

레이다 신호처리 기술

郭 漢 吉

國防科學研究所 技術研究本部

I. 서론

레이다는 인간의 가시거리 한계를 초월하여 원거리에 있는 물체의 존재를 탐지하는 센서로서 기상 여건이나 주야 관계없이 전천후 기능을 가지고 단거리부터 수평선 너머 지구 반대편의 장거리 물체까지 탐지할 수 있는 고유한 신호의 특성이 있기 때문에 기존의 광학 수단을 이용한 방식과는 완전히 다른 전자파 센서이다. 레이다(RADAR)의 어원은 원래 RAdio Detection And Ranging 의 약어로서 무선전파에 의한 표적의 존재유무 및 거리정보를 파악하는 것이 초기 레이다의 가장 기본적인 기능이였다. 1920년대에 최초로 레이다가 개발된 이래 과학기술의 발전과 더불어 기본적인 표적 탐지 기능은 물론 표적 식별을 위한 고해상도 레이다 영상에 이르기까지 괄목할만한 발전을 거듭해 오고 있다. 레이다는 전자파를 이용하여 원거리의 표적을 볼 수 있는 전천후 “전자 눈(Electronic Eye)”으로서, 항공 운항 및 관제, 지구 및 우주탐사, 기상관측, 선박 항해, 자동차 속도 측정 및 충돌방지 등의 민수응용뿐만 아니라 조기경보, 전장 및 항만감시, 대공방어, 미사일 유도통제 등의 군사용으로 현대전의 각종 무기체계 속에서 그 역할이 매우 중요해지고 있다. 그 중에서도 특히 레이다 신호처리기술은 레이다의 주변환경과 임무에 능동적으로 대처할 수 있는 스마트한 기능들을 레이다에 부여하는 두뇌 역할을 하고 있기 때문에 그 필요성과 중요성이 날로 증대되고 있다.

레이다 신호처리 기술은 표적이 존재하는 주변의 강한 클러터 및 위협적인 재밍환경 특성의 변화에 능동적으로 적응하여, 표적의 존재 유무, 표적의 위치,

속도 및 표적식별 등의 정밀한 표적정보를 실시간으로 추출하는 제반 표적획득 처리 기법을 말한다. 일반적으로 레이다 신호는 송신된 전자파 에너지가 표적으로부터 반사되어 올 때 원하는 표적으로부터 미약하게 반사된 신호외에도 표적이 존재하는 주변의 원하지 않는 물체에 의해 반사된 강한 클러터 및 인위적인 방해 전파나 간섭잡음 등을 많이 포함하고 있기 때문에, 이들 복합적인 신호로부터 미약한 표적 신호만을 완전히 분리하여 탐지한다는 것이 용이하지 않다. 특히 클러터 및 간섭잡음 등의 분포 특성은 시간적, 공간적, 스펙트럼 영역에서 레이다 환경 지형, 해상 및 기상 상태 등에 따라 다각적으로 변하고 있으므로 표적 및 클러터의 통계적 특성의 변화에 따라 능동적으로 적응가능한 신호처리 기법들이 필요하게 되었다. 1970년대 들어와서 디지털 기술의 발전으로 마이크로프로세서와 집적회로 등을 이용한 디지털 신호처리 기술을 레이다에 적용함으로써, 클러터 제거용 디지털 MTI 필터, 펄스도플러 FFT 처리 및 표적의 자동탐지와 추적, 표적영상 형성기술 등을 이용하여 레이다의 기능을 다양화하고 성능을 대폭 향상시킬 수 있었다. 더구나, 고해상도의 레이다 영상기술이 개발되어 원하는 지역의 레이다 영상사진을 얻어서 표적을 식별하거나, 지형의 탐사 및 정찰에 활용할 수 있게 되었으며, 1980년대에는 지구 수평선 너머까지 탐지할 수 있는 OTH(Over-The-Horizon) 레이다가 개발되어 수천 킬로미터 이상의 원거리 표적을 탐지할 수 있게 되었다. 최근 레이다 신호처리기술은 급속한 발전을 가져온 디지털 신호처리 기술의 발달과 함께 고속의 디지털 신호처리 소자(DSP)의 도움으로 최신 신호처리 알고리즘들을 레이다에 적용할 수 있게 되었다. 특히 레이다 주변환경

의 변화에 능동적으로 적응하고 레이더의 기능과 임무를 필요에 따라 바꿀 수 있는 적응 신호처리 개념이 도입되었으며, 프로그램 가능한 신호처리기(PSP) 구현기술의 개발로 인해 기본 하드웨어의 변경없이 필요에 따라 알고리즘을 변경함으로써 다양한 기능을 수행할 수 있음과 동시에 하드웨어의 복잡성을 줄이고 구조를 모듈화할 수 있게 되었다. 1990년대 이후의 레이더 센서의 발전은 더욱 고도의 지능화, 고밀도화 되어가는 간섭 및 방해전파 환경에서도 표적탐지 오경보율을 최소화 하면서 탐지확률을 높일 수 있는 기법들이 개발되고, 또한 표적탐지는 물론 탐지된 표적을 자동으로 식별 인식할 수 있는 기법들을 적용하여 보다 지능적인 레이더 센서를 위한 최신 신호처리 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 먼저 레이더 주변 환경 특성 및 신호의 특성을 살펴보고 이들을 처리하는데 필수적인 주요 알고리즘들을 개괄적으로 고찰한다. 끝으로, 응용분야와 발전추세 등에 관해 살펴보고자 한다.

II. 레이더 신호 환경 특성

레이더 신호처리를 하기 위해서는 먼저 처리하고자 하는 신호의 특성을 살펴 볼 필요가 있다. 신호의 환경 특성은 레이더가 위치하는 주변환경에 따라 반사 물체의 전파특성이 다르기 때문에 주로 레이더 종류에 따라 지상, 해상, 항공기 및 위성 등의 탐재 플랫폼과 사용 전파의 주파수에 의해 정해진다. 레이더 신호는 <그림 1>에서 보는 주변환경과 같이 표적이 존재하는 주변 특성에 따라 일정하지 않고, 시간적, 공간적, 스펙트럼 영역에서 변하고 있으며, 표적에 의한 미약한 반사신호 이외에도 “클러터”(Clutter)라고 하는 원하지 않는 주변 물체에 의한 강한 반사신호와 재밍 등의 간섭 잡음이 복합적으로 섞여있기 때문에, 이들 복합적인 클러터 크기에 비하여 상대적으로

로 보통 100배 내지 10만배 정도의 매우 미약한 표적 신호만을 분리하여 표적의 위치, 속도, 종류등 표적 정보를 실시간으로 추출한다는 것이 용이하지 않다. 이들 복합적인 신호들은 분포특성이 일정하지 않기 때문에 통상적인 종류에 따라 통계적인 모델로 구분하여 레이더 설계시에 신호처리 모델로 이용한다. 클러터는 레이더 신호의 사용목적에 따라 표적신호와 구분되는데 일반적인 표적탐지 레이더의 경우 주로 지면, 해면, 비, 구름, 조류, 채프와 같은 원하지 않는 물체로부터 반사된 신호에 의해 발생한다. 먼저 클러터 신호의 특성은 크게 시간영역에서 송신된 전파가 반사 물체의 단면적(Radar Cross Section)에 비례하여 되돌아오는 신호의 진폭특성의 변화 성분과 이것을 주파수 영역에서 도플러 효과에 의한 스펙트럼 변화 특성을 통계적 모델로 구분한다. 클러터는 주변 지형상태에 따라 반사 표면 상태가 달라지고, 비와 같이 기상상태에 따라 체적 분포 상태가 달라지므로, 일반적으로 표면 클러터와 체적 클러터로 모델링된다. 이와 같은 레이더 주변 클러터 종류에 따른 분포 특성을 거리 및 도플러 영역으로 종합하여 도시하면 <그림 2>와 같다. 이러한 표적 및 클러터 모델은 최적의 레이더 신호처리기를 설계하거나 분석하는데 목적이 있으며, 실제 클러터의 특성은 랜덤 프로세서이므로 실상함과 모델의 오차를 줄이기 위한 적응 모델이 필수적이다. 이러한 클러터 및 표적신호의 환경 특성을 이용하여 클러터의 반사 세기를 감소시키거나 제거하는 기법들이 요구된다.

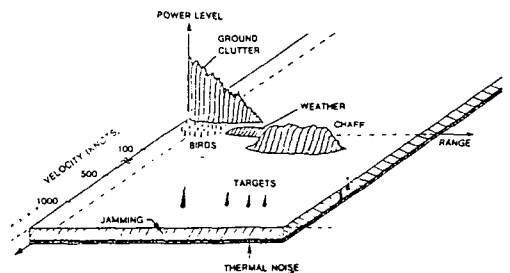


그림 2. 클러터 환경 특성

대표적인 클러터는 지면에 의해 반사되는 지면 클러터로서, 클러터의 반사도는 클러터의 종류, 전자파의 입사각, 사용 주파수, 분극의 종류에 따라 영향을 받는다. 그러나, 지면 클러터는 그 움직임이 매우 느리고 평균 도플러 중심 주파수는 거의 영에 위치하며

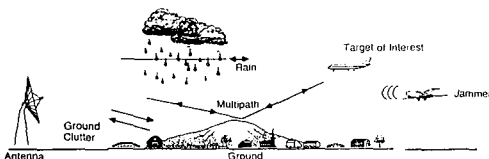


그림 1. 레이더 주변환경 특성

분포의 정도는 주변풍속 등에 따라 변한다. 지면 클러터의 경우 스펙트럼 분포모델을 가우시안 모델 등으로 근사화시킬 수 있다. 해면 클러터는 지면 클러터에 비해 시간에 따른 변화가 크고 공간적인 변화는 작게 나타난다. 해면 클러터는 풍속 및 해수면의 상태에 따라 반사특성이 서로 다르기 때문에 파도의 높이에 따라 해면 상태를 여러 등급으로 구분하여 해면 클러터의 반사도를 정의한다. 해면 클러터의 평균 도플러 스펙트럼은 영보다 크고, 해수면의 요동정도가 크지면 스펙트럼 분포폭이 넓어지므로 클러터 제거가 용이하지 않다.

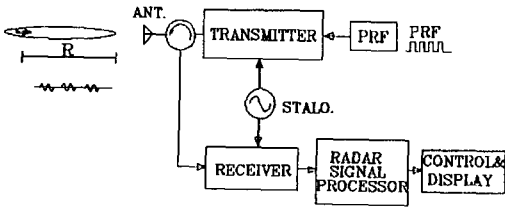
또한, 기상의 변화에 따른 구름이나 비에 의한 클러터는 스펙트럼상에서 표적 주파수 영역에 나타날 확률이 가장 높기 때문에 클러터 필터링에서 가장 심각하게 고려된다. 비클러터의 단위 체적당 반사도는 레이다의 주파수, 분극, 강우량 등에 영향을 받으며, 스펙트럼 분산은 고도에 따른 바람층, 바람의 세기 및 요동, 안테나의 빔폭, 강우속도 등의 각 성분을 고려하여 결정된다.

