

고속 스캔 MTI 펄스 레이더의 지형 클러터 제거 능력 최적화에 관한 연구

A Study on Optimizing the Clutter Rejection Capability for a High-Speed Scanning MTI-Pulse Radar

김 종 건 · 장 현 순*

Jong-Geon Kim · Heon-Soon Jang*

요 약

MTI(Moving Target Indicator) 방식으로 구현된 레이더에 있어서 안테나 고속 회전시 발생하는 지형 특성에 따른 고정 클러터의 도플러 주파수 스펙트럼 확산 현상에 대해 신호 처리 파라미터값(MTI 필터 단수, M/N Detector 비율, CFAR(Constant False-Alarm Ratio)의 K-factor 및 offset값)을 조정하여 지형 클러터의 제거 능력을 최적화하였다. 최적화 구현은 지형 클러터의 유형별 데이터 수집을 위한 치구를 설계 및 활용하여 유형별 지형 클러터 데이터를 수집하였으며, 이의 유형별 분석 및 제거 능력 최적화를 위해 Matlab 시뮬레이션을 통하여 test case를 만들고, 레이더 실내 시험 및 지형별 야외 시험을 통한 반복 검증을 수행하여, 진화적 개발 모델과 같이 반복, 점진적인 과정으로 병행되는 최적화를 수행하였다. 연구 결과, 기존 레이더 시스템에 비해 7.5 dB(5.6배) 이상의 지형 클러터 제거 능력 향상 효과를 거두었다.

Abstract

To reject the Doppler frequency spectrum dispersion of clutter caused by high-speed antenna rotation of MTI radar system due to terrain characteristics, signal processing parameters(MTI filter constant, M/N detector ration, K-factor and offset of CFAR) are adjusted for the optimal elimination of the ground clutter. For this investigation, logging equipment is designed and utilized for the collection of classified ground clutter data. Test case is devised through Matlab simulation for the classified analysis and optimization of clutter rejection. Then indoor radar test and outside test in accordance with terrain characteristics are repeatedly performed for the verification of the test. This whole process is through the evolutionary development model and repeated for the optimization. Final result is that ground-clutter rejection capability is 5.6 times(7.5 dB) better than that of existing radar system.

Key words : Ground Clutter, MTI Filter, Spectrum Dispersion, M/N-Detector, CFAR

I. 서 론

펄스 레이더는 구현 방식에 따라 일반적으로 MTI 및 펄스 도플러 방식으로 구분할 수 있다. 상대적으로 낮은 펄스 반복 주파수가 적용되는 MTI 레이더

는 지형 클러터 제거 능력에 있어 펄스 도플러 레이더에 비해 취약한 특성을 나타내며, MTI 레이더 중에서도 비교적 낮은 펄스 반복 주파수로 고속 스캔하는 레이더의 경우에는 안테나 스캔 변조에 의한 지형 클러터의 주파수 스펙트럼 확산 현상으로 클러

국방기술품질원 유도전자센터 유도전자2팀(Defense Agency for Technology and Quality Daegu Center)

*LIG넥스원(주) 구미연구소 기술2팀(Gumi R&D Center Engineering Team 2, LIGNex1)

· 논 문 번 호 : 20090720-070

· 수정완료일자 : 2009년 9월 22일

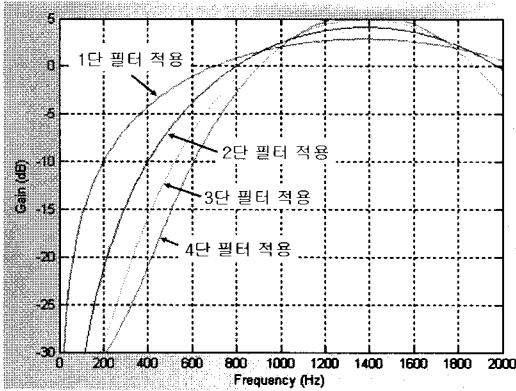


그림 1. MTI 필터 단수에 따른 도플러 주파수-이득 특성 곡선
 Fig. 1. The graph of a gain curve vs. Doppler frequency on MTI filter stages.

