

마이크로파 탐색기의 HPRF 파형에 대한 지표면 부엽클러터와 표적탐지 오류 확률

정회원 김태형*, 이재웅*, 변영진*

The Surface Sidelobe Clutter and the False Alarm Probability of Target Detection for the HPRF Waveform of the Microwave Seeker

Tae-Hyung Kim*, Jae-Woong Yi*, Young-Jin Byun* *Regular Members*

요약

마이크로파 탐색기를 이용하여 표적을 탐지, 추적하는 경우 하방 표적에 대해서는 지표면에서 반사되는 클러터 신호의 영향을 받는다. HPRF (high pulse repetition frequency) 모드를 사용하는 마이크로파 탐색기에서 부엽클러터 영역에 나타나는 퇴각표적을 탐지하기 위해서는 여러 지형과 상황에 따른 지표면 부엽클러터 전력의 통계적인 특징을 파악하여야 한다. HPRF 모드를 사용하는 탐색기의 항공기 탑재시험에서 지상 클러터의 전력을 측정된 자료를 기반으로, 각 지형과 안테나 시선각 등의 상황에 따라 부엽클러터의 확률분포 특성을 가장 근접하게 표현하는 확률밀도함수를 구하고 그 확률밀도함수의 매개변수를 추정하였다. 확률밀도함수 및 매개변수를 추정된 자료를 이용하여, 퇴각표적을 탐지할 때에 원하는 수준의 표적탐지 오류 확률을 가지는 표적탐지 임계값 설정에 관하여 분석하였다. 본 논문의 지표면 부엽클러터 전력의 확률분포 특성 분석과 표적탐지 임계값 설정에 관한 분석 자료는 표적탐지 방법 개발 및 일정 오경보 처리 등의 다양한 분야에 이용될 수 있다.

Key Words : microwave seeker ; clutter ; target detection ; probability distribution ; false alarm probability

ABSTRACT

Tracking and detecting targets by the microwave seeker is affected by the clutter reflecting from the earth's surface. In order to detect retreating targets in look-down scenario, which appear in the sidelobe clutter (SLC) region, in the microwave seeker of high pulse repetition frequency (HPRF) mode, it is necessary to understand statistical characteristics of the surface SLC. Statistical analysis of SLC has been conducted for several kinds of the surface using data obtained by the captive flight test of the microwave seeker in the HPRF mode. The probability density function (PDF) fitting is conducted for several kinds and conditions of the surface. PDFs and PDF parameters, which best describe statistical distribution of the SLC power, are estimated. By using the estimated PDFs and PDF parameters, analyses for setting the target-detection thresholds, which give a desired level of target-detection false alarm probability, are made. These analysis materials for statistical characteristics of SLC power and the target-detection threshold can be used in various fields, such as development of a target-detection method, the constant false alarm rate processing.

I. 서론

마이크로파 탐색기가 하방 표적을 탐색, 추적하

는 경우에 지면 클러터의 영향 분석과 지면 클러터의 제거 및 회피는 중요한 문제가 된다. 지면 클러터는 안테나의 시선각 방향의 지면에서 반사되는

* 국방과학연구소(thyunkim@pusan.ac.kr, yjwoong@add.re.kr, yjbyun@add.re.kr)

논문번호 : KICS2008-10-436, 접수일자 : 2008년 10월 06일, 최종논문접수일자 : 2009년 3월 17일

주엽클러터(mainlobe clutter)와 안테나의 부엽으로 수신되는 부엽클러터(sidelobe clutter)로 구별된다. 특히 안테나와 가장 가까운 거리에서 반사되는 AR (altitude return)은 부엽클러터 중 가장 큰 전력을 가진다. HPRF(high pulse repetition frequency) 모드를 사용하는 마이크로와 탐색기에서, 표적이 기수 방향으로 탐색기로 다가오는 경우 표적 신호가 클러터가 없는 도플러 주파수 영역에서 획득되므로 표적의 탐지 및 추적 동작이 클러터의 영향을 받지 않는다. 그러나 표적이 횡 방향으로 이동하거나(표적 신호가 주엽클러터 안으로 사라지게 됨), 표적이 꼬리 방향으로 퇴각하는 경우에(표적이 부엽클러터 영역에 나타나 부엽클러터의 영향을 받음) 표적 신호가 클러터의 영향을 받게 된다¹¹. 표적이 주엽클러터 영역에 존재할 때는 추적이 불가능하나, 주엽클러터의 주파수를 예측할 수 있으므로 어느 정도 피할 수 있다. 부엽클러터 영역에 존재하는 퇴각표적을 탐지, 추적하기 위해서는 부엽클러터 전력을 고려하여 부엽의 이산 클러터 신호를 제거하고 표적탐지 임계값을 설정해야 한다. 탐색기의 표적탐지 성능의 추정 및 표적탐지 임계값의 설정, 그리고 클러터의 간섭 제거를 위한 알고리즘 개발을 위해서는 클러터 전력의 분포를 적당한 확률밀도함수로 표현하는 것이 필수적이며, 클러터 전력이 분포하는 모양에서 우측 꼬리 길이는 표적탐지 임계값 결정에 결정적인 역할을 한다^{2,41}.