표적의 분포특성은 레이다 표적 탐지과정에서 탐지 확률을 설정하는데 매우 중요한 역할을 한다. 먼저 표적의 분포 모델을 설정하기 위하여 표적의 유효 반사면적은 표적을 구성하고 있는 여러 개의 반사요소로부터 반사되는 신호의 벡터 합으로 나타낼 수 있다고 본다. 이때 유효 반사면적은 레이다빔이 표적을 바라보는 입사 각도, 사용 주파수, 편파 특성 및 표적의 움직이는 정도에 따라 여러 형태로 변하게 된다. 따라서, 복잡한 표적의 변화 특성에 따라 표적 변화 분포 모델은 유효반사면적이 변하지 않을 경우 탐지 확률값을 기초로 하여 유효 반사면적이 변하는 속도와 표적을 구성하고 있는 반사요소의 통계적 분포특성에 따라 다섯가지 Swerling 모델로 분류하고 있다. 먼저, Swerling 모델 0은 표적이 변동하지 않는 경우이고, 모델 I과 III는 표적 특성의 변화 주기가 레이다 안테나의 회전 속도 정도의 느린 표적모델을 말하고, 모델 II과 IV는 표적이 매 빔폭 단위 내에서 표적에 송신하는 펄스반복 주기단위로 특성의 변화를 보이는 빠른 표적모델을 의미한다. 실제 레이다 주변환경의 신호변화는 매우 복잡하기 때문에 레이다를 설계할 때 이러한 통계적 모델을 이용하여 주어진 표적특성에 대한 탐지 확률을 설정하고, 표적의 변화 정도와 주변잡음의 크기 및 변동에 따라 표적탐지 오경보율을 결정하게 된다.

Ⅲ. 레이다 신호의 특성과 처리

1. 레이다 기본 구성

레이다의 기본 개념은 비교적 간단하지만 레이다를 실제 구현하기는 용이하지 않다. 레이다가 움직이는 물체를 탐지하기 위하여는 레이다로부터 표적까지의 거리와 움직이는 물체의 도플러 성분을 측정하는 원리를 이용한다. 레이다에서 표적까지의 거리 R 는 송신 펄스가 표적에 반사되어 수신될 때까지의 왕복시간을 측정하므로써 구하며 $R=cD/2$ 로 주어진다. 여기서 c 는 빛의 속도이고 D 는 송신펄스와 수신펄스간의 지연시간 차이이며, 주어진 송신펄스의 반복주기 T 보다 작다고 가정한다. 그러나 사용 PRF(Pulse Repetition Frequency)의 선정에 따라서 T 는 탐지 거리 범위를 넘어설 수 있는데 이는 거리 모호성으로 설명된다. 움직이는 표적에 의한 도플러 편이 효과는 송신 주파수와 수신 주파수간의 차이에 의하여 결정되는데, 실제 도플러 주파수 f_d 는 물체의 상대적인 이동속도에 비례하고 송신 주파수의 파장에 반비례하는 관계식에 의하여 $f_d=2V/\lambda$ 로 주어진다. 여기서 V 는 표적속도, λ 는 송신 주파수의 파장이다. 일반적으로 송신 주파수는 일정한 대역폭을 가지고 있으며, PRF의 펄스폭 동안 펄스 반복주기로 특정 파형을 송신 캐리어 주파수에 변조시킨 후 레이다 빔이 표적에 머무는 시간 단위로 송신한다. 따라서 특정거리에 있는 표적에서 반사되어 오는 신호를 수신하여 송신 주파수와 위상 변이를 검파한후 표적신호의 도플러 변화 크기를 매 드웰 시간 단위 및 거리셀 별로 코히어런트 적분하여 특정거리와 표적의 속도 성분을 탐지한다. 펄스 도플러 레이다의 기본 구조는 <그림 3>에 도시되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 원하는 탐지 목적에 적합한 펄스파형을 발생시켜 이것을 코히어런트 발진기의 중간 주파수로 변조시킨 다음, 최종적으로 송신 주파수에 실은 후, 증폭시켜서 안테나를 통하여 송신한다. 표적으로부터 반사된 신호는 안테나를 통하여 수신단에 들어온다. 이때 송신 캐리어 성분은 믹서를 이용하여 제거하고 저잡음 수신기를 통하여 중간주파수 밴드에서 증폭한 다음 송신신호와 같은 코히어런트 발진기에서 나오는 기준 변조 신호와 비교하므로써 수신 신호의 위상 변이를 검출한다. 위상 검출기의 출력은 코히어런트 위상 신호 정보를 위해 동위상(In-Phase) 및 90도 위상변이(Quadrature-Phase) 신호로 나누어진다. 이 비디오 신호는



(a)

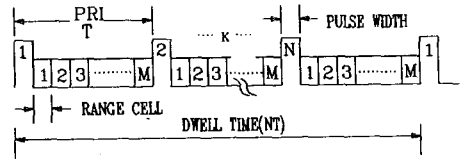
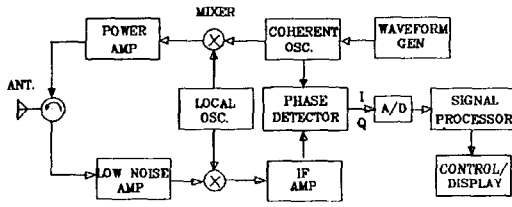


그림 4. 레이더 펄스 반복 주기 구조



(b)

그림 3. 레이더 구성도

적절히 디지털이징되어 레이더 신호처리 과정을 거치게 된다. 레이더 신호처리기에서는 클러터 신호를 제거하고 표적을 탐지한 후 표적에 대한 위치, 속도, 가속도, 표적의 정체 등에 대한 표적정보를 추출하여 사용자의 전시기에 최종 결과를 전시하여 준다. 신호 처리의 기능에 대해서는 다음에 자세히 설명한다.

2. 펄스 도플러 신호특성

(1) 시간 영역 특성

시간영역에서 움직이는 표적의 도플러 변이와 표적 신호 샘플링 관계를 살펴봄으로써 신호처리를 위한 물리적인 의미를 파악해 볼 수 있다. 먼저 특정 시간 $t=0$ 에서 주파수 f_c 로 송신되는 레이더 신호 $s(t)$ 를 복소함수로 표시하면 $s(t)=m(t)\exp(j2\pi f_c t)$ 와 같다. 여기서 $m(t)$ 는 레이더 파형 신호로써 대역폭은 송신하는 PRF의 펄스폭에 의해 결정되며 단순 펄스 게이트 함수로 가정한다. 이러한 송신신호는 펄스 반복주기가 T 이고 폭이 τ 인 PRF로 송신된다. 이상적인 경우에 클러터 잡음의 영향이 없는 대공 비행표적이 레이다로부터 R_0 의 거리에 있다면 t_0 에 송신되어 T_0 시간 후에 수신된 신호는 $r(t)=m(t-T_0)\exp [j2\pi f_c (t-T_0)]$ 와 같고, 여기서 T_0 는 송신펄스가 표적으로부터 반사되어 수신되기까지의 시간지연으로 $T_0=2R_0/c$ 로 주어진다. 여기서 c 는 빛의 속도이다. 비행표적이 거

리 R_0 로 부터 광선방향 속도(Radial Velocity) V m/s로 레이다를 향하여 등속 이동한다면 표적의 이동거리는 $R(t)=R_0-Vt$ 로 주어지며, 이때 표적속도로 인한 왕복시간 지연은 $D=T_0-2Vt/c$ 로 주어지므로 수신신호는 $r(t)=m(t-D)\exp [j2\pi f_c (t-T_0+2Vt/c)]$ 와 같다. 코히어런트 수신기에서 송신 캐리어 주파수 성분은 믹서를 통하여 제거되고 위상 변이 성분만 복소함수 형태로 남게 되는데 이것을 레이더에서는 비디오 신호라고 한다. 실제 비디오 신호 변환과정은 IF 단을 거쳐서 나오는 실수 성분의 동위상(In-phase) 신호를 이용하여 90도 위상 변이(Quadrature)된 허수성분 신호를 만들어서 베이스 밴드에서 I/Q 비디오를 얻게 된다. <그림 4>에서 보는 바와 같이 첫번째 PRF를 송신한 뒤 T 시간 동안에 수신된 비디오 신호로부터 k 번째 송신한 PRF에 의하여 수신된 비디오 신호를 표시하면 다음과 같다.

$$v(t,k)=m(t-D)\exp [-j2\pi f_c (t-T_0+2Vt/c-2Vkt/c)] \quad (1)$$

여기서 k 는 펄스수이고, 복소함수의 첫항은 초기 표적과 레이다간의 거리에 의한 위상지연 성분이고, 둘째항은 거리방향으로 시간에 따른 표적 등속운동에 의한 위상 변이 성분이고, 셋째항은 동일 거리셀에서 방위각 방향으로 드웰시간 동안 PRI시간에 따라 표적 등속운동에 의한 도플러 위상지연 크기를 나타낸다. 즉,

$$\text{거리방향 성분} : v(n\tau) = \exp(-j4\pi f_c Vn\tau/c) = \exp(-j2\pi f_c \Delta n\tau) \quad (2)$$

$$\text{방위방향 성분} : v(kT) = \exp(-j4\pi f_c VkT/\lambda) = \exp(-j2\pi mk/N) \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서, $PRF=1/T=f_s$, 도플러 주파수 $f_d=m\Delta f$ 로 표시되며, Δf 는 필터 बैं크의 밴드폭, m 은 주어진 PRF 내에 들어있는 필터 बैं크의 수, N 은 퓨리에 변환시 주파수 해상도를 나타내는 지수으로써

$N=f_s/\Delta f$ 로 주어진다. 따라서, 윗식에서 보는 바와 같이 거리방향 신호는 거리셀 단위로 펄스압축과 같은 정합필터를 이용할 수 있고, 방위방향 신호는 도플러 필터를 이용하여 표적 신호를 탐지할 수 있다. 표적의 도플러 주파수보다 낮은 PRF를 사용하는 레이다에서는 신호의 샘플링 원리에 의해 도플러 주파수 중첩(Aliasing) 효과가 나타나서 정확한 표적 속도 성분을 찾기 어렵다는 것을 알 수 있다.