터 제거에 한계를 보이고 있다^{[1][2]}. 하지만 이러한 고속 스캔 MTI 레이더는 표적에 대한 체계 반응 시간을 줄이기 위하여 저고도 대공 방어용 무기 체계에 적용된다.

오늘날 저고도 대공 방어용 무기 체계의 주변 운용 환경은 도시화(건물, 도로, 첩탑 등)로 인해 급속하게 변화하고 있으며, 이러한 운용 환경의 변화는 고속 스캔 MTI 레이더의 신호 처리 과정에서 스파이크성 이산 클러터로 인한 다량의 이동 표적을 발생 시키고 있다.

MTI 레이더 설계 개념상 저주파 클러터를 제거하기 위한 다단의 MTI 필터가 적용된 설계 의도는 운용되는 레이더의 주변 환경에 의해 발생되는 지형 클러터 신호가 Gaussian 분포를 따르는 점을 고려하여 저주파 성분의 클러터를 제거하기 위함이다. 그림 1과 같이 단수 증감에 따른 MTI 필터의 주파수-이득 특성은 단수가 증가할수록 저주파에서 차단 특성이 뛰어나서 일반적인 지형 클러터가 갖는 저주파 성분의 반사 신호를 감쇠시킬 수 있다^[1].

그러나 도시화로 인해 증가된 스파이크성 이산 클러터 반사 신호는 고주파 성분을 다량 포함하고 있으므로 지연 선로 상쇠기(Delay-Line-Canceller)를 적용하는 MTI 필터에 의해 완전히 제거될 수는 없다.

다음은 산악 지형 주변의 첩탑에서 반사되는 스파이크성 이산 클러터 성분에 대한 신호 분석 내용이다. 그림 2에서 광학 추적기의 모니터 화면과 대

응되는 레이더 전시 화면이 서로 일치하는 첩탑의 거리 및 방위각을 각각 비교한 결과, 첩탑으로 인한 반사 신호가 이동 표적으로 검출된 것을 확인하였다.

이러한 첩탑에 의한 반사 신호의 성분 및 레이더 신호 처리 결과를 분석하기 위하여 그림 6의 신호 처리 과정에 대해 Matlab을 이용한 시뮬레이션 프로그램^[3]을 만들어 야전에서 수집한 클러터 데이터에 대한 분석을 수행하였다.

그림 3은 그림 2의 클러터 내의 첩탑 반사 신호를 분석한 내용으로 주변 지형 클러터에 비해 상대적으로 위상이 크게 변하는 I채널/Q채널 비디오 신호가 검출된다. 그러므로 첩탑으로 인해 반사된 신호는 고정 표적임에도 불구하고, 안테나 스캔 변조에 의해 위상 변화가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 신호는 MTI 신호 처리 과정을 시뮬레이션한 결과 이동 표적으로 검출됨을 확인하였다.

그림 4에서 나타난 도로에서 이동하는 차량의 반사 신호는 주변 지형 클러터에 비해 상대적으로 위상이 급격하게 변동하고 있으며, 이러한 차량 이동 반사 신호는 주파수가 높으므로 MTI 필터를 거치면서 상대적으로 낮은 주파수의 반사 신호에 비해 잔류하는 이동 표적으로 신호 처리되어 레이더 화면

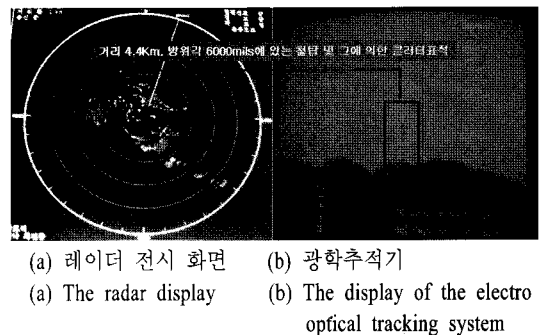
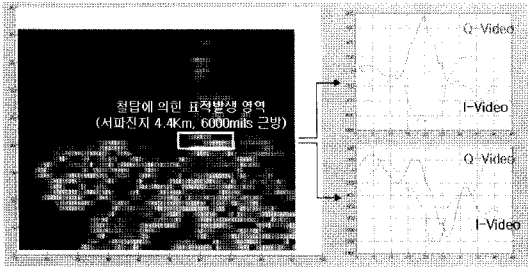