레이더 클러터의 분포는 주로 레일리, 와이블, 대수정규, 그리고 K-분포 등으로 분류되며, 각종 레이더에서 클러터 분포에 대한 최적의 모형을 구하려고 연구해 왔다^{2,71}. 본 논문에서는 HPRF 모드를 사용하는 탐색기의 항공기 탑재시험(captive flight test)에서 획득한 지표면 클러터의 전력 자료를 기반으로, 각 지형과 안테나 시선각 등의 상황에 따라 부엽클러터 전력의 확률분포 특성을 가장 근접하게 표현하는 확률밀도함수를 구하고 그 확률밀도함수의 매개변수를 추정하여, 부엽클러터 전력을 확률 통계적으로 분석한다. 또한 탐색기의 주 안테나로 들어오는 신호에서 퇴각표적을 탐지할 때에 원하는 수준의 표적탐지 오경보 확률을 가지게 하는 퇴각표적 탐지 임계값에 관하여 분석한다(표적탐지 오류 확률은 부엽클러터 신호를 표적으로 오판할 확률을 말한다). 본 분석 자료는 HPRF 모드를 사용하는 탐색기의 표적탐지 성능의 추정과 표적탐지 방법 개발 및 일정 오경보(constant false alarm rate) 처리 등의 다양한 분야에 주요하게 이용될 수 있다^{8,91}.

II. 부엽클러터의 확률통계적인 특성 분석

2.1 부엽클러터의 확률분포와 임계값 설정

반사 지면의 특성이 무작위로 변함으로 인해 레이다 반사 신호는 무작위하며, 지면 클러터 신호의 크기는 확률통계적인 관점에서 볼 수 있다. 그림 1과 같이 주 안테나의 부엽(또는 주엽)에서 들어오는 클러터 신호 전력의 확률밀도함수를 생각할 수 있다. 주 안테나 채널 신호에서 부엽클러터(또는 열잡음)와 표적 신호를 구분하기 위하여 주 안테나 채널 신호를 표적탐지 임계값과 비교하여 표적을 탐지하게 된다. 그림 1은 부엽클러터 신호가 표적으로 오판될 확률(P_{fa})이 있음을 보여주고 있다. 그림 1의 오른쪽 그림은 부엽클러터 전력의 확률밀도함수 예와 표적탐지 임계값 Y 로 퇴각표적을 탐지할 때에 발생할 수 있는 퇴각표적 탐지 오류의 발생 확률을 보여 준다. 확률밀도함수 그림에서 회색 영역의 면적이 P_{fa} 이다. P_{fa} 은 표적탐지 임계값 Y 를 크게 하면 줄일 수 있지만, Y 의 값을 크게 하면 표적탐지 확률이 줄어들게 된다. 그러므로 표적탐지 확률을 원하는 만큼 크게 하면서 P_{fa} 을 원하는 만큼 적게 하는 적절한 표적 탐지 임계값의 결정을 위해서는 부엽클러터 전력의 확률밀도함수를 파악하여야 한다. 또한, 탐색기의 퇴각표적 탐지 성능의 추정 및 표적탐지 방법 개발을 위해서는 부엽클러터 전력의 확률밀도함수 특징 파악은 필요하다^{2,4,8,91}.

부엽클러터 전력의 확률밀도함수 특징 파악을 위하여, HPRF 모드를 사용하는 탐색기의 항공기 탑재 시험에서 획득한 지표면 클러터 전력 자료를 이용한다. 자료는 비동기 적분(non-coherent integration) 방법으로 획득하였으며 $n \times \text{CPI}$ (coherent processing intervals) 동안 획득한 클러터 신호를 이용하여 각 주파수 셀에서의 클러터 전력 평균값($n \times \text{CPI}$ 동안의 평균값)을 일정 시간 동안 계속 구하였다. 시험에서

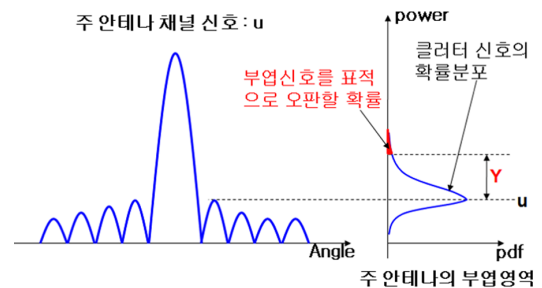


그림 1. 표적탐지 임계값과 부엽클러터 신호를 표적으로 오판할 확률(P_{fa})

각 주파수 셀에서의 클러터 전력을 해면, 농지, 공단의 지형별로, 1500ft, 3000ft, 4000ft, 5000ft, 6000ft의 고도별로, 그리고 0도와 20도의 안테나 숙임각별로 구하였다.

2.2 부엽클러터의 확률통계적인 특성 분석

탐색기의 항공기 탑재시험 결과 자료를 이용하여, 고도, 안테나 숙임각, 및 지형별로, 각 주파수 셀에서 부엽클러터 전력의 확률분포 특성이 어떤 확률밀도함수와 가장 근접한 지를 판단하고, 부엽클러터 전력의 확률분포 특성을 근접하게 표현하는 확률밀도함수의 매개변수를 추정한다.

부엽클러터 전력의 확률분포와 비교해 보는 확률밀도함수들은 지수($f(x|\mu)$), 레일리($f(x|\sigma)$), 대수정규($f(x|\mu, \sigma)$), 와이블($f(x|a, b)$), 라이시안($f(x|s, \sigma)$) 확률밀도함수들이다. 여기서 K-분포는 라이시안, 레일리, 대수정규 확률밀도함수 등으로 표현되므로 생략하였다. 부엽클러터 전력 분포에 가장 근사하는 확률밀도함수를 구하기 위해, 먼저 한 주파수 셀에서 일정 시간 동안의 부엽클러터들의 전력 히스토그램에 근사하는 각 확률밀도함수의 매개변수를 최우 추정(maximum likelihood estimation) 기법을 이용하여 구한다. 구한 그 매개변수들을 이용하여 그린 각 확률밀도함수 곡선과 확률밀도함수의 매개변수를 구할 때 사용한 부엽클러터 전력 히스토그램과의 차이 값을 근사 확률밀도함수와 실제 부엽클러터 전력의 확률분포와의 적합도 차이라고 본다. 이 적합도 차이를 이용하여 각 부엽클러터 전력의 확률분포 특성을 가장 근접하게 표현하는 확률밀도함수와 그 매개변수를 추정한다. 그림 2는 부엽클러터 전력 히스토그램과 근사 확률밀도함수 곡선들과