(2) 스펙트럼 영역 특성

주파수 영역에서 신호의 특성은 송신펄스의 대역폭, 펄스반복 주파수, 스펙트럼 선의 수 및 송신 주파수 등에 의하여 결정된다. 송신하고자 하는 레이다 파형 신호 $m(t)$ 는 펄스 폭이 τ 이고 주기가 T 인 단순 펄스 신호로 가정하고 N 개의 펄스를 CPI 시간 단위로 게이트 함수에 의해 드웰 시간 동안 송신하고 수신하는 경우를 고려한다. 각 신호를 주파수 콘볼루션을 이용하여 송신 주파수 $\text{Cos}(\omega ct)$ 와 변조된 송신 신호를 주파수 스펙트럼으로 도시하면 <그림 5>와 같다. 주파수 성분은 캐리어와 양 측파대로 나뉘어지며, 전체 진폭 특성은 Sinc 특성을 가진다. 스펙트럼 선은 PRF 간격이고 펄스 폭이 좁을수록 전체 대역폭은 넓어지고, CPI 동안에 누적하는 펄스수가 많을수록 각 스펙트럴 라인의 밴드폭은 좁아진다. 레이다 표적 및 클러터 성분은 각 PRF 스펙트럼 선을 중심으로 반복적으로 함께 존재하며, 이동 표적은 송신 주파수로부터 도플러 편이 크기 만큼 이동되어 PRF 밴드 사이에 나타난다. 이동 표적의 도플러 주파수는 근접하는 표적에 대해서는 “+”로 나타나고, 멀어지는 표적에 대해서는 “-”로 나타난다. 그림과 같이 MTI 필터는 첫번째 PRF 라인 사이에 하나의 대역통과 필터가 있는 경우이고, 도플러 필터뱅크는 이 구간 사이에 다수의 협대역 필터를 사용하여 클러터 성분을 제거하고 표적 성분은 통과시키는 역할을 한다. 물리적으로 볼 때 표적의 도플러 주파수 성분을 추출하기

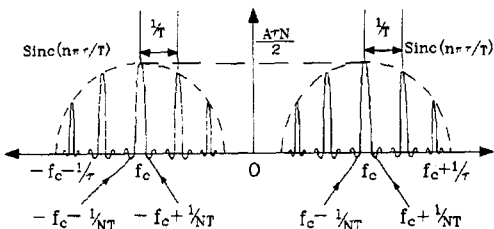


그림 5. 레이다 펄스 신호 스펙트럼

위해서는 동일 표적에 대하여 하나의 펄스만을 보내어 샘플해서는 얻을 수 없으므로 주어진 CPI 동안 다수의 펄스를 N 개 모아서 PRF 선의 대역폭이 $1/NT$ 가 되도록 하여 코히어런트 위상정보를 추출할 수 있게 된다. 이러한 대역폭을 정보대역 이라고 하며, 이 대역폭으로 도플러 필터 बैं크를 선정하면 표적의 스펙트럼 에너지를 손실없이 수신할 수 있다.

3. 레이다 신호처리 단위

레이다가 표적을 탐지하기 위해서는 PRF 단위로 들어오는 수신 펄스 신호를 일정한 시간단위로 샘플링하여 처리하게 된다. PRF는 레이다가 표적의 움직임을 바라보고 표적 신호를 샘플링하는 주파수가 되며, 표적의 이동속도와 표적이 머무는 거리에 따라서 적절한 표적 샘플링 PRF를 정하여 사용한다. 송신 및 수신하는 단위는 표적이 주어진 안테나 3dB 빔폭 내에 머무는 시간 동안 신호를 송신하고 반사신호를 수신하여 이루어지게 된다. 이 단위를 드웰 시간(Dwell Time) 또는 표적 주사시간(Target Illumination Time)이라고 하는데 이것은 주어진 안테나 회전율(RPM)과 안테나의 3dB 빔폭의 크기에 따라 정해진다. <그림 6>에 레이다 신호처리 기본 단위가 도시되어 있다. 그림에서와 같이 드웰 시간 내에서는 표적의 움직임이 동일 빔내에서 이루어지므로 반사신호가 위상의 연속성을 유지할 수 있고 펄스 도플러 신호를 코히어런트 처리하기 위하여 주어진 드웰 시간내에서 몇개의 블록으로 나누어서 도플러

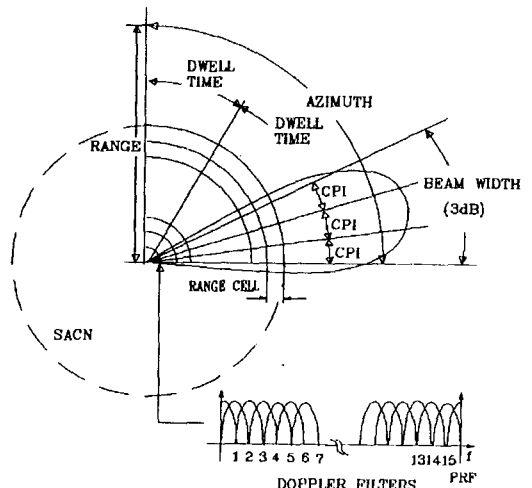


그림 6. 레이다 신호처리 단위

위상정보를 처리하는데, 이 시간 단위를 CPI(Coherent Processing Interval)라고 한다. 그리고 주어진 탐지 거리 범위 내에서 송신 펄스폭에 해당하는 거리 해상도에 따라 거리를 셀(Cell) 단위로 나누어 처리한다. 그리하여 동일 거리셀을 방위각 방향으로 CPI 동안 모아서 도플러 필터를 구성하는데 이를 도플러 필터 밴드 셀이라고 한다.

4. 레이더 신호처리 원리

디지털 신호처리 기술을 이용하여 레이더 신호처리기를 구성하면 <그림 7>과 같은 기능들을 포함할 수 있다. 수신기를 통하여 들어온 아날로그 신호는 A/D 변환기를 이용하여 먼저 디지털 신호로 바꾼다. 펄스 반복주기 동안 특정 거리셀로부터 반향되어 들어오는 송신펄스와 수신펄스 신호의 변화를 거리셀 방향으로 처리하여 신호대 잡음비를 향상시키기 위해 정합필터(Matched Filter)를 거친다. 특히 송신출력을 증가시키지 않으면서 탐지거리를 증가시키기 위해서, 송신시 주어진 펄스폭을 확장하여 특정 코드를 포함한 파형을 변조하여 송신하고 수신시에 이를 송신코드에 정합시켜서 원하는 거리 해상도를 얻을 수 있는 펄스 압축(Pulse Compression) 과정을 거친다. 레이더 표적으로부터 반사되는 신호중에는 주변의 불필요한 클러터나 간섭 잡음을 포함하고 있으므로 이를 제거하기 위해 클러터 필터를 거치게 된다. 이들 펄스 신호를 동일 거리셀 단위로 방위각 방향으로 드웰시간 동안 모아서 도플러 성분이 없는 정적인 클러터 성분은 필터로 제거하고 도플러 편이 성분이 있는 이동 표적 신호는 통과시키는 필터링 기능을 이동표적 지시기(MTI)라고 한다. 이 경우는 PRF 내에 하나의 대역 필터만 존재하므로 이동표적 성분은 통과시킬 수 있지만 표적신호가 클러터 성분과 복합적으로 존재할 때 이들을 분리하여 탐지하기 어렵다. 이러한 경우에 표적 신호의 도플러 성분을 탐지하기 위하여

PRF 내에 다수의 협대역 필터 बैं크를 구성하여 코히어런트 펄스 누적을 수행하는데, 이러한 과정을 도플러 필터링이라고 한다. 이때 동일 위상의 표적신호 벡터성분은 강화되고 위상 변화가 일정하지 않은 잡음신호의 벡터 합은 상대적으로 작아지기 때문에 신호대 잡음비가 높을 뿐만 아니라 다수의 협대역 필터를 이용하여 표적의 도플러 주파수 성분 추출도 용이한 방식이다. 일단 클러터를 제거한 후, 주어진 레이더 주변 환경 신호특성을 고려하여 표적 탐지 확률을 높이면서 동시에 잡음성분으로 인한 오탐지율을 일정하게 유지시킬 수 있는 CFAR(Constant False Alarm Rate) 탐지기를 거쳐서 특정 거리셀에 있는 표적의 위치를 판단하게 된다. 이러한 과정에서 표적셀을 중심으로 주변 잡음 크기의 문턱치를 비교할 때 단순히 거리 축으로 반사신호의 진폭크기 성분만을 이용하는 경우를 Range-CFAR 탐지기라고 한다. 그러나 각 거리 셀의 진폭크기를 몇 개의 펄스군으로 모아서 협대역의 도플러 정보 밴드 별로 나누어서 거리 및 도플러 영역에서 각각 주변셀의 진폭 크기를 비교하여 표적을 탐지하는데 이를 Range/Doppler-CFAR 처리라고 한다. 일단 탐지된 표적은 주어진 거리, 방위, 고도 및 속도 필터 셀 주변에 분포된 표적성분을 잠정적인 표적으로 탐지한 것이므로 이러한 분산된 정보군으로부터 표적의 중심 거리, 방위, 고도, 및 속도 등을 찾는 과정을 표적 중심 추출이라 한다. 또한, 탐지된 표적의 정체에 대한 정보를 얻기 위해 표적을 분류 및 식별과정을 거치고, 표적의 움직임을 추적하여 최종적으로 확인된 표적은 그래픽 전시 장치를 통하여 표적의 행적 변화 상황을 도시하여 준다.

IV. 레이더 신호처리 기법

1. PRF 신호 파형 설계

레이더를 이용하여 표적을 탐지하기 위해서는 송신 펄스의 파형을 어떻게 설계하여 탐지거리 및 도플러 모호성(Ambiguity)이 없이 최적의 표적 탐지 확률을 얻을 수 있는가 하는 것이 중요한 문제이다. 거리 모호성(Range Ambiguity)은 송신 펄스 반복 주기(PRI)가 주어진 탐지거리 범위를 벗어나 원거리의 표적이 첫번째 PRI 내에 겹쳐서 나타나는 현상이다. 도플러 모호성은 표적의 움직이는 속도가 주어진 펄

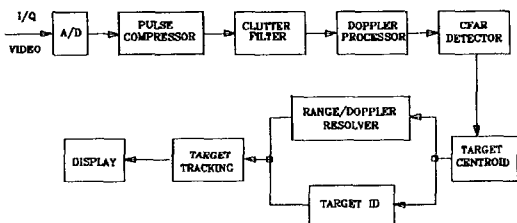


그림 7. 레이더 신호처리기 구성도

스 반복 주파수(PRF), 즉 샘플링 주파수 보다 낮아서 PRF 보다 빠른 속도로 움직이는 표적 도플러 성분이 첫번째 PRF 밴드 내에 겹쳐서 나타나는 현상이다. 또한, 표적의 위치가 주어진 PRI의 주기에 일치하는 위치에 존재할 때 펄스 폭에 해당하는 시간 동안 반사신호를 수신할 수 없으므로 표적신호를 탐지할 수 없는 현상이 나타나는데 이를 거리 잠식(Range Eclipsing) 효과라고 한다. 마찬가지로, 이동 표적의 속도가 주어진 PRF의 반복 주파수와 일치하여 나타날 때 스펙트럼상에서 PRF 스펙트럼선과 일치하여 탐지할 수 없는 현상이 나타나는데 이를 맹속(Blind Speed)이라 한다. 이러한 경우에 대비하여 표적을 탐지할 수 있는 방법으로 지터(Jitter) 또는 스테거(Stagger) 등이 있다. 이는 주어진 PRF를 중심으로 PRF를 가변하여 표적이 하나의 PRF에 의해 가려져 탐지되지 않는 표적을 다른 PRF에서 탐지될 수 있도록 하는 기법으로 주로 낮은 PRF에 적용한다. 따라서 레이다의 PRF선정은 신호처리 관점에서 매우 중요하며, 예상 탐지거리와 예상 표적 속도의 관점에서 모호성을 고려하여 결정하여야 하는 설계 정수로서 이를 종합적으로 레이다 파형설계(Waveform Design)라고 한다. 일반적으로 레이다 파형 PRF는 저 PRF, 중 PRF, 고 PRF로 구분된다. 저 PRF 파형 방식은 첫번째 PRI 허용 거리 내에서 거리 모호성이 없이 최대 탐지거리를 유지할 수 있지만 도플러 모호성은 항상 존재하는 방식이다. 반면에 고 PRF 방식은 첫번째 PRF 내에서 표적의 도플러 속도 모호성이 없이 고속 표적속도를 찾을 수 있지만 탐지거리 모호성이 항상 존재하므로 탐지거리의 제약을 받는다. 위의 두 가지 방식의 중간 형태로 중 PRF 방식은 거리 및 도플러 모호성이 존재하는

반면, 두 가지의 장점을 이용할 수 있는 방식이다. 파형설계에서 맹속은 $V_b = n\lambda PRF/2$ 로 주어지고, 모호성이 없는 거리(Unambiguous Range)는 $R_u = c/2PRF$ 로 주어지므로, 이 두 관계식을 이용하여 송신 주파수의 파장과 PRF에 따른 거리와 속도의 범위를 (그림 8)과 같이 도식할 수 있다. 예로써, X밴드 멀티모드 레이다에서 Low PRF의 범위는 통상적으로 250-4000Hz, Medium PRF는 10-20KHz, High PRF는 100-300KHz를 사용하지만, 일반적으로 탐지범위와 신호처리의 복잡성 등을 고려하여 상호 보완적으로 사용한다.