그림 2. 거리 4.4 km, 방위각 6000 mils 지점의 첩탑에 의한 지형 클러터 전시 화면(방위각상으로 레이더에 종속되어 있고 레이저 거리 측정기를 이용하여 첩탑의 정확한 거리를 측정할 수 있다.)
 (a) 레이더 전시 화면 (b) 광학추적기
 (a) The radar display (b) The display of the electro optical tracking system

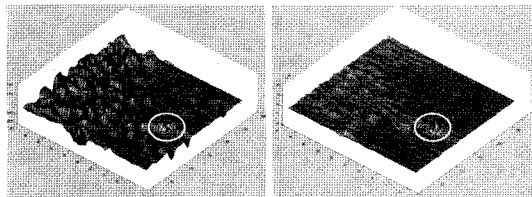
그림 2. The display of the ground clutter by the tower placed on 4.4 km of ranges and 6,000 mils of azimuth(The EOTS that was dependent on the radar Azimuth, can measure an accurate range).



(a) I채널/Q채널 비디오 신호 크기 (b) 철탑 위치 거리의 방위각 방향 비디오 위상 변화
 (a) The amplitude of I/Q-video signals (b) The phase variation of tower reflection video signals

그림 3. 야전에서 수집한 철탑 반사 신호 해석(x축: 방위각, y축: 직폭)

Fig. 3. The analysis of tower reflection signals that were collected in a field(x-axis: Azimuth, y-axis: magnitude).



(a) 지형 클러터 내의 차량 반사 신호 (b) MTI 필터 통과 후 잔류 신호
 (a) The reflected signal of a moving vehicle in the ground clutter (b) Residual signal after the MTI filter

그림 4. 이동 차량의 반사 신호 및 MTI 필터 출력 신호

Fig. 4. The reflected signal of a moving vehicle and output signals of the MTI filter.

에 전시되는 것을 확인할 수 있다.

따라서 고속 스캔 형태와 낮은 PRF(Pulse Repetition Frequency) 방식으로 설계된 MTI 레이더의 스파이크성 이산 지형 클러터 제거 능력을 보완하기 위해 신호 처리 알고리즘 파라미터 가운데 M/N detector(디지털 이진-윈도우 적분기의 형태로 N개의 수신 신호 중 M개 이상의 표적신호 검출 시 유효표적으로 산출하는 검출기) 적분계수 조정, CFAR의 K-factor(셀 평균 오경보유지기(cell-averaging CFAR)의 전/후 평균값에 상수 K값을 곱하는 인자) 및 offset값(CFAR 임계레벨의 하한치) 조정^[1]으로 지형 클러

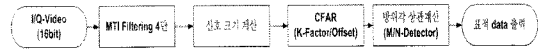


그림 5. MTI 신호 처리 알고리즘

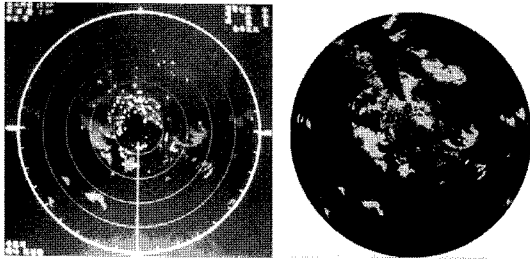
Fig. 5. The signal processing algorithm of the MTI radar.

터 신호가 크더라도 이동 표적으로 오인 처리되지 않고, 고정 표적으로 레이더 화면에 전시되도록 연구의 목표를 세웠으며, 지형 클러터를 제거하기 위해서 신호 처리 알고리즘의 파라미터를 최적화할 필요가 있다.