의 적합도 차이를 이용하여 각 주파수별 가장 근접한 확률밀도함수를 구한 예이다. 그림 2의 첫 그래프는 주파수별로 부엽클러터 전력의 분포가 어떤 확률밀도함수에 가장 근사한 가를 보여주는 예로서, y축의 값은 각 확률밀도함수를 나타내며(1. 지수, 2. 레일리, 3. 대수정규, 4. 와이블, 5. 라이시안), x축은 도플러 주파수이다. 그림 2의 예의 클러터는 대수정규 확률밀도함수에 대체로 근사함을 볼 수 있다. 첫 그래프 외에 나머지 그래프들은 한 주파수 셀의 부엽클러터 전력 히스토그램과 그 부엽클러터 전력 히스토그램에 대해 최우 추정 기법으로 각 확률밀도함수(차레로 지수, 레일리, 대수정규, 와이블, 라이시안)에 근사화한 매개변수를 이용해 각 확률밀도함수 곡선(회색 곡선)을 겹쳐 그렸다. 여기서 확률밀도함수 곡선을 그릴 때, 좌표축 상에서 확률밀도함수 곡선과 x축사이의 면적이 히스토그램의 면적과 같게 되도록 확률밀도함수 곡선의 y축 방향으로 크기조정 인자(scaling factor)를 곱하여 확률밀도함수 곡선을 크기조정 하였다. 크기조정 인자로는 히스토그램의 면적을 사용하였다. 그리고 각 히스토그램 우측 상단에는 히스토그램의 bin위치들(x축 상의 각 지점들)에서 히스토그램 막대의 높이와 회색 곡선의 높이와의 평균 자승 오차의 제곱근 값을 표시하였으며, 이 값이 각 근사 확률밀도함수와 부엽클러터 전력 분포와의 적합도 차이를 나타낸다. 그림 2에서 각 확률밀도함수와의 적합도 차이 중에서 가장 적은 값에 점선의 타원을 둘러쌌다. 즉, 예의 주파수 셀의 부엽클러터는 대수정규 확률밀도함수가 가장 적합한 확률밀도함수임을 알아낸 것이다. 이 사실이 첫 그래프의 한 주파수 셀에 반영되어 있는 것이다.

그림 3은 각 확률밀도함수와 가장 근사한 어떤

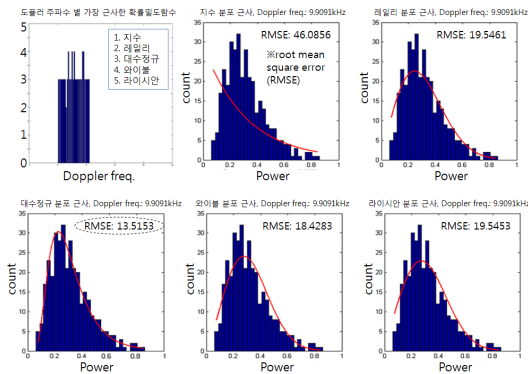


그림 2. 주파수별로 부엽클러터 전력 분포에 가장 근접한 확률밀도함수들과 한 주파수 셀의 부엽클러터 전력 히스토그램과 각 확률밀도함수 근사

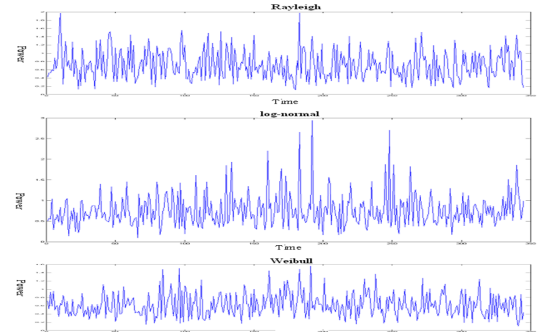


그림 3. 각 확률밀도함수(레일리, 대수정규, 와이블)와 가장 근사하는 어떤 주파수 셀의 부엽클러터 시간 신호

표 1. 지형, 고도 및 안테나 숙임각별로 각 확률밀도함수와 가장 근사하는 주파수 셀의 개수

		각 확률밀도함수에 가장 근사한 주파수 셀의 개수 (주파수 셀의 총수는 28 또는 56개)		
		해면	농지	공단
숙임각 0도	고도 1500ft	레이리: 0 대수정규: 17 와이블: 11	레이리: 1 대수정규: 20 와이블: 7	
	고도 3000ft	지수: 0 레이리: 1 대수정규: 22 와이블: 5	지수: 6 레이리: 0 대수정규: 15 와이블: 7	지수: 3 레이리: 0 대수정규: 17 와이블: 8
	고도 4000ft		지수: 0 레이리: 0 대수정규: 20 와이블: 8	지수: 1 레이리: 0 대수정규: 26 와이블: 1
	고도 5000ft	지수: 0 레이리: 1 대수정규: 18 와이블: 9	지수: 0 레이리: 0 대수정규: 18 와이블: 10	지수: 1 레이리: 0 대수정규: 25 와이블: 2
숙임각 20도	고도 3000ft	레이리: 1 대수정규: 45 와이블: 10 라이시안: 0	레이리: 2 대수정규: 47 와이블: 7 라이시안: 0	레이리: 0 대수정규: 47 와이블: 8 라이시안: 1
	고도 5000ft	레이리: 0 대수정규: 33 와이블: 23	레이리: 1 대수정규: 40 와이블: 15	레이리: 1 대수정규: 51 와이블: 4
	고도 6500ft	레이리: 0 대수정규: 41 와이블: 13 라이시안: 2	레이리: 0 대수정규: 49 와이블: 7 라이시안: 0	레이리: 1 대수정규: 51 와이블: 4 라이시안: 0