2. 거리/도플러 모호성

레이다 표적 해상도 관점에서 파형 설계 문제를 살펴보자. 만약 레이다와 표적 및 주변환경 간섭 잡음 간에 상대적인 광선방향 속도 차이가 없다면 매우 간단하다. 그러나 모든 표적으로부터 반사되는 신호가 상당한 도플러 편이를 가지고 있다면 송신파형과 똑같은 파형을 수신할 수 없다. 따라서 레이다와 표적 간에 상대적인 움직임이 존재할 때는 비록 정적 표적이라도 출력은 송신파형의 상관함수와 같지 않다. 뿐만 아니라 제 2의 표적이나 약간 다른 거리에 있는 클러터로부터 들어오는 신호응답이 마치도 표적신호에 대한 응답처럼 정합필터의 출력에 나타나게 된다. 이러한 신호의 중복현상은 파형의 시간차이가 표적간의 시간지연 차이 보다 클 때 나타나는 현상이다. 따라서, 표적이 상당한 광선방향 속도를 가지고 있거나, 또는 다수 표적이 존재할 경우에 신호처리기의 출력특성을 정의하기 위하여 특별히 수학적 식으로 시간-주파수 자기상관함수를 표현하는데 이를 레이다 신호의 모호 함수(Ambiguity Function)라고 한다. 레이다 모호함수는 기준 표적으로부터 거리지연 및 도플러 주파수만큼 편이되어 들어오는 표적에 대한 수신 정합필터의 응답특성으로 다음 식과 같이 표현된다.

$$|X(\tau \nu)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u^*(t - \tau)\exp(j2\pi \nu t)dt \right| \quad (4)$$

이러한 모호함수의 크기는 상관함수의 절대 자승치로 정의되며, 추가적인 거리 지연이나 도플러 편이 요소가 없을 때 정합필터의 출력은 최대치가 된다. 모호함수의 다이어그램은 관상 표적으로부터 편이된 시간 및 도플러의 크기에 따라 (그림 9)와 같이 주어지

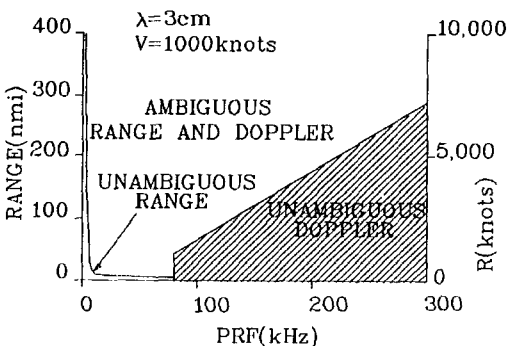


그림 8. 거리/도플러 모호성

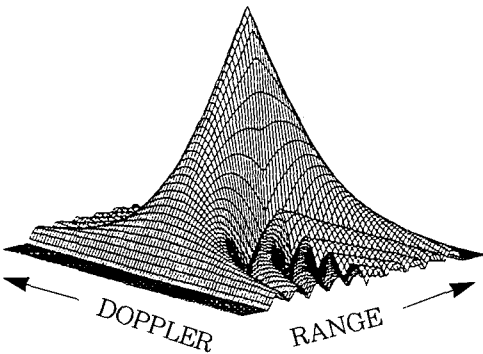


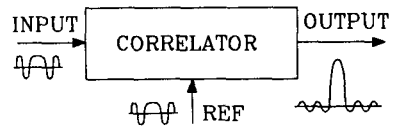
그림 9. 레이더 파형 모호성

며, 송신 파형의 종류에 따라 도플러 및 거리지연 민감도가 달라진다. 송신파형에 따라 모호함수의 중심 로브의 면적과 모양이 정해지며, 표적거리(시간지연) 및 표적속도(도플러 편이)가 측정되어지는 정확도에 직접 관련이 있다. 이러한 조건 속에서 송신펄스에 다양한 파형을 변조하여 주어진 해상도를 유지하는 펄스압축은 정합필터와 같은 원리이다.

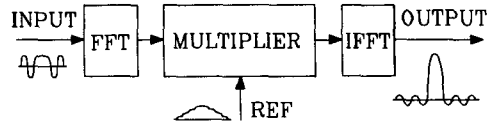
3. 펄스 압축

레이더의 탐지거리와 거리 해상도는 송신펄스의 침투전력과 펄스의 폭에 따라 정해지지만 실제적으로 침투출력을 높이거나 펄스폭을 좁게하는 데는 소자특성 등의 제약 때문에 한계가 있다. 펄스압축 기법은 비교적 긴 펄스폭 및 낮은 침투전력의 펄스를 사용하여 실질적으로는 짧은 펄스폭 및 높은 침투전력의 펄스를 이용하여 얻을 수 있는 거리분해능 및 높은 신호대 잡음비의 탐지성능을 얻기 위한 목적으로 사용되는 레이더 신호처리 기법이다. 펄스압축 기법은 송신시에 펄스폭을 확장하여 코드화된 파형을 RF 반송파에 실어 보내고 수신시에는 역으로 송신코드와 정합된 수신신호 파형을 압축하는 과정이 필요하게 된다. 레이더의 거리분해능은 $\delta = c\tau/2$ 와 같이 주어지며, 여기서 c 는 광속이며, τ 는 송신펄스 폭이다. 펄스압축에서 송신파형의 대역폭은 펄스폭에 반비례하며, 송신펄스 길이와 압축된 실효 펄스 길이의 비를 펄스 압축비라고 한다.

펄스압축 처리과정은 시간 및 주파수 영역에서 처리할 수 있다. 송신파형의 복소 공액 신호와 수신신호와의 상관관계를 이용하여 펄스압축 과정을 <그림 10>에 도시하였다. 펄스압축 방식은 변조 방식에 따라 크게 주파수 변조, 위상 변조, 편파 변조로 나눌



(a) Time Domain



(b) Frequency Domain

그림 10. 펄스 압축 과정

수 있다. 주파수 변조에는 선형 주파수 변조(LFM), 비선형 주파수 변조(NLFM), 계단식 주파수 변조(FSM) 방식이 있다. 위상 변조 방식의 종류에는 이진 위상 변조 방식 및 다상 변조 방식이 있으며, 바커 코드, 결합 바커 코드, 가상 랜덤 코드 등이 이진 위상 코드이며, 계단식 주파수 변조 방식에서 유도된 프랭크 코드 및 P1 코드, 선형 주파수 변조 방식에서 유도된 P3 코드, P4 코드 등이 다상 코드이다. 펄스 압축시에 인접 거리셀에 나타나는 응답을 거리부엽이라 하며 이 거리부엽의 크기에 따라 주위 거리셀에 오묘적 신호로 작용하므로 펄스압축 코드 설계시에 침투부엽의 크기를 제한하여야 한다. 거리부엽을 억제하기 위한 가중치는 가중함수에 따라 Cosine, Hamming, Dolph-Chebyshev, Talyor 방식 등이 있는데, 거리부엽의 레벨과 가중함수로 인한 해상도 퍼짐 현상을 고려하여 선정해야 한다. 송신파형에 정합된 코드를 사용하면 최대 신호대 잡음비를 얻을 수 있지만, 거리부엽을 줄일 목적으로 부정합(Mismatched) 펄스압축코드를 사용하는 경우에 이로 인한 신호대 잡음비 손실이 발생한다.

펄스압축시 장점으로는 평균전력을 증가시켜 탐지거리가 늘어나고 좋은 거리 해상도를 얻는다. 또한 레이더간에 서로 다른 코드를 사용하므로 간섭현상을 줄일 수 있게 된다. 단점으로는, 위상이 안정된 코히어런트 송신기 필요, 코드정보를 지닌 파형변수의 정교한 조정 필요, 최소 Blind 거리 증가, 파형의 도플러 편이에 대한 민감도 증가와 같은 점들이 있다. 아날로그 표면음파(SAW) 소자를 이용하여 수신단에서 구현 가능하나, 디지털 펄스압축용 상관기를 이용하면 특성이 온도나 노화에 영향을 거의 받지 않으며,

임펄스 응답은 필요에 따라 상황에 적절한 계수를 변경해 줌으로써 언제든지 여러가지의 파형에 대한 종합필터로 사용할 수 있는 장점이 있다.

4. 클러터 제거 필터

레이다 신호는 원하는 표적신호 이외에도 원하지 않는 물체에 의해 반사된 클러터 신호를 포함하고 있으므로 레이다 신호처리에서 클러터 제거 필터의 역할은 매우 중요하다. 일반적으로 탐지 레이다에서 드웰시간 내에서 사용가능한 펄스의 수는 8-16 정도로 제한되어 있기 때문에 클러터 제거를 위한 필터의 설계시에 적은 수의 펄스를 이용하여 원하는 클러터 제거율을 높이는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 구조가 가장 간단하면서 지면 클러터 제거에 효과적인 방법으로 과거부터 가장 많이 사용되고 있는 방법 가운데 하나가 이동표적 지시기(Moving Target Indicator) 필터이다.

지연선 감쇄기는 일명 펄스 상쇄기라고 하며 이것은 펄스 반복 주기 간격으로 들어오는 신호를 펄스 주기 시간 단위의 지연선을 이용하여 지연시킨 다음 전 신호와 현재 신호를 각 거리셀 단위로 차의 신호를 얻어내어 정적인 클러터 DC 성분은 제거하고 움직이는 도플러 신호는 차의 신호로 통과시키는 원리를 이용한다. 대표적인 이중 지연선 상쇄기의 구조는 <그림 11 >과 같다. 표적에 의한 도플러 주파수 응답은 $|S_o(\omega)| = 4\sin^2(\omega T / 2)$ 로 주어진다. 이 필터의 특성은 펄스간의 클러터 위상 및 진폭의 변화가 없는 경우에는 효과적이며 필터의 차수가 낮을수록 Notch의 폭과 감쇄율이 작기 때문에 지연선을 증감하여 클

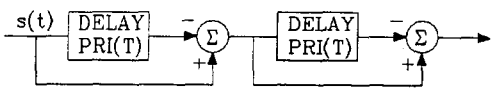
러터 제거율을 조절할 수 있다. 그러나 이 경우 필터의 특성이 고정되어 있으므로 제거하고자 하는 클러터 특성을 고려하여 Feedback을 사용하여 정지대역과 통과대역 특성을 향상시킬 수 있다.