II. MTI 신호 처리 알고리즘 분석 및 시뮬레이션

레이더 수신기로부터 이동 표적과 함께 지형 클러터 신호가 I채널과 Q채널을 통해 비디오 신호로 입력되고 이 신호는 채널별 4단의 MTI 필터를 통과 하면서 저주파 신호의 도플러 성분은 제거되고, 이동 표적만 생성된다. 이렇게 MTI 필터를 통과한 I채널과 Q채널의 이동 표적 및 지형 클러터 신호는 신호 처리 과정에서 벡터합 연산을 거치며, 그 크기 ($=\sqrt{I^2 + Q^2}$)는 신호 처리 연산을 최소화하기 위한 계산식 $(\frac{T}{8}) \times L + (\frac{-1}{2}) \times S (\approx \sqrt{I^2 + Q^2})$, I와 Q 신호 중에서 큰 값은 L, 작은 값은 S)로 값을 구한 후 L값과 비교하여 크기가 큰 값을 선택/저장한다. 탐지 신호의 거리(range) 방향에 대한 CFAR 알고리즘 처리 과정은 최대 탐지 거리와 샘플링 주파수의 관계에서 2,000개의 픽셀에 대해 1픽셀 단위로 전후 32개 픽셀의 평균 레벨값을 계산하고, 이 값에 K-factor 값(2.85)을 곱한 값이 offset 값(180)이나 표적 탐지 기준값 이상일 경우 표적신호로 저장된다. 탐지 신호의 방위각(azimuth) 방향에 대한 방위각 상관(azimuth correlation) 처리 과정은 송신 펄스 주기에 해당되는 평균 2,800개의 픽셀에 대해 1픽셀 단위로 디지털 이진-윈도우 적분 검출 결과 일정 갯수 이상의 신호가 들어오면 표적으로 선택 저장해 주는 M/N detector 기능을 수행한다.

본 연구 대상의 기본 신호 처리 알고리즘 M/N detector 적분계수는 6/12을 기본값으로 정해 두었으며, 이 의미는 방위각 방향으로 표적신호가 12개중

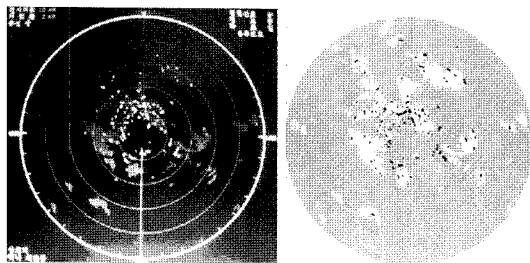


(a) 산악과 도심이 혼재되어 있는 지형에서 야전 운용되고 있는 레이더 전시 화면
(b) (a)진지에서 수집한 지형 클러터의 시뮬레이션 화면

(a) Radar display operating at the field mixed a mountainous area as well as a urban area
(b) The simulation of ground clutters collected at the field (a)

그림 6. 레이더 전시 화면-지형 클러터 데이터 시뮬레이션 비교
Fig. 6. The radar display vs. ground clutter data simulation.

6개 이상일 경우 이동 표적으로 처리하는 것이다. 이러한 신호 처리 알고리즘에 대한 검토 결과를 바탕으로 스파이크성 이산 지형 클러터가 신호 처리 과정에서 제거될 수 있도록 M/N detector 적분계수를 조정할 필요가 있었고, 이로 인한 레이더의 탐지 성능의 저하를 막기 위해 신호 처리 알고리즘 파라미터(CFAR의 K-factor 및 offset 값)를 최적화 하였다. 유형별 수집된 지형 클러터 데이터를 입력한 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같이 원좌표계로 클러터



(a) 레이더 전시 화면
(b) 신호 처리 시뮬레이션 결과

(a) The radar display
(b) The signal processing algorithm simulation

그림 7. 레이더 전시 화면-신호 처리기 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 7. The radar display vs. the signal processing algorithm simulation.

표 1. 시뮬레이션 결과에 따른 최적화된 테스트 케이스

Table 1. The test cases optimized by the simulation result.