주파수 셀의 부엽클러터 시간 신호를 보인 그림이다. 그림 3에서 대수정규 확률밀도함수와 가장 근사하는 부엽클러터 신호의 변화 범위가 큰 것을 볼 수 있다. 대수정규는 보다 복잡한 지표 반사면들의 특성이다. 와이블과 레이리 확률밀도함수의 부엽클러터 시간 신호가 서로 비슷하다.

그림 2의 예와 같은 방법으로 각 고도, 안테나 숙임각, 및 지형별로 가장 근사하는 확률밀도함수를 조사하였다. 표 1에서 주파수 셀들의 부엽클러터 전력의 확률분포와 가장 근사하는 확률밀도함수의 개수를 정리하였다. 조사결과를 보면, (1) 지형별로 보았을 때, 공단 지형이 대수정규 확률밀도함수의 특성을 가진다고 말할 수 있으며, 대수정규와 와이블 확률밀도함수의 특성을 가진 것의 개수비가 100:12 정도이다. 해면 지형은 대수정규와 와이블 확률밀도함수의 특성을 가진 것의 개수비가 100:43이며, 농지 지형은 그 개수비가 100:30 정도이다. (2) 고도 3000ft, 안테나 숙임각이 20도인 경우에 대수정규 확률밀도함수의 특성을 더 강하게 드러낸다. (3) 각 주파수 셀에 부엽클러터 전력 히스토그램들과 거기에 근사한 확률밀도함수들을 보면, 대부분이 대수정규 또는 와이블 확률밀도함수에 근사하는 것을 볼

수 있으며, 부엽클러터 전력의 확률분포 특징을 크게 대수정규와 와이블 확률밀도함수로 분류할 수 있다. 대수정규 확률밀도함수로 분류되는 부엽클러터의 전력 분포는 지수와 대수정규 확률밀도함수에 가장 근사하는 것들이고, 와이블 확률밀도함수로 분류되는 부엽클러터의 전력 분포는 레이리, 와이블, 라이시안에 가장 근사하는 것들이다. (4) 부엽클러터 전력 분포의 오른쪽 꼬리 부분을 어떤 확률밀도함수가 가장 잘 근사하는 지를 집중하여 보았을 때, 그림 2의 예에서 보듯이 부엽클러터 전력 히스토그램과 각 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리 부분의 적합도 여부는 대수정규 확률밀도함수 곡선이 가장 좋다. 대수정규 확률밀도함수가 아닌 다른 확률밀도함수에 전체적으로 적합도가 좋은 부엽클러터 전력 자료라 할지라도 부엽클러터 전력 분포의 오른쪽 꼬리 부분은 거의 대부분이 대수정규 확률밀도함수와 가장 적합도가 좋았다. 즉, 거의 모든 부엽클러터 전력 자료에서 부엽클러터 전력 분포의 오른쪽 꼬리 부분을 대수정규 확률밀도함수가 가장 잘 근사한다. (5) 대수정규 확률밀도함수 곡선은 클러터 전력의 표준 편차와 관련 있는 매개변수 σ 의 값이 클수록 오른쪽 꼬리가 길어진다. (6) 와이블 확률밀도함수에서 매개변수 a 의 값은 평균 전력이 클수록 커지며, 이 값이 커질수록 곡선의 우측 꼬리가 길어진다. 또한 매개변수 b 의 값은 그 값이 작을수록 곡선의 오른쪽 꼬리를 길어지게 한다.

III. 부엽클러터에 대한 근사 확률밀도함수의 대표 매개변수와 표적탐지 임계값 설정

앞 절의 부엽클러터 전력의 확률분포 특성에 관한 분석 결과를 바탕으로, 부엽클러터 전력의 확률분포를 대수정규 또는 와이블 확률밀도함수로 보았을 때의 확률밀도함수 대표 매개변수를 구해보고, 원하는 수준의 P_{fa} 과 표적탐지 임계값에 관하여 정리한다.

부엽클러터 전력의 확률분포를 표현하는 확률밀도함수의 대표 매개변수를 각기 다른 3가지 방법으로 구하고, 그 각각의 방법으로 구한 확률밀도함수 매개변수를 이용하여 표적탐지 임계값에 따른 P_{fa} 변화를 정리한다. 또한, 이 추정된 확률밀도함수에 의한 P_{fa} 변화 결과를 확률밀도함수 매개변수를 이용하지 않고 부엽클러터 전력 값을 바로 이용하여 구한 표적탐지 임계값에 따른 P_{fa} 변화와 비교한다.