Transversal 필터가 Binomial 하중값을 갖는 경우의 출력특성은 Delay Line Canceller의 주파수 응답과 동일하게 나타나며, 이러한 경우의 필터특성은 클러터 스펙트럼의 평균값이 영이고 스펙트럼 편차가 비교적 넓지 않은 지상클러터에 대해서는 입력 신호의 신호대 클러터비와 출력신호의 신호대 클러터비로 표현되는 개선도(Improvement Factor)를 근사적으로 최대화시킬 수 있다. 그러나 기상 클러터와 같이 비나 바람에 의해 스펙트럼이 변하는 경우에는 효과적이지 못하다.

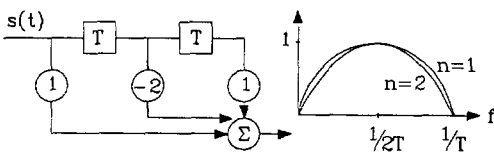
레이다의 클러터 특성은 주변 환경에 따라서 반사되는 진폭의 크기나 도플러 분포가 거리, 시간 및 관측각도에 따라 변한다. 따라서 주변환경이 변할 때마다 클러터의 특성을 자동으로 추출하여 이에 적합한 필터계수를 결정하는 적응필터를 이용하여 필요에 따라 제거하고자 하는 클러터의 도플러 주파수에 널을 유지시킬 수 있다. 그러나 최적의 필터계수를 결정하기 위해서는 많은 계산이 요구되며, 실시간 적응을 위해서는 빠른 수렴속도가 요구된다. 적응 Canceller는 공간상에서 또는 스펙트럼상에서 수행될 수 있으며 최적필터라기 보다는 “Nearly Optimum” 성능을 유지하는 필터로 이용된다.

5. 펄스 도플러 처리

MTI 방식에서는 주로 지연선 상쇄기를 사용하여 하나의 광대역 필터를 구성하므로 고정된 지면 클러터 성분은 제거하지만, 클러터의 스펙트럼 분포가 여러가지 주변 환경에 따라 변하는 경우에는 효과적이지 못하다. 도플러 처리기는 동위상(I) 및 직각위상(Q)으로 나누어서 들어오는 펄스신호의 위상특성을 유지하여 CPI동안에 누적된 펄스신호를 모아서 복소 푸리에 변환을 이용하여 현대역의 필터뱅크를 구성한다. 도플러 처리에서는 푸리에 변환을 이용하여 움직이는 표적에 대한 코히어런트 위상정보를 벡터적으로 적분하여 랜덤 위상성분의 잡음성분은 약화시키고, 동위상 성분의 표적 신호 성분은 상대적으로 강화시켜, 신호처리 이득을 높이고, 잔류 클러터 잡음 성분을 스펙트럼 영역에서 제거하여 클러터 제거율을 증가시킨다. PRF가 예상되는 표적의 도플러 주파수보



(a) Double Delay Line Canceller



(b) Transversal Filter (c) Response

그림 11. 이중 지연선 상쇄기

다 높은 경우에는 표적의 주파수를 분석하여 표적의 속도정보를 얻을 수 있다. 그러나, 일반적인 탐색 레이다에서는 거리셀이 상당히 많기 때문에 정해진 드웰시간 동안에 방위각 방향으로 펄스를 모아서 매 거리셀마다 스펙트럼 성분을 추출하기 위한 퓨리에 변환을 하여야 하므로 처리 시간이 매우 많이 소요된다. 코히어런트 누적방법은 연속되는 반사신호를 같은 위상정보를 가진 신호만을 여러개의 대역통과 필터를 이용하여 누적한다. <그림 12>와 같은 도플러 필터뱅크를 구현하는 방법으로 DFT(Discrete Fourier Transform) 또는 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한다. 스펙트럼 출력 $y(k)$ 는 $y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\exp(-j2\pi(n-1)(k-1)/N)$ 으로 주어지고, 여기서 k 는 필터뱅크의 수이고 $x(n)$ 은 입력신호의 샘플값이며, $y(k)$ 는 출력 주파수 성분이다. 그러므로 윗식을 이용하여 도플러 필터를 구성할 경우, K 번째 필터의 N 개 필터계수는 $W(k, n) = \exp(-j2\pi(n-1)(k-1)/N)$ 으로 주어진다. 필터뱅크를 구성할 경우 인접 필터에 나타나는 부엽의 크기에 따라 오프적으로 탐지될 가능성이 크고 상대적인 잡음의 레벨을 증가시키므로 가능한 부엽의 크기를 억제하여야 한다. 부엽레벨의 크기를 줄이는 방법으로 시간 영역에서 해밍 윈도우와 같은 창함수를 사용한다. 사용하는 창함수의 종류에 따라 인접 필터뱅크의 스펙트럼 부엽의 크기와 이로 인한 대역폭의 퍼짐 현상이 다르므로 표적의 특성에 따라 필터뱅크의 주파수 특성을 고려하여야 한다. 최근에는 고속 FFT 전용 프로세서를 사용하여 구현이 용이해지고 있지만 아직 속도 제약으로 병렬처리 구조를 이용하여 처리한다.

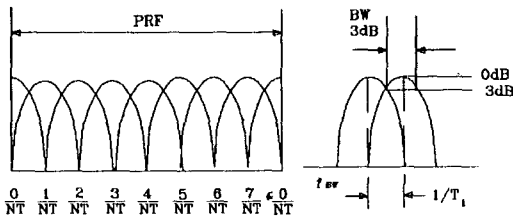


그림 12. 필터뱅크

6. 일정 오경보 표적탐지(CFAR)

클러터 필터를 통하여 기본적인 클러터가 제거된 후 시간 및 도플러 영역에서 표적신호를 탐지하는데 잔류 클러터나 간섭잡음에 의한 오경보 탐지율을 일정하게 유지하면서 동시에 높은 탐지확률로 표적을

탐지하는 것이 매우 중요하다. 이때 기준 거리셀을 중심으로 주변 거리셀의 크기를 평균적으로 대표하는 문턱치(Threshold)와 비교하여 표적의 존재 여부를 결정한다. 일정한 오경보율(Constant False Alarm Rate)을 얻기 위해서는 지역적인 클러터 환경에 적응된 탐지 문턱치가 설정되어야 한다. 실제 레이다 주변환경은 시간과 공간에 따라 다양하게 나타나기 때문에 표적탐지 과정에서 일정한 오경보율을 유지하기 위해서는 문턱치의 크기도 주변잡음의 크기 변화에 따라 조정된 적응 탐지 문턱치를 이용하여야 한다. CFAR 처리기는 일반적으로 움직이는 창문을 이용하여 기준 창문내에 수신된 신호를 이용하여 클러터의 크기를 추정, 탐지 문턱값을 설정하는 방법으로서, 기본적인 구조는 <그림 13>에 도시되어 있다. 대표적인 탐지 문턱치 결정 방법에는 CA-CFAR(Cell Averaging), GO-CFAR(Greatest of), SO-CFAR(Smallest of) 등과 같은 방식들이 있다. 이러한 방식을 통상 Mean Level Detection 이라하는데, Leading Window를 평균한 값과 Lagging Window를 평균한 값을 더하면 CA-CFAR가 되고, 둘 중에 큰것을 취하면 GO-CFAR가 되며, 작은 것을 취하면 SO-CFAR가 된다. 여기서 취한 값을 오경보율의 정도에 따라 정해지는 가중치와 곱하여 문턱치를 얻은 후 Test Cell에 표적이 있는지의 여부를 판단하게 된다. 그러나, 이러한 CFAR 처리기의 탐지 성능은 여러개의 표적이 기본창문 내에 존재하는 경우나 급격히 변화하는 주변 클러터 환경하에서는 급속히 저하된다.

순서통계 CFAR(Ordered Statistics CFAR)은 기본 창문 내에서 수신된 신호의 값을 크기순으로 배열한 후 이들 중에서 특정한 값만을 이용하여 클러터

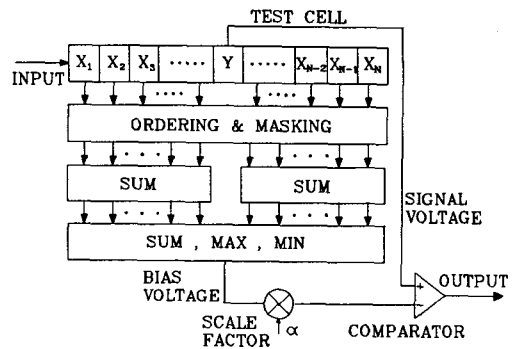


그림 13. CFAR 처리기

의 크기를 추정하여 표적의 반사 신호가 문턱치 상승에 미치는 영향을 최소화 하였다. 이 방법은 기준 창문 내의 샘플중에서 하나의 샘플을 취하여 이 값으로 클러터 전력을 추정한다. 먼저 기준 창문내의 샘플을 크기 순서에 따라 배열하고 다음에 k번째의 샘플값을 추정값으로 사용하게 된다. OS-CFAR에서는 보통 k를 기준 창문 크기의 3/4 정도로 사용한다. 이 방법은 기본창문 내에 여러개의 표적이 존재하는 경우에 산술적 평균으로 탐지 문턱치를 결정하는 CA-CFAR 방법보다 성능이 우수하다. Trimmed CFAR(TM-CFAR)는 균질 환경에서 OS-CFAR 보다 성능이 우수하며, 간섭잡음 상황 및 클러터 분포 끝단 부분에서는 CA-CFAR 보다 우수한 탐지성능을 갖는다. TM-CFAR에서는 탐지 문턱치를 설정할때 기준 거리셀들을 크기 순으로 배열한 후 문턱치의 평균크기에 영향을 많이 주는 양단의 셀 크기를 제거하고 나머지를 Summing Window로 잡아서 Summing Window 내의 Cell들을 더하여 평균치를 추정한다. 그러나 OS-CFAR나 TM-CFAR는 표적 탐지 성능은 우수하지만 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 실질적인 구현상의 어려움이 있다.

7. 클러터 지도 CFAR

CFAR 탐지는 대표적으로 두가지 방법이 있는데, 하나는 주변 셀들의 신호의 크기를 평균하여 배경잡음의 크기를 추정하여 탐지 문턱치로 사용하는 방법과, 스캔 단위로 배경잡음을 평균하여 추정치를 얻는 방법이다. 전자는 배경간섭의 통계적 특성이 거리와 도플러에 대해 균일할 경우 잘 적용되며 후자는 배경이 비균일할때 유리하다. 보통 CA-CFAR에서는 배경 추정치가 한번의 레이더 스캔 내에 결정되며 이는 테스트 셀에 인접해 있고 통계적으로 독립적인 거리셀을 검사함으로써 이루어진다. 이때 테스트 셀은 추정치에서 제외된다. 클러터 맵 접근 방식에서 테스트 셀의 배경은 스캔단위로 조사되어지는데 표적은 도플러 구별이나 표적 탐지 시험 동안에 영속도 도플러 필터를 사용한다.

