, S-밴드에서는 8×10^{-10} 의 안정도를, X-밴드에서는 2.4×10^{-10} 의 안정도를 유지함을 의미한다. 동일한 탐지거리에 대해 COHO 주파수의 허용 변화 범위는 40dB이상의 개선인자에 대해 STALO의 허용범위와 동일하게 2.4Hz 이하를 유지해야 한다.

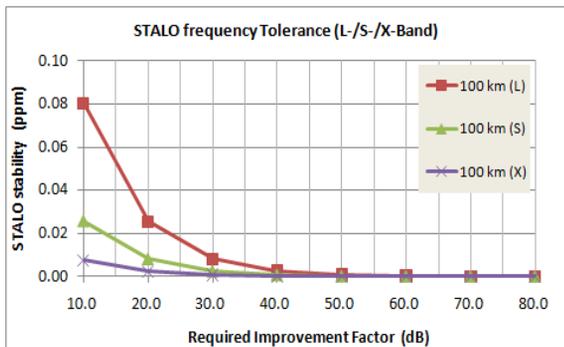


Fig. 7. MTI 개선인자에 따른 STALO 주파수 변화 허용범위

송신기와 수신기의 주파수 동기는 위상잠금루프를 이용하여 시스템에서 요구하는 안정도 범위를 제공할 수 있다. 위상잠금루프의 성능은 기준주파수의 특성과 전압제어 발진기(VCO : Voltage Controlled Oscillator)의 특성 및 루프필터의 특성에 의해 결정된다^[14]. 펄스 체이싱을 이용한 바이스태틱 시스템의 경우, 펄스 체이싱 동안 STALO와 COHO의 주파수 가 허용범위 이하로 유지되어야 할 뿐 아니라 MTI 필터링 동안 안정하게 유지되어야 시스템에서 요구되는 개선인자를 제공할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 펄스체이싱을 이용한 바이스태틱 레이더 시스템에서 시스템 불안정 요인들을 식별하고 바이스태틱 수신기의 MTI 개선 성능에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

바이스태틱 레이더에서 펄스 체이싱 과정은 송신 펄스 단위로 수행되며, 펄스-펄스간 발생될 수 있는 시스템 불안정 요소들은 MTI 필터의 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한 출력 증폭기에 의한 송신 주파수 변화 및 송신기와 수신기의 STALO/COHO주파수 차이에 의한 불안정 요소들 역시 모노스태틱 시스템에서와 유사하게 시스템 성능을 제한하는 요소들이다. 본 논문에서는 펄스-펄스 단위의 신호처리 과정인 MTI 필터의 구조에 따라 개선 성능이 차이가 있음을 모노스태틱 구조에 적용된 MTI 필터의 성능 결과를 적용하였으며^[1,5,6], 여러 불안정 요소들 중 펄스-펄스 단위의 펄스 타이밍 에러, 펄스폭 변화, COHO 위상 변화 및 진폭의 변화에 의한 개선인자들에 비해 STALO와 COHO의 주파수 안정도가 상대적으로 큰 영향을 줌을 성능 영향 분석을 통해 알 수 있었다.

적용된 시스템 변수들과 불안정 요소들의 전형적인 값들로부터 클러터에 의해 MTI 개선 성능을 단계별로 분석하였다. 각 개별 항목들의 영향은 주파수 대역과 클러터 형태와는 무관하고 MTI 필터의 구조와 하드웨어적인 허용오차 범위에 의해 결정됨을 알 수 있으며, 클러터의 형태와 주파수 대역 및 펄스반복주파수의 관계로부터 바이스태틱 수신기에 입력되는 클러터 자체의 개선 성능 범위가 결정됨을 확인하였다. 클러터에 의한 개선인자 값은 시스템 불안정 요소들에 의해 열화되며, 여러 불안정 요소들 중 가장 작은 값을 갖는

요소에 의해 전체 시스템의 개선성능이 제한됨을 확인할 수 있었다.

펄스 채이싱과 MTI필터를 효과적으로 연동하여 클러터로부터 기동 표적을 구분하기 위해 송신기와 수신기 간에 요구되는 시간동기, 주파수 동기의 주파수 안정도 범위 및 위상동기의 범위에 대해서도 분석하였다.

References

- [1] M. I. Skolnik, Radar Handbook, Chapter. 2 MTI Radar, McGraw-Hill, 3rd ed., 2008.
- [2] Nicholas J. Willis, Bistatic Radar, Scitech Publishing Inc., 2nd ed., 2005.
- [3] M. C. Jackson, "The Geometry of Bistatic Radar Systems", IEE Proc., 133(7), Pt. F, pp. 604~612, Dec., 1986.
- [4] W. Q. Wang, et al., "Time and Phase Synchronisation via Direct-Path Signals for Bistatic Synthetic Aperture Radar Systems", IET Radar, Sonar, and Navig., Vol. 2, Issue 1, pp. 1~11, 2008
- [5] D. K. Barton, Radar System Analysis, Chapter 7. MTI Techniques in Search Radar, Artech House, 1989.
- [6] Eyung. W. Kang, Radar System Analysis, Design, and Simulation, Chapter 11. Moving Target Indicator, Artech House, 2008.
- [7] Junjie Wu, et al., "Analysis of PRF Jitter in Bistatic SAR", International Conference on Radar 2006, CIE'06, pp. 1~4, 2006.
- [8] L. E. Brennan, "Angular Accuracy of a Phased Array Radar", IRE Transcation on Antennas and Propagation, Vol. 9, No. 3, pp. 268~275, May, 1961.
- [9] 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, March, 1973.
- [10] Reilly, J. P. Clutter Reduction by Delay Line Cancellers, masters thesis, George Washington University, Washington, DC, Feb., 1967
- [11] Churchill F. E., et al., "The Correction of I and Q Errors in a Coherent Processor", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-17, No. 1, pp. 131~137, Jan., 1981.
- [12] Weiming Tian. et al., "A Frequency Synchronization Scheme Based on PLL for BiSAR and Experimental Result", 9th International Conference on Signal Processing 2008, ICSP 2008, pp. 2425~2428, 2008.
- [13] Aguasca. A., et al., "Remote Bistatic Receiver Synchronization using DLL Techniques", International Conference on Radar 92, pp. 489~492, 1992.
- [14] V. Manassewitsch, Frequency Synthesizers Theory and Design, 3rd ed., John Wiley and Sons, 1987.