대표 매개변수를 구하는 첫 번째 방법은 확실히

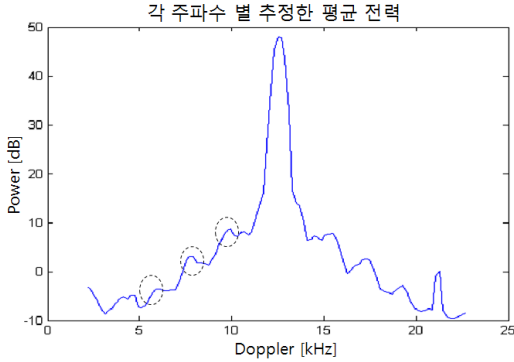


그림 4. 부엽클러스터 평균 전력이 뚜렷한 꼭지점을 보이는 지점(점선 원내의 지점)

부엽클러스터 신호로 생각되는(그리고 분포의 꼬리가 길 것으로 예상되는), 그리고 부엽클러스터 영역에서 평균 전력이 이산적이고 뚜렷한 꼭지점(peak)을 보이는 지점들(그림 4의 점선 원내의 지점)의 부엽클러스터 전력 자료로부터 확률밀도함수 매개변수를 추정하여 그 값을 대표치로 삼아 본다. 두 번째 방법은, 각 지형별로 모든 고도와 속임각의 부엽클러스터 전력 자료들을 이용하여(각 주파수 셀의 부엽클러스터 전력들을 각 주파수 셀의 평균 전력 값으로 나누어 정규화 하였다), 각 지형을 표현하는 확률밀도함수 매개변수의 대표치를 구하여 본다. 대수정규 확률밀도함수에 잘 근사하는 주파수 셀들에서만 모든 부엽클러스터 전력 자료와 와이블 확률밀도함수에 잘 근사하는 주파수 셀들에서만 모든 부엽클러스터 전력 자료로 분류하고, 두 부류의 부엽클러스터 전력 자료를 이용하여 각각 대수정규와 와이블 확률밀도함수의 대표 매개변수를 구한다. 세 번째 방법은, 각 주파수 셀의 부엽클러스터 전력들을 각 주파수 셀의 평균 전력 값으로 나누어 정규화하고, 각 지형과 고도 및 속임각별로 부엽클러스터 전력의 확률분포를 표현하는 확률밀도함수 매개변수의 대표치를 구한다. 두 번째 방법에서의 마찬가지로 부엽클러스터 전력 자료를 대수정규와 와이블 확률밀도함수로 분류하고, 두 부류의 부엽클러스터 전력 자료를 이용하여 각 지형과 고도 및 속임각별로 각각 대수정규와 와이블 확률밀도함수의 대표 매개변수를 구한다. 각기 다른 방법으로 구한 대표치들을 비교하여, 구한 매개변수 대표치 값들의 신뢰성을 확인해 볼 수 있을 것이다.

그림 5는 각 도플러 주파수의 클러스터 신호를 대수정규 확률밀도함수와 와이블 확률밀도함수에 근사시킨 후 구한 확률밀도함수 매개변수를 이용하여 구한 클러스터의 평균 전력들과 실제 클러스터 평균 전

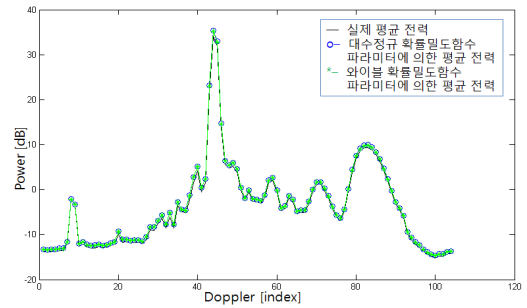


그림 5. 각기 다른 방법으로 구한 클러스터 평균 전력들의 비교

력과의 비교이다. 그림에서 실선은 실제 클러스터 평균 전력이고, 어두운 회색 선(\circ - 모양)은 대수정규 확률밀도함수 매개변수를 이용하여 구한 클러스터 평균 전력이며, 밝은 회색 선(\triangle - 모양)은 와이블 확률밀도함수 매개변수를 이용하여 구한 클러스터 평균 전력이다. 그림 5에서 보듯이 부엽 영역에서 각기 다른 방법으로 구한 클러스터 평균 전력의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 즉, 부엽클러스터 평균 전력은 확률밀도함수 매개변수를 가지고 추정하여도 타당한 평균 전력 값을 얻을 수 있다. 그리고 대수정규 확률밀도함수의 경우, 평균 전력과 관계있는 매개변수 μ 는 전력의 표준 편차와 관계있는 매개변수 σ 와 실제 평균 전력을 이용하여 구할 수가 있으며(와이블 확률밀도함수의 경우도 마찬가지), 평균 전력이 항상 주어지거나 부엽 영역 판단을 위한 임계값 설정 및 표적탐지 임계값 설정과 같은 문제에서는 매개변수 σ 가 중요한 정보가 되고(확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리의 길이 및 P_{fa} 값은 거의 매개변수 σ 만 관련 있다) 매개변수 μ 의 값은 매개변수 σ 로 부터 충분히 타당하게 추정할 수 있다. 그래서 앞으로 구한 대표치를 표시할 때 매개변수 μ 는 생략하고 매개변수 σ 만 표시할 것이다(와이블 확률밀도함수의 경우도 마찬가지).

첫 번째 방법으로 구한 매개변수 대표치를 표 2에 정리하였다. 표 2에서 보통 대표치는 구한 확률

표 2. 첫 번째 방법으로 구한 대표 매개변수와 $P_{fa} < 0.001$ 인 임계값

		대수정규 확률밀도함수		와이블 확률밀도함수	
		보통 대표치	긴 꼬리 대표치	보통 대표치	긴 꼬리 대표치
해면	매개변수	$\sigma = 0.4799$	$\sigma = 0.6971$	$b = 2.2926$	$b = 1.5661$
	임계값(dB)	5.9401	8.3005	4.1873	5.8245
농지	매개변수	$\sigma = 0.6124$	$\sigma = 1.2964$	$b = 1.8588$	$b = 1.0014$
	임계값(dB)	7.4048	13.7495	5.0311	8.3842
공단	매개변수	$\sigma = 0.7441$	$\sigma = 1.4144$	$b = 1.4703$	$b = 0.8455$
	임계값(dB)	8.7843	14.6382	6.1419	9.5467