CFAR K-factor \ CFAR offset	180	180	364	300	250	350	315
2.85	(기존)	①	x	x	x	x	x
2.60	x	x	②	③	④	x	x
2.50	x	x	x	x	x	⑤	x
2.25	x	x	x	x	x	x	⑥
M/N detector	6/12		10/16				

형상을 나타낼 수 있다. 여기서 I채널/Q채널 신호의 진폭은 세로축 거리 10 km(677개 픽셀)까지 수집된 데이터를 처리한 것이며, 레이더 전시 화면과 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인할 수 있다.

또한 이동 표적에 대해 레이더 전시 화면과 시뮬레이션 결과에서도 그림 7와 같이 일치함을 확인할 수 있다. 여기서 시뮬레이션 결과로 나타난 붉은 점은 레이더 전시 화면의 이동 표적에 해당하며, 레이더 전시 화면에서 노란색의 이동 표적과 유사한 분포로 나타남을 알 수 있다.

이러한 시뮬레이션 프로그램을 토대로 고속 스캔하는 MTI 레이더 전시 화면에 나타난 클러터 과다 현상을 개선하기 위해 M/N-detector 적분계수를 기존 6/12에서 11/16, 10/16, 9/16로 변경하여 야전 적용 시험을 수행한 결과, 11/16과 10/16은 만족할만한 클러터 제거 능력 개선도를 보였으나, 9/16은 상대적으로 개선 효과가 적었다. 또한, 3개의 테스트 케이스에 대해 실내 레이더 성능 시험을 수행한 결과 MDS (Minimum Detection Signal: 최소 탐지 신호)가 각각 1.8 dB, 1.0 dB, 0.7 dB 증가하여, 클러터 제거 개선 효과와 MDS의 성능 저하 측면을 고려하여 M/N-detector 적분계수 10/16을 선택하고 CFAR의 K-factor 및 offset 값에 대해 테스트 케이스를 표 1과 같이 생성하여 실내 레이더 성능 시험 및 야전 수집 데이터를 이용한 시뮬레이션을 반복적으로 수행하여 최적의 6가지 테스트 케이스를 구하였다.

그림 8 시뮬레이션 결과 화면의 붉은 점은 이동 표적이고, 노란색은 지형 클러터를 나타내며, 붉은 점의 개수는 기존 대비 개선된 각 테스트 케이스 결

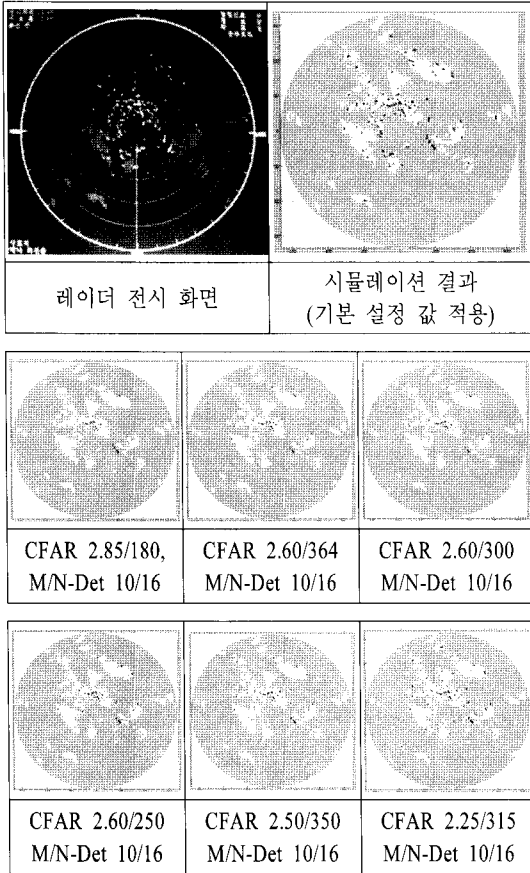


그림 8. 야전 수집 샘플에 대한 6가지 테스트 케이스 시뮬레이션 결과. 표적검출 셀 수는 각각(위에서 아래, 좌에서 우 순) 2484, 760, 392, 484, 676, 463, 667개로 나타남

Fig. 8. The result of simulation on test cases of six type samples corrected a field. The count of target is 2484, 760, 392, 484, 676, 463, 667 (from up-left to down-right).