클러터 맵은 일종의 CFAR로서, 클러터의 레벨들을 추정하는데 필요한 기준 샘플들이 시험중에 이전의 많은 스캔들에 대해 비행표적들이 보통 한 스캔에서 다음 스캔 사이에 수개의 거리셀을 이동하기 때문에 기준 표본들이 표적신호에 의해 영향을 크게 받지 않으나 전후 맵의 평균시간을 길게함으로써 수시로

나타나는 표적 신호의 영향을 최소화시킬 수 있다. 클러터 맵의 본래 목적은 고정된 위치에 있는 이산(Discrete) 클러터나 클러터 잔여 성분에 의한 오경보를 막기 위한 것이지만, 조류에 의한 반사신호를 억제하거나 레이더가 움직이는 상황에서 천천히 움직이는 점 클러터를 고려해주기 위해 필요하다. 표적이 한점의 클러터 상을 비행하고 있을 때 Subclutter Visibility가 매우 좋아지며, 특히, 비행표적이 레이더와 접선방향으로 움직일 때 도플러 성분이 클러터와 같은 영역에 존재하여 표적이 영속도 성분으로 나타나 MTI를 통과시키면 표적도 제거되지만, 이런 경우 클러터 맵과 비교하여 상대적으로 큰 영속도 반사가 있는 경우에 표적으로 탐지할 수 있는 특수 기능을 가지고 있다.

8. 표적군 형성 및 추출

탐지된 표적은 반사체의 크기와 레이더의 해상도에 따라서 거리, 방위, 고도, 도플러 영역에서 인접 주변셀에 분산되어 중복 탐지되는 현상이 생긴다. 일반적으로 한 개의 표적에서 반사된 신호라 할지라도 표적의 실제 크기, 반사신호의 부엽, 오경보율, 레이더 빔의 분해능 등으로 인해서 각 정보 영역에서 일정한 분포를 가지게 되므로 실제하는 표적의 갯수를 잘못 판단할 위험이 있다. 따라서, 표적군 중심추출의 목적은 각 정보의 영역에서 표적신호군의 분포와 크기를 보고, 각 표적군의 대표값을 결정하여 추적처리기 컴퓨터의 처리부담을 덜어주고 정확한 표적정보를 추출하는데 있다.

표적군 형성/추출은 한개의 표적이 어떤 정보영역에서 점유할 수 있는 최대 분포를 예측하는 일과 그 분포 안에서 대표 정보값을 추출하는 두 단계로 나누어진다. 대표 정보값의 추출에는 산술 평균법이나 가중 평균, 최대 신호크기 선택등이 쓰인다. 산술 평균법은 한 개 표적군을 이루는 표적신호들의 크기에는 관심이 없거나 그 크기를 알 수 없을때 쓰이며, 그 영역내의 분포 좌표값을 평균하여 중심을 구하는 방법이다. 가중 평균법은 산술 평균법과 같지만 각 표적신호의 좌표값에 신호크기로 가중값을 부여한 뒤 무게중심을 구하는 방법이다. 최대 신호크기 선택법은 그 표적군의 분포 보다는 신호크기가 관심사항일 때 선택하는 방법이다. 거리방향 표적중심 추출기법은 한 개의 표적에서 반사된 신호가 거리방향으로 얼마나 분포될 수 있는가를 기준으로 판단해야 된다.

주어진 거리 해상도에 따라 다르지만 부엽에 의한 탐지를 무시할때, 표적은 거리방향으로 최대 몇개의 셀(cell)에 걸쳐 나타날 수 있다고 본다. 표적신호의 방위각 방향 분포는 동일 표적이라도 가까운 거리에서는 방위각 방향으로 더 큰 분포를 가질 수 있고, 큰 레이더 반사 단면적을 가진 표적은 3dB 빔폭외에 빔 부엽에 의해서도 탐지될 수 있기 때문에 방위각 방향으로 큰 분포를 나타낼 수 있다. 마지막으로, 한 거리셀의 주파수 영역에서 표적신호군이 나타나는 것은 주로 표적 도플러 주파수의 부엽이 탐지되거나, 그 레이더 시스템의 도플러 주파수 분해능 한계에 기인한 것이다. 따라서, 대표 주파수값은 최대 신호크기를 가진 도플러 셀을 선택하여 결정된다.

9. 표적 식별

레이더 탐지에 의한 위치, 속도 등의 기본적 표적 정보는 때로는 충분하지 않고 표적 자체의 정체(Identity)를 파악하여 위협 표적에 대한 정보를 신속히 제공하는 것이 매우 중요하다. 표적인식 기술에는 정보로부터 사람이 최종 판단하는 Man-In-The-Loop(MITL) 수동방식, 자동방식, 비협조 인식방식과 협조 인식방식 등이 있다. 표적인식은 일반적으로 탐지, 판별, 분류, 식별의 4단계의 순으로 이루어진다. 탐지단계에서는 잠정적 표적들을 포함하는 배경 클러터, 간섭잡음, 수신기 잡음에 기인하는 오경보 확률을 최소화하면서 모든 표적들을 탐지해야 한다. 판별단계는 관심있는 표적과 다른 표적의 반사특성 차이를 이용하여 주위 클러터로부터 예비 표적들을 가려내는 과정으로서 오경보수를 더 줄이는 역할을 한다. 분류단계는 예비 표적들을 고정익기, 회전익기(헬기) 등과 같이 공통 특징점을 이용하여 몇개의 그룹으로 나누는 과정이다. 식별단계는 인식과정에서 가장 복잡하고 어려운 단계로서, 판별 및 분류기에 의해 주어진 표적정보를 처리하여 표적의 정체(Identity)를 결정한다. 즉, 들어오는 표적이 헬기인지, 고정익기 인지, 또한 고정익 전투기 중에서도 F-16인지, MIG-21인지를 판별하는 특정 플랫폼의 모델을 찾아내는 과정이다. 이러한 표적 정체 결정은 패턴인식, 신경망, 인공지능, 역산란과 같은 기법을 이용한다. 능동적인 표적식별 방법으로 잠재적 위협물이 비행하고 있는 지역에서는 협조적 피아식별 방식을 이용한다. IFF(Identification of Friend or Foe) 방식은 비협조적 표적식별(NCTR) 기법보다

훨씬 더 안전한 피아 식별 체계이므로 우군과 적군이 동시에 비행하고 있는 상황에서는 Mark IV 트랜스폰더를 이용하여 우군기에서만 확인가능한 방식을 이용하고 있다.

표적인식을 위한 신호처리 방법으로서 크게 도플러 영역, 시간 영역, 고해상도 거리/방위 영역(영상), 분극 영역 등이 있다. 이 모든 영역 중에서 어느 것도 최적의 측정결과를 제공하지는 못하므로 상호 보완적이다. 특히, 표적을 인식하기 위해서는 신호대 잡음비가 통상 표적탐지나 추적 목적에 비해 10-20dB 이상 높아야 표적의 특징을 정확히 찾을 수 있다. 따라서, 표적의 S/N을 증가시키는 방법으로 빔 주사 시간을 길게 하거나 보조 센서를 이용한다.

도플러 영역에서 표적의 특성을 찾기 위해서는 긴 드웰시간 동안 많은 펄스를 받아서 FFT를 이용하여 스펙트럼을 분석한다. 도플러 속도성분을 추출하여 표적의 특징을 찾기 위해서 High PRF 파형을 이용한다. 움직이는 지상차량이나 헬기와 고정익 항공기를 구별하는데 속도정보를 이용하여 판단한다. 고해상도 거리정보를 이용하여 표적의 모양이나 크기에 따른 반사도를 측정하여 프로파일을 만들어서 판단한다. 레이더 영상을 이용하여 표적을 식별하는 방법에는 합성 개구면 처리를 이용하여 표적의 영상을 만들어 판단하는 방법으로 SAR와 ISAR 방법이 있다. SAR 방법은 표적의 플랫폼은 고정되고 레이더가 이동하면서 표적 영상을 만들어 내는 방식이고, 반대로 레이더는 고정되고 표적의 플랫폼을 움직여서 표적영상을 만들어 내는 ISAR 방법이 있다. 이러한 영상방법은 표적인식을 최종적으로 사람이 하는 MITL 방식에서는 매우 성공적이며, 상황이 급박하지 않은 상황에서는 효율적이다. 마지막으로 전자파의 분극에 따라 스캐터링 매트릭스를 측정하여 표적의 표면특성을 찾아낼 수 있는 방법 등이 있다.

10. 표적 추적

레이더에서 표적추적은 일종의 상태추정 문제로 레이더가 스캔하는 시간 동안 측정된 데이터를 이용하여 특정 시간에서 표적의 위치, 속도, 가속도 등을 추정하고 다음 스캔이 돌아올때까지 표적상태를 예측하여 표적 추적의 오차를 줄여 나간다. 추적의 목적은 비교적 넓은 범위의 위치 및 속도를 갖는 잠재적 표적에 대하여 표적 확인 단계를 한번 더 거친후, 더욱 정밀한 표적의 위치 및 속도를 추정하여 비행의

향로 및 항적을 제공하거나 미사일 등의 표적 사통 체계에 정밀 자료로 이용된다.

표적추적에 사용하는 필터는 고정계수를 갖는 필터와 시간에 따라 계수값을 변화시키는 시변필터로 구분된다. 고정계수 필터로서, $\alpha-\beta$, $\alpha-\beta-\gamma$ 필터 등이 있고, 시변계수로서 대표적인 칼만필터가 있다. 고정계수 필터는 계산량이 작고, 요구되는 기억용량도 작은 잇점이 있지만 가속도 변화가 있는 경우 추정오차가 크다는 단점이 있다. 칼만필터는 시변필터이므로 표적의 운동모델이나 측정모델에 따라 필터계수를 적절히 변화시킬 수 있어 기동표적 모델에 유리하다. 추적 개시 정보로서 신호처리기에 제공하는 표적각도, 거리, 도플러 정보 등을 이용하여 시작한다. 추적중인 표적의 다음 샘플값을 얻기 위해 필요한 추적 게이트를 어느 방향으로 얼마만큼 옮길 것인가를 결정하기 위해서는 최소한 두 개의 측정값이 있어야 한다. 안테나 빔 위치, 거리 게이트 위치, 도플러 주파수 등의 측정값은 하나의 빔을 이용하여 여러 위치에서 시분할 방식으로 얻거나 여러개의 빔을 동시에 조사하여 동시에 얻을 수도 있다.

Split Gate 거리오차 측정 과정은 거리 Bin을 약간 많이 샘플하여 전, 후 Bin을 형성한 후 각각의 Bin으로부터 측정치를 얻는다. 두 개의 Range Bin 중심으로부터 표적의 중심이 어느 정도 이탈되었나를 나타내는 거리오차는 전, 후 게이트에 있는 표적 진폭의 합과 차의 비로써 나타낸다. 도플러 게이트는 표적의 도플러를 전, 후 필터의 중앙에 위치시켜 두 개의 도플러 필터 중심으로부터 표적의 도플러가 어느 정도 이탈되었나를 측정하여 도플러 오차를 구한다. 각도오차는 방위각이나 고도각에 대하여 모노펄스 기법을 사용하는 경우에 동일한 안테나 패턴 두 개를 이용하여 수신한 왼쪽 빔 패턴과 오른쪽 빔 패턴의 합과 차를 통하여 합 패턴과 차 패턴을 구할 수 있다. 차 빔과 합 빔의 비를 계산한 후 캘리브레이션 커브를 이용하여 각도오차가 얼마인지를 찾아 표적의 각도 추적정보로 이용한다.