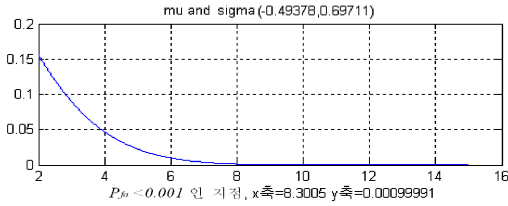


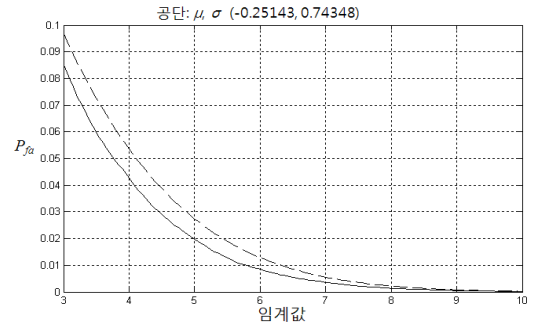
그림 6. 확률밀도함수 매개변수로부터 구한 P_{fa} 곡선의 예

밀도함수 매개변수들의 평균값을 대표치로 삼아 표현한 것을 말하고, 긴 꼬리 대표치는 구한 확률밀도함수 매개변수들 중에서 확률밀도함수곡선의 오른쪽 꼬리를 가장 길어지게 하는 값을 대표치로 삼은 것을 말한다. 임계값은 클러터 평균 전력을 기준으로 구한 $P_{fa} < 0.001$ 를 만족하게 하는 표적 신호의 최소 전력값(dB)으로서(그림 1의 Y), 확률밀도함수 매개변수로부터 구한 값이다. 그림 6은 표 2의 해면 긴 꼬리 대표치 매개변수로부터 구한 표적탐지 임계값에 따른 P_{fa} 변화 곡선이다. 곡선위에는 사용된 매개변수 값을 표시하였고, x축은 임계값(dB), y축은 P_{fa} 를 뜻하며, 곡선 아래에는 $P_{fa} < 0.001$ 를 만족하게 하는 최소 임계값과 이 임계값일 때의 P_{fa} 값을 표시하였다. 표 2의 매개변수들로부터 각 경우의 P_{fa} 곡선을 구할 수 있으며, 이 P_{fa} 곡선들로부터 구한 표적탐지 임계값들을 표 2에 정리하였다.

두 번째 방법으로 구한 매개변수 대표치인 표 3의 값을 표 2의 값과 비교해 보면, 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리의 길이와 관련한 매개변수 값 또는 임계값이 거의 비슷하고 공단의 경우 더 차이 값이 적다. 표 2와 표 3중에서 어떤 값을 사용하는가에 대한 선택은 응용 분야에 따라 다를 것이다(보다 안전한 임계값 설정을 요하는 응용에서 확률밀도함수의 오른쪽 꼬리 부분을 더 안전하게 표현하는 것이 좋을 것이다). 그림 7은 그림 6처럼 표 3의 공단 대표치 매개변수(대수정규 확률밀도함수)로부터 구한 P_{fa} 곡선(점선)과 확보한 부엽클러터 자료(대수정규 확률밀도함수 부류)들에서 표적탐지 임계값을 넘는 전력을 가지는 부엽클러터 자료들의 개수를 구하여

표 3. 두 번째 방법으로 구한 대표 매개변수와 $P_{fa} < 0.001$ 인 임계값(dB)

	대수정규 확률밀도함수의 대표치			와이블 확률밀도함수의 대표치		
	매개변수 (a)	임계값 (모형)	임계값 (실제)	매개변수 (b)	임계값 (모형)	임계값 (실제)
해면	0.50208	6.2	5.65	2.2823	4.25	4.85
농지	0.65413	7.85	6.25	2.0458	4.65	4.15
공단	0.74348	8.8	8.45	1.3081	6.8	9.7



$P_{fa} < 0.001$ 인 지점: model(x축=8.8, y축=0.00097701), real(x축=8.45, y축=0.00097543)

그림 7. 부엽클러터의 P_{fa} 곡선 예 (대수정규 분포, 공단지형)

전체 부엽클러터 자료 개수에 대한 비율로서 구한 P_{fa} 곡선(실선)이다. 곡선 아래에는 $P_{fa} < 0.001$ 를 만족하게 하는 최소 임계값과 이 임계값일 때의 P_{fa} 값을 확률밀도함수 매개변수로부터 구한 값(모형, 점선)과 부엽클러터 자료의 개수로부터 구한 값(실제, 실선)으로 구분하여 표시하였다. 표 3의 매개변수들로부터 각 경우의 P_{fa} 곡선을 구할 수 있으며, 이 P_{fa} 곡선(점선)들로부터 구한 표적탐지 임계값(모형)들을 표 3에 정리하였고, 실선의 P_{fa} 곡선들로부터 구한 표적탐지 임계값(실제)들도 정리하였다. 표 3에서 보듯이 와이블 확률밀도함수가 부엽클러터 분포의 오른쪽 꼬리를 잘 근사하지 못하는 특징 때문에, 와이블 확률밀도함수로부터 구한 임계값(모형)이 실제 임계값(실제)보다 작아서 $P_{fa} < 0.001$ 조건을 만족하는 안전한 임계값을 구하기에 적절하지 못한 것으로 보인다. 특히 공단 경우는 더욱 심하다.