과에서 많이 줄어들음을 확인할 수 있다.

III. 연구 결과 검증

3-1 실내 레이더 성능 검증시험

설계된 각 테스트 케이스를 생산 공정중인 레이더 3세트에 적용하여 레이더 규격 성능 영향성 검증을 위해 시험한 결과는 그림 9와 같다.

현재 양산중인 레이더는 개선도 효과 검증의 기준이 되며, 개선된 테스트 케이스 6개에 대한 시험 결과 테스트 케이스 ③, ④, ⑥은 기존 장비 대비

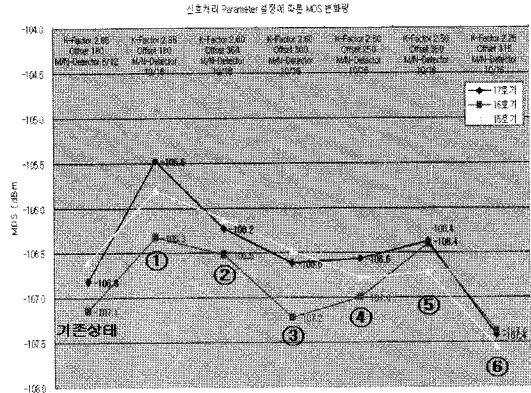


그림 9. 6가지 테스트 케이스에 대한 MDS 규격 성능 수준, 양산 중인 시스템 3세트에 대해 적용 시험

Fig. 9. The MDS performance on six test cases, tests on three manufactured radar systems applied test cases.

MDS 특성이 동등 이상이었으며, 테스트 케이스 ①, ②, ⑤는 MDS 특성이 저하됨을 알 수 있다.

3-2 체계 검증 시험

개선된 각 테스트 케이스에 대한 레이더 체계 영향성 검증을 위해 야외 레이더 송신 시험 항목에 적용한 결과 체계 영향 없이 정상 동작됨을 확인하였다.

3-3 개선 효과 검증 야전시험

개선된 각 테스트 케이스에 대해 지형별 개선 효과 검증을 위한 야전 시험 결과 테스트 케이스 ②, ③, ⑤의 클러스터 제거 능력 개선 효과가 비교적 우수하였으며, 이중 최적치라고 판단되는 테스트 케이스 ③의 야전 적용 시험 결과를 그림 10에서 보였다.

IV. 연구 결과 분석

그림 11와 표 2에서 나타난 바와 같이 MDS 성능에 있어 60 rpm으로 회전하고 평균 2,800 Hz의 펄스 반복 주파수 및 M/N-detector 6/12, CFAR의 K-factor 2.85, offset 180을 적용하고 있는 저고도 탐지 레이더(MDS 규격 -103 dB 이내) 대비 개선된 테스트 케이스 ③, ④, ⑥의 MDS는 양호한 특성으로 확인되었고, 테스트 케이스 ②, ③, ⑤는 지형 클러스터

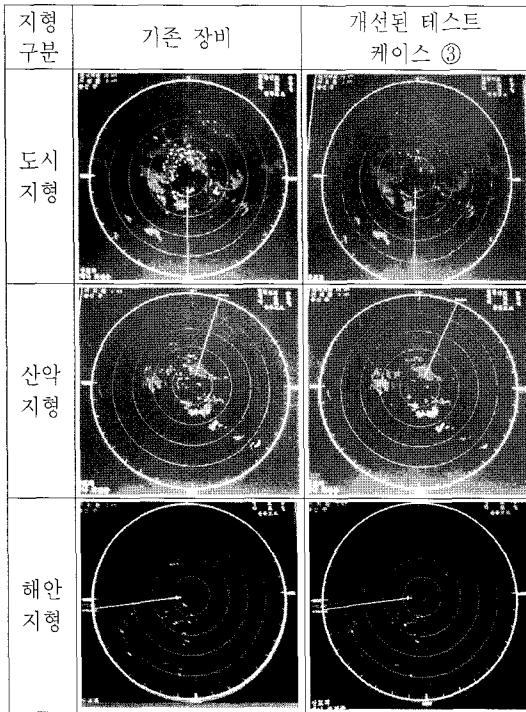


그림 10. 야외 레이더 체계 테스트 케이스 ③ 시험 결과
Fig. 10. The result of radar system field test applied the test case ③.