11. 레이다 영상(Radar Imaging)

레이다 영상기법은 전자파를 이용하여 대상 표적지역의 고해상도 지형지도를 형성하여 표적을 탐지하고 식별하는 방법이다. 이 기법은 광학영상이나 적외선(IR) 영상과는 달리 비, 구름 등의 기상 조건이나 주야에 제한받지 않고 영상을 얻을 수 있는 전천후 전

자 눈으로 넓은 지역의 지상표적을 동시에 감시하거나 정찰하여 표적의 변화 상황을 알 수 있다. 따라서 지구 및 우주탐사, 공해 환경감시 등의 민수분야 뿐만 아니라, 적성지역의 정밀한 지형정찰, 조기경보등의 군사목적으로도 응용분야가 매우 많다. 레이다 영상지도의 해상도는 거리 및 방위 방향의 해상도로 구분되는데 보통 항공탐재 및 위성탐재용으로 약 30m 정도의 저해상도에서부터 1m 정도의 고해상도까지 용도에 따라 여러가지 방식이 있다. 거리 해상도는 비교적 쉽게 펄스압축 기법을 이용하여 얻을 수 있지만, 방위 방향의 해상도는 통상적인 실제 개구면상의 안테나 빔폭으로는 실현하기 불가능하다. 예를 들어 X대역(10GHz) 안테나의 길이가 1m일 경우 빔폭은 약 30mrad이므로 10Km에서 방위 방향 해상도는 약 300m가 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 실제 안테나의 넓은 빔폭을 신호처리 기법을 이용해 안테나 개구면을 이론적으로 합성하여 방위방향의 해상도를 좋게하는 방법을 "SAR(Synthetic Aperture Radar or Synthetic Array Radar)"라고한다.

SAR 기법은 비행체의 움직임에 대한 상대적인 지상표적의 도플러 특성을 이용하여 비교적 복잡한 신호처리 과정을 거쳐서 거리 해상도와 방위 해상도를 해결하여 정밀한 지형 영상 지도를 만들어 낸다. SAR의 기능은 신호처리 방식에 따라 저해상도의 단순 빔 맵을 이용한 "Doppler Beam Sharpening (DBS)" 방식과 고해상도의 "Strip 맵" 및 "Spotlight 맵" 방식 등이 있다.

SAR 기본적인 동작개념도가 (그림 14)에 도시되어 있다. 안테나의 3dB 빔폭은 사용파장이 λ 일 경우 $\theta = \lambda/D$ 로 주어진다. 따라서 비행체로부터 거리 R 떨어져 있는 지상에서 각도 해상도는 $R\theta = R\lambda/D$ 로 주어진다. 따라서 방위 해상도는 거리에 비례하여 나빠진다. 각도 해상도를 높이기 위해서는 안테나 개구면 D를 증가시켜야 하는데 현실적으로 비행 탐재 안테나의 크기를 증가시키는 것은 한계가 있다. 따라서 신호처리 기법을 이용하여 안테나 개구면이 커지도록 하기 위하여 탐재 레이다가 비행방향으로 이동하여 마치도 많은 어레이 안테나로부터 들어오는 신호를 위상 차에 따라 수신하는 것처럼 일정한 간격으로 비행 이동 지점 마다 송신 후 지상에서 반사되는 신호를 수신하여 위상의 연속성을 유지할 수 있도록 샘플링하여 일정 시간 동안 처리한다. 최대 유효 개구면의 크기는 $D(sar) = R\theta$ 로 주어진다. 이 개구면의 크

기는 합성기법을 이용하여 구현할 수 있는 가장 큰 값이며, $3dB \text{ 빙폭 } \theta \text{ (sar)} = \lambda / 2D \text{ (sar)} = \lambda / 2R\beta$ 로 주어지므로 방위 해상도는 실제 안테나 개구면의 반 ($D/2$)을 넘을 수 없다. 그러나, 경사각도에 영향을 받지 않으며 방위 해상도는 거리에 따라 변하지 않고 파장에 영향을 받지 않는다.

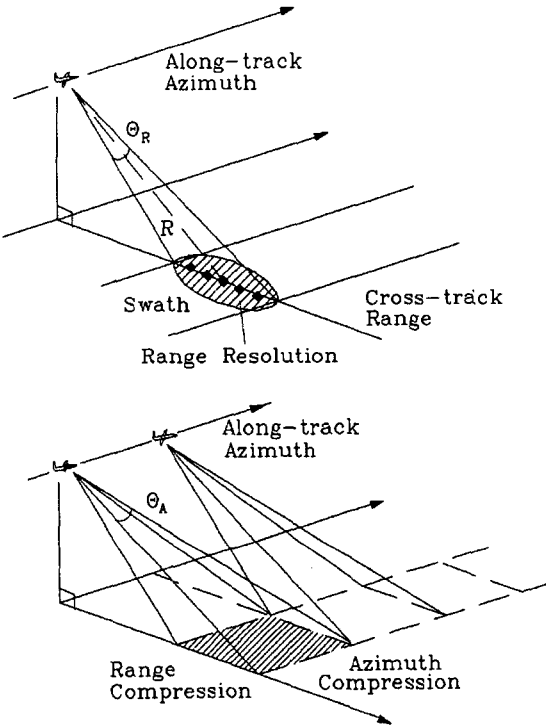


그림 14. 레이더 영상처리 개념

기본적인 신호처리 과정을 스트립 맵 모드의 경우에, 먼저 디지털 프리세서 처리를 위하여 2차원 구조의 메모리에 SAR 데이터를 모아서 거리 및 방위의 2차원 형태로 만든 다음 기준 함수의 2차원 상관기 (Correlator)를 거쳐서 원하는 영상을 얻어낸다. 첫 단계로 PRI 단위의 거리축상의 펄스압축을 수행하여 거리셀에 분포되어있는 반사신호의 특징을 찾아낸다. 다음 단계에는 방위압축을 위한 2차원 상관처리를 수행하여 방위방향의 표적 반사체의 신호를 합성하는데, 전 처리, 거리 방향 흔들림 교정 및 방위방향 상관처리 단계로 나누어서 수행한다. 거리 교정은 각 방위 위치에서 기준 방위선에 비하여 상대적인 거리 흔들림을 계산하기 위하여 관성 항법장치(INS)와 이동 안테나 위치자료를 이용하여 교정한다. 최종 영상

을 얻기 위한 단계로 방위 방향으로 상관처리를 하는데 시간영역 직접상관처리 또는 FFT 이용한 고속 상관기법등이 있다. 탑재 영상레이다에서 형성된 영상 자료는 비행 도중 실시간으로 지상에 전송해야 하는데, 전송률을 높이기 위해 영상데이터 압축을 수행하여 지상 수신국에 자료 전송 채널을 이용하여 보내며, 지상 수신국에서는 수신영상을 처리하여 영상을 형성한 후 판독하여 표적을 인식하는 단계를 거친다.

12. 대전자전(ECCM) 기법

최근 전자파의 이용 추세가 급증함에 따라 전자파 환경이 점차 고밀도화되고 특히 군용의 의도적인 전자파 방해 기법은 지능화되고 있다. 레이다는 이러한 간섭 및 재밍신호와 같은 전자파 방해에 대한 대전자전 대책(Electronic Counter-Counter Measure)이 필수적인 요건이다. 전자전(Electronic Counter Measure)과 대전자전(ECCM)은 창과 방패의 관계로 상호 피할 수 없는 기술경쟁을 통하여 기술을 향상시키고 있다. 최근 걸프전을 통하여 이에 대한 중요성과 필요성이 다시 입증되었다. 1940년에 신호처리 기법으로서 처음으로 독일에서 채프에 대한 대책으로 펄스압축기법이 레이다에 적용되었다. 최근 디지털 기술의 발달로 신호처리 소자 및 기법을 적용하여 위협 상황에 적용할 수 있는 기법들이 많이 개발되었다.

대전자전 기법으로 레이다에서 사용할 수 있는 변수는 재머에게 레이다를 노출시키지 않는 방법과 노출된 경우라도 레이다 신호를 식별하기 어렵게 만드는 방법과 재밍을 반더라도 재밍을 회피하여 영향을 최소화하는 방법이 있을 수 있다. 재머에게 노출시키지 않는 방법은 광대역 확산기법으로 송신출력을 최소로 낮추어 피탐확률을 줄이는 LPI(Low Probability of Intercept) 기법이 있다. 재밍을 회피하는 방법으로 레이다가 이용하는 변수로서는 송신 주파수를 흔드는 방법, 송신 파형의 코드와 PRF를 흔드는 방법 등이 있고, 재밍된 신호를 처리 하는 방법으로서 재밍의 방향을 알거나, 안테나 공간필터를 이용하여, 도플러 및 CFAR 방법으로 제거하는 방법 등이 있다. 특히 시간-공간-주파수 영역 신호처리 관점에서 주요 기법으로 적응 안테나 공간필터, 부엽 블랭크, 부엽 상쇄기법, 적응 빔형성 배열기법, Staggered PRF, 펄스압축기법, 적응 MTI, 적응 CFAR 등 전자파방해의 종류에 따라 대처방식들이 다양하다. 공간

필터 측면에서 대전자전 기법으로 가장 많이 사용하는 방법은 낮은 부엽 안테나를 이용하여 공간상에서 표적방향 이외의 재밍신호를 공간상에서 억제하는 방법으로 부엽 상쇄법(Sidelobe Canceller)과 부엽 블랭크법(Sidelobe Blanker)이 있다. 주파수 스테저링 기법은 일반적으로 펄스 및 CPI 단위로 송신 주파수를 변화시켜서 전파방해를 피하는 방법으로 다양한 주파수를 장시간 동안 100-500MHz 정도의 큰 주파수 변화로 전파방해를 어렵게 만든다. 신호처리 관점에서 대 전파방해 기법으로는 A/D변환기의 포화감지, 펄스형 간섭제거, 적응 MTI를 이용한 채프제거, PRF를 가변하여 신호피탐을 교란하는 Staggered PRF 방식, 펄스 도플러 필터 뱅크, 펄스압축 및 적응 문턱치를 가지는 CFAR 탐지기법들이 포함된다. Staggered PRF 방식은 비록 특정 PRF에 대하여 Repeater재밍 되어진다 하더라도 다음 PRI 동안에 사용하는 다른 PRF에 의해서는 재밍을 어렵게하여 상대에게 적게 노출되어 재밍이 걸릴 확율을 낮추는 것이다.

13. 적응 배열 처리

주변 신호 환경이 변하는 상황에서 적응기법(Adaptive Algorithm)은 신호의 탐지성능을 향상시키는데 매우 효과적이다. 다차원 적응신호처리 측면에서 공간필터는 시간, 주파수 영역 필터의 효과를 배가시키는 작용을 할 수 있다. 공간필터는 공간상의 어레이에 도달하는 신호의 상호 위상차를 이용하여 적절한 위상과 진폭을 조정하여 수신 전 단계의 안테나 패턴상에서 방향성 재머나 간섭 신호는 제거하고 원하는 표적신호 성분을 강화하기 위하여 사용하는 데 이를 일반적으로 적응배열 기법이라 한다.