세 번째 방법으로 구한 확률밀도함수들의 대표 매개변수들과 표 3과 같은 방법으로 $P_{fa} < 0.001$ 를 만족하게 하는 최소 임계값들(모형, 실제)을 표 4에 정리하였다. 지형, 고도, 및 속임각별로 대표 매개변수가 어떠하며, 어떠한 경우에 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 길어지고 높은 임계값이 필요한지를 분석해 볼 수 있다. 표 4에서 각 지형과 속임각별로 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 길어지는 고도의 매개변수 값에 음영을 넣어 표시하였다(높은 임계값에도 마찬가지로 음영을 넣었다). 표 4에서 보듯이 대수정규 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 가장 긴 경우는 모든 지형에서 고도 3000ft, 속임각 0도 일 때이다. 속임각 0도와 속임각 20도에서의 대수정규 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리 길이를 비교해 보면, 속임각 0도에서 꼬리가 더 길어지는 경향이 있다(와이블 확률밀도함수의 특성을 가지는 부엽클러터 전력 자료에서도 마찬가지로 경향이 나타난

표 4. 세 번째 방법으로 구한 지형, 고도, 안테나 속임각별 대표 매개변수와 $P_{fa} < 0.001$ 인 임계값(dB)

고도	표시 항목	대수정규 확률밀도함수		와이블 확률밀도함수		
		속임각 0도	속임각 20도	속임각 0도	속임각 20도	
해면	1500 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.5448		2.0182	
		임계값(모형)	6.7		4.7	
		임계값(실제)	5.65		5.6	
	3000 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.5479	0.4976	2.1582	2.2547
		임계값(모형)	6.75	6.15	4.45	4.25
		임계값(실제)	5.95	5.45	4.95	4.9
	5000 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.4912	0.5226	2.3323	2.2705
		임계값(모형)	6.1	6.45	4.15	4.25
		임계값(실제)	5.4	5.9	4.85	4.8
	6500 ft	매개변수(σ 또는 b)		0.4187		2.3413
		임계값(모형)		5.25		4.15
		임계값(실제)		5.55		4.65
농지	1500 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.5973		2.1797	
		임계값(모형)	7.25		4.4	
		임계값(실제)	5.65		5.5	
	3000 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.9033	0.5507	1.7458	2.2141
		임계값(모형)	10.4	6.75	5.35	4.35
		임계값(실제)	6.55	6.35	5.6	5.15
	4000 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.5012		2.2677	
		임계값(모형)	6.2		4.25	
		임계값(실제)	5.3		4.9	
	5000 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.4997	0.5532	2.2903	2.2743
		임계값(모형)	6.2	6.8	4.2	4.25
		임계값(실제)	4.95	5.85	5.15	5
6500 ft	매개변수(σ 또는 b)		0.4438		2.3234	
	임계값(모형)		5.55		4.15	
	임계값(실제)		4.9		6.6	
공단	3000 ft	매개변수(σ 또는 b)	1.0115	0.6320	1.0017	1.684
		임계값(모형)	11.4	7.65	8.4	5.5
		임계값(실제)	10.45	7.1	10	6.9
	4000 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.8152		1.9468	
		임계값(모형)	9.5		4.85	
		임계값(실제)	8.85		5.1	
	5000 ft	매개변수(σ 또는 b)	0.8836	0.6395	0.9526	1.8674
		임계값(모형)	10.2	7.7	8.75	5.05
		임계값(실제)	9.5	7.35	9.3	6.25
	6500 ft	매개변수(σ 또는 b)		0.6205		1.8107
		임계값(모형)		7.5		5.15
		임계값(실제)		6.6		6

다). 속임각 20도인 경우에 대수정규 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 가장 길 때는 모든 지형에서 고도 5000ft일 때이다. 가장 긴 와이블 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리를 가지는 경우는 공단 지형의 고도 5000ft, 속임각 0도에서이다. 이것은 대수정규 확률밀도함수와 다른 고도인 듯하지만, 와이블 확률밀도함수가 부엽클러터 전력 분포의 오른쪽 꼬리 부분을 제대로 근사화하지 못하는 경향이 있음을

참고한다면, 실제로 확률분포 곡선의 오른쪽 꼬리가 길어질 때는 대수정규 확률밀도함수와 잘 근사하는 부엽클러터 전력 자료와 마찬가지로 공단 지형의 고도 3000ft, 속임각 0도에서 이다(실제 부엽클러터 전력 분포에 대한 곡선을 그려서, 확인해 본 결과는 공단 지형의 고도 3000ft, 속임각 0도에서 분포의 오른쪽 꼬리가 가장 길며, 표 4의 음영이 들어있는 실제 임계값에서도 같은 사실을 확인할 수 있다).

표 4의 각 확률밀도함수에서 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 가장 길어지는 확률밀도함수 매개변수들을 표 2의 긴 꼬리 대표치 매개변수들과 비교해 볼 만하다. 표 2의 긴 꼬리 대표치는, 모든 부엽클러터 전력 자료들 중에서 평균 전력이 이산적이고 뚜렷한 꼭지점을 보이는 주파수 셀들의 부엽클러터 전력 자료에 대하여 확률밀도함수 근사화를 통해 확률밀도함수 매개변수 값을 추정하고, 그 추정한 확률밀도함수 매개변수 값들 중에서 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리를 가장 길어지게 하는 값을 대표치로 삼은 것을 말한다. 그리고 표 4의 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 가장 길어지는 확률밀도함수 매개변수들은 어떤 지형, 고도 및 속임각에서 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 길이가 가장 길어지는 지를 보여준다. 각 표의 값들 중에서 어떤 값을 사용하는가에 대한 선택은 응용 분야에 따라 다를 것이다. 모든 표들에서 확인 가능 하듯, 해면, 농지, 공단 지형의 차례로 갈수록 확률 밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 길어지며, 높은 표 적담치 임계값을 필요로 한다. 확률밀도함수 매개변 수의 대표치로서 확률밀도함수 매개변수들의 평균의 의미가 있는, 표 2의 보통 대표치들과 표 3의 매개 변수 대표치들도 서로 비교해 볼 만하다.