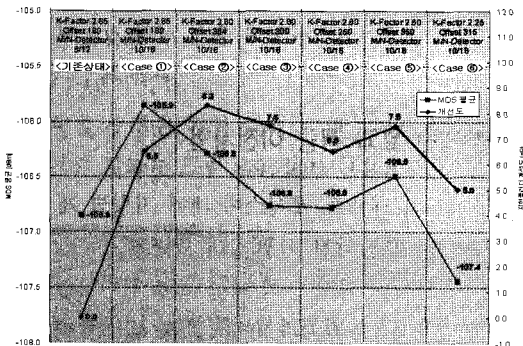


그림 11. 각 테스트 케이스에 대한 MDS 평균-지형 클러터 개선도
Fig. 11. The improvement of MDS and ground clutter rejection performance on test cases.

제거 능력 개선도가 양호한 특성으로 확인되었다. 따라서 두 가지 성능에 있어 모두 양호한 특성을 보인 테스트 케이스 ③을 최적화 연구 결과로 얻게 되었고, 평균 MDS 성능 특성이 기존 장비 대비 동등 수준이며, 지형 클러터 제거 능력 개선도는 5.6배(7.5 dB) 이상으로 크게 향상되었다. 여기서 지형 클러터 제거 능력 개선도 계수 과정에서 차량 이동 반사 신

표 2. 개선된 테스트 케이스에 대한 종합 성능 비교
Table 2. The performance of improved test cases.

구분	테스트 케이스 ①	테스트 케이스 ②	테스트 케이스 ③	테스트 케이스 ④	테스트 케이스 ⑤	테스트 케이스 ⑥
MDS 특성	최하	하	상	상	중	최상
클러터 개선도	중	최상	상	중	상	최하
종합	-	-	선정	-	-	-

호가 이동 표적으로 포함 계산됨에 따라 실제 제거 능력 개선도는 5.6배(7.5 dB)보다 크게 향상될 것이다.

V. 결 론

오늘날 항공 진지의 주변 운용 환경이 점차 도시화(건물, 도로, 철탑 등)와 농작물 재배를 위한 인공 설치물(하우스용 철 구조) 등으로 급속하게 변화하고 있는 가운데 발생하는 클러터로 인해 신호 처리 과정에서 표적으로 오인 처리되어 레이더 화면에 그대로 전시되는 현상이 많아졌다. 이를 개선하기 위한 신호 처리 클러터 제거 능력을 최적화 연구 결과, 기존 신호 처리에 비해 5.6배(7.5 dB) 이상으로 지형 클러터 제거 능력 향상 효과를 거두었다.

이 개선 연구를 통해 한국적 방공 레이더 설계 시 실제 운용 환경을 고려한 지형 클러터 신호 처리 파라메타 값의 최적화가 필요하고, 이 최적화를 위해 짧은 기간에 완성도를 높이는 효과를 달성하는데, 시뮬레이션 및 장비의 성능 시험, 실제 야전 적용 운용시험을 병행 수행하는 진화적 개발 모델의 반복 점진적 과정을 제안한다.

참 고 문 헌

- [1] Merrill Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd Edition, McGraw-Hill, pp. 8_1-8_23, 15_1-15_34.
- [2] David K. Barton, Sergey A. Leonov, *Radar Technology Encyclopedia*, Artech House, Boston. London, pp. 78-88, 120, 279-283.
- [3] Bassem R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Chapman & Hall/CRC, pp. 307-338.

김 중 건



1990년 3월~현재: 국방기술품질원
1991년 2월: 국방대학원 무기체계 (공학석사)
[주 관심분야] 레이더 시스템, 레이더 신호 처리, M&S

장 헌 순



1988년 2월: 강원대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 6월~현재: LIG넥스원(주) 구미 연구소
[주 관심분야] 안테나, 레이더 시스템, 클러터 해석 등