IV. 결 론

탐색기의 항공기 탐재시험 결과 자료를 이용하여, 여러 지형 및 상황에 대한 부엽클러터 전력의 확률분 포를 표현하는 확률밀도함수 및 확률밀도함수 매개변 수를 구함으로써, 부엽클러터를 확률 통계적으로 분석하였다. 또한 퇴각표적 탐지 임계값과 원하는 수준의 P_{fa} 값 사이의 관계를 분석하였다. 본 논문의 자료 는 HPRF 모드를 사용하는 마이크로파 탐색기에서 부엽클러터의 영향이 중요해지는 하방 퇴각표적의 탐 지, 추적에 관한 방법 연구 및 일정 오경보 처리에서 임계값 결정(그림 1의 내용), 부안테나를 이용한 부 엽클러터 제거 등의 다양한 분야에 이용될 수 있다.

HPRF 모드 탐색기의 항공기 탑재시험 결과로부터 획득한 지표면 부엽클러터 전력의 확률분포는 대수정규와 와이블 확률밀도함수로 표현할 수 있었으며, 공단 지형의 부엽클러터 전력은 확실한 대수정규 확률밀도함수의 분포 특징을 보였다. 해면, 농지, 공단 지형의 차례로 갈수록 부엽클러터 전력의 확률분포를 표현하는 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 길어지며, $P_{fa} < 0.001$ 이 되도록 하는 표적탐지 임계값이 커진다. 모든 지형의 고도 3000ft에서 그리고 안테나 숙임각 0도에서 대체로 부엽클러터 전력의 확률분포를 표현하는 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 길이가 가장 길며, 높은 표적탐지 임계값이 필요하다.

각 지형, 고도, 그리고 안테나 숙임각별로 부엽클러터 전력의 확률분포를 표현하는 대수정규와 와이블 확률밀도함수의 대표적인 매개변수와 $P_{fa} < 0.001$ 이 되도록 하는 표적탐지 임계값을 표로 정리하였다. 또한 지형별로 부엽클러터 전력의 확률분포를 표현하는 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 가장 길어지는 경우를 표에 보였다. 본 논문의 결과 자료들은 응용분야에 따라 적절히 선택하여 사용하여야 할 것이다. 예를 들면, P_{fa} 가 원하는 수준 이상으로 유지되는 엄격한 표적탐지 임계값을 구하고자 한다면, 확률밀도함수 곡선의 오른쪽 꼬리가 가장 길어지는 매개변수를 이용하여(최악의 경우를 고려하여) 임계값을 정하는 것이 좋을 것이다.

참 고 문 헌

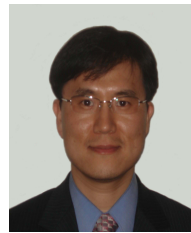
- [1] G.W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 2nd edition, SciTech, Inc., 1998.
- [2] G. Davison, H.D. Griffiths, and S. Ablett, "Analysis of high-resolution land clutter," *IEE Proc.-Vis. Image, Signal Process.*, 151(1), pp. 86-91, Feb. 2004.
- [3] K.R. Menon, N. Balakrishnan, M. Janakiraman, and K. Ramchand, "Characterization of fluctuation statistics of radar clutter for Indian terrain", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), pp. 317-324, Mar. 1995.
- [4] J.B. Billingsley, A. Farina, E. Gini, M.V. Greco, and L. Verrazzani, "Statistical analysis of measured radar ground clutter data," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 35(2), pp. 579-593, Apr. 1999.
- [5] F.T. Ulaby and M.C. Dobson, *Handbook of*

Radar Scattering Statistics for Terrain, Artech House, 1989.

- [6] R.M. Thompson, "Distribution losses for Weibull and lognormal clutter types", *IEEE Digital Avionics Systems Conf.*, Vol. 1, pp. 7c7/1-7c7/5, Oct. 2000.
- [7] S. Wang, W. Hu, J. Liu, and Y. Wang, "Method for radar clutter distribution test based on distribution transform", *IEEE International Conf. on Radar*, pp. 1-3, Oct. 2006.
- [8] E.K. Al-Hussaini, "Performance of an ordered statistic CFAR processor in log-normal clutter", *Electronics Letters*, 24(7), pp 424-425, Mar. 1988.
- [9] M.I. Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd edition, McGraw-Hill, 1990.

김 태 형 (Tae-Hyung Kim)

정회원



1999년 2월 부산대학교 전자공학과 석사
 2007년 2월 부산대학교 전자공학과 박사
 2007년~현재 국방과학연구소 연구원
 <관심분야> 레이더 신호처리, 음성인식, 영상처리, 패턴인식, 지능정보처리

이 재 응 (Jae-Woong Yi)

정회원



1991년 2월 한국과학기술원 정밀공학과 석사
 1996년 2월 한국과학기술원 기계공학과 박사
 1996년~현재 국방과학연구소 연구원
 <관심분야> 레이더 신호처리, 유도탄 탐색기, 김발/서보 제어

변 영 진 (Young-Jin Byun)

정회원



1984년 2월 서울대학교 전기공학과 학사
 1986년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
 1986년~현재 국방과학연구소 연구원
 <관심분야> 레이더 신호처리, 영상처리, 통신 신호처리