적응배열 기법은 일종의 ECCM 기법이지만 응용분야가 광범위하기 때문에 각종 레이더, 통신, 소나, 지진파 등의 강한 간섭 신호 환경에 있는 미약한 표적신호를 탐지하고 분류하여 추적하는데 널리 이용된다. 기본적인 원리는 다수의 어레이 소자를 이용하여 재머방향의 이득을 최소화 하고, 표적방향의 이득을 최대로 하는 안테나 패턴을 형성하기 위한 계수벡터를 구하는 문제로서 계수벡터를 어떤 기준을 두고 구하느냐에 따라 여러가지 알고리즘이 있다. 이러한 기법들은 1960대 개념이 정립된 이래 많은 연구가 진행되어 오고 있지만 알고리즘의 수렴속도와 계산능력 등의 제한점이나, 코히어런트 간섭신호 환경 여건에

서 성능 제한 등을 극복하기 위한 기법들이 제안되고 있다. 특히 레이더에서는 수천개의 어레이 소자를 사용하는 완전 위상배열 레이더로 발전하는 추세이고 재머의 위협도가 증가하므로 적응 어레이를 이용한 ECCM 대책이 필수적이다. 또한 레이더의 어레이가 고정되어 있거나 비행 탐재시에도 재머와 클러터를 동시에 제거할 수 있는 기법들이 연구되고 있다. 적응 어레이의 초분해능(Super Resolution) 원리를 이용하여 동일 거리 셀 내에서 반사되는 다중 위상성분이 있을 때 표적에 대한 도래 각도(DOA)를 아는 것과 정확한 재머의 각도를 측정하는데 매우 효과적이다. 신호가 없으면 무방향성 패턴을 갖지만 신호가 있는 경우 수신패턴에 매우 좁은 널(Null)이 형성되므로 신호의 위치를 정확히 구별할 수 있다. 적용되는 알고리즘에 따라 수렴속도, 계산량이 다르지만 QR 방법이나 Gram-Schmidt 방법들은 시스톨릭 어레이를 이용하여 병렬계산을 수행할 수 있는 잇점이 있다. 그러나, 레이더에 실시간 적용성 측면에서 극복해야 할 제한요소들이 많이 남아있다.

V. 응용분야

1. 레이더 응용

헤르쯔가 1886년에 전자기 원리를 증명한 이래 1930년대가 되어서야 비로소 레이더에 실질적으로 적용되었다. 제 2차 세계대전과 더불어 레이더 기술은 여러 응용 분야에서 급속한 발전을 가져왔으며, 전시에 레이더는 지상, 해상, 공중전에서 중요한 역할을 했다. 전쟁이 끝나자 많은 부분이 민수에 적용되었으며 계속된 기술 발전으로 군용 및 민수용으로 그 응용분야가 더욱 확대되었다. 레이더 신호처리 기술은 거의 모든 레이더에 공통적으로 적용될 수 있지만 레이더의 종류에 따라 특수기능들이 달라질 수 있다.

레이더는 용도와 기능에 따라 여러가지로 분류된다. 레이더를 탐지거리별로 보면 단거리(40Km 범위), 중거리(200Km 범위), 장거리(300Km 이상)로 나눌 수 있고, 기능 및 용도에 따라 탐지 레이더와 추적 레이더로 나눌 수 있다. 탐지 레이더는 대공 방어용, 조기 경보용, 항공 관제용, 항만 감시용, 속도 측정, 항해용, 항공기 및 위성 탐재용 등으로 나누어지며, 추적 레이더는 주로 사격통제 및 미사일 유도

통계 등으로 이용된다. 또한 정찰목적으로는 원격탐사, 레이더 영상, 전장감시 등의 항공 및 위성탐재형이 있다. 정보의 종류에 따라 1차원 레이더(거리측정기), 2차원 레이더(거리, 방위정보), 3차원 레이더(거리, 방위, 고도정보), 4차원 레이더(거리, 방위, 고도, 도플러 정보) 및 지형지도 영상정보 SAR가 있다. 대상 표적에 따라서 항공기, 선박, 미사일, 지상 이동체, 기상, 지형지도 등으로 구분된다. 사용 주파수에 따라 OTH 레이더용의 HF밴드, 최장거리 및 밀립 침투용의 VHF, UHF 밴드, 중 장거리용의 L, S, C밴드, 단거리 및 탐재용의 X밴드, 고해상도 단거리 추적용의 Ku, 밀리미터 밴드 등이 있다. 레이더 파형 및 신호처리 기법에 따라 MTI 레이더, 펄스 도플러 레이더, 펄스압축 레이더, 합성 개구면을 이용한 영상 레이더, 대전자전용의 LPI 레이더 등이 있다.

민수용 레이더의 주된 응용분야는 공항관제, 기상경보, 항법, 항해, 지상 및 해상감시 등이지만 최근에는 항공기 및 위성탐재 고해상도 지형영상 형성 뿐만 아니라 우주산업에 까지 이르고 있다. 레이더의 군사 응용분야는 광범위하며 단거리 대공 탐지용에서부터 합정, 전투기에 이르기 까지 용도에 따라 다양하다. 주로 조기경보, 전장감시, 전투기/요격기 비행작전, 미사일 유도, 공대지 작전, 지상감시 및 근접신관과 같은 것이 있으나 여기에 대해서는 생략한다.

2. 레이더 신호처리 응용

레이더 신호처리 관점에서 가장 대표적인 레이더는 MTI 레이더와 펄스 도플러 레이더이다. MTI 레이더는 Low PRF를 사용하며, PRF 밴드 내에 하나의 클러터 필터를 가지고 있다. 펄스 도플러 레이더는 Medium이나 High PRF를 사용하며 도플러 효과에 의해 표적을 탐지하는 필터 뱅크가 PRF 밴드 내에 있다. MTD(Moving Target Detector)는 특별히 Low PRF를 사용하는 펄스 도플러 레이더 신호처리기를 말한다.

MTD 형의 신호처리는 1970년대 미국의 MIT 링컨 랩에서 최초로 개발한 대표적인 디지털 레이더 신호처리기이다. 이것은 공항 관제용의 비행감시 레이더 ASR-9(Air Surveillance Radar)용으로 지상, 기상 및 조류 등에 의한 클러터 환경에서 저고도 비행체를 탐지하는 능력을 가지도록 설계되었다. 제 1세대 모델명은 MTD-I으로 최초로 FFT 프로세서

를 디지털 부품으로 구현한 역작이었다. 최근에는 고속의 DSP 칩이나 전용 FFT 프로세서가 가능하지만 당시에는 FFT 알고리즘 자체를 설계하여 구현하는 것이 많은 일의 양을 차지하였다. MTD-I 모델에 적용된 주파수는 S밴드, 펄스폭은 1.05μs, 방위각 1.3도, 안테나 회전속도는 12.5RPM, PRF는 1200Hz, 침투출력은 1200와트였다. 주요 기능으로는 클러터 제거용 MTI 필터, 코히어런트 적분 및 기상, 채프 클러터 제거용 FFT 도플러 필터뱅크, 지상 클러터상에서 접선방향 비행표적을 탐지하기 위한 클러터 맵, 잔유 클러터에 의한 오경보율을 억제하기 위한 CFAR 프로세서, MTI 맹속 제거를 위한 블락 PRF 스테저링 등의 다양한 기능이 포함되어 있다. 여기에서 사용한 필터는 3단으로 구성되는데, 클러터 억제용 3-Pulse Canceller, 기상 클러터 억제용 8-Point FFT, 필터 부엽 억제를 위한 Post-FFT Weighting 기능이 통합되어 있다.

제 1세대의 기능중 도플러 필터의 기능을 강화한 MTD-II 모델은 성능을 더욱 개선하였다.<그림 15>에 MTD-II의 구성도가 도시되어 있다. 이 모델에서는 단일 채널러 뒷단에 8개의 7펄스 Complex FIR 필터를 구성하여 Cascade로 연결하였다. 10 Bit의 A/D를 사용하고 단일 상쇄기는 Zero-Velocity 지상 클러터를 제거시키고 FIR 필터는 저부엽을 가지도록 하였다. MTD-II의 도플러 특성은 8 Pulse Transversal 필터를 사용하여 MTD-I에서 10펄스 사용시와 비교하여 좋은 결과를 얻었다.

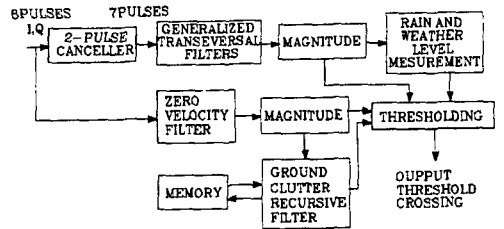


그림 15. MTD-II 구성도

2차원 대공탐색 레이더용으로 프로그램 가능한 펄스 도플러 레이더 신호처리기 설계 제작 예가 <그림 16>에 도시되어 있다. 이것은 국방과학연구소에서 개발되어 발표되었으며³⁾, TASR 시스템에 적용되었다. 최신 DSP 소자를 이용하여 주변상황에 따라 여러가지 알고리즘을 변수조정이 가능하도록 되어 있

거, ISAR 등의 표적 식별 기법, 송수신 분리(Bistatic) 탐지기법 등이 발전될 전망이다.

(1) 다중모드 신호처리

레이다의 다양한 기능을 수용할 수 있는 다중모드 프로그램 가능한 구조로 발전하고 있으며, 고속의 상용 및 특수 DSP 소자들을 이용하여 다양한 알고리즘을 적용하고 있다. 프로그램 가능한 구조의 신호처리기(PSP)는 가능한 처리능력 범위에서 제작 경제성이 있고, 알고리즘 및 계수를 소프트웨어적으로 바꿀 수 있으므로 필요에 따라 모드변환이 가능하고 여러 종류의 다른 레이다 시스템에도 적용할 수 있다.

(2) 고집적 회로 기술

고성능 디지털 및 아날로그 레이다 신호처리 부품을 제작하기 위해서는 반도체 집적기술이 반드시 필요하다. 초당 10억개 이상의 계산량을 수행할 수 있는 GFLOPS 신호처리기 개발을 위해 VLSI, VHSIC 기술들을 이용하고 있다. 일정 시간당 계산량이 높을수록 먼거리의 표적을 더욱 정확하게 탐지/추적할 수 있으며 더욱 높은 해상도의 영상을 처리할 수 있다.

(3) 적응 배열

고밀도의 전자파 환경에서 잡음성 재머와 같이 특성을 예측할 수 없는 원치 않는 신호로 인해 레이다의 SNR이 감쇄되는 것을 막기 위해서는 재머의 유무 및 방향을 판별하여 이를 제거하는 적응구조의 레이다 처리가 필요하다. 적응 간섭 제거 기술은 레이다 반사파로부터 간섭신호의 통계적 특성을 분석하여 여기에 맞는 시간적, 공간적 처리 과정을 수행하여 탐지성능을 향상시킨다.

(4) 역 레이다 영상 (ISAR)

선회하는 선박이나 항공기 표적의 영상을 형성하는데는 기존의 SAR 기술로는 불충분하다. 이는 표적의 선회운동으로 인해 부분별로 서로 다른 주파수 편이 발생하여 표적영상을 흐리게 만들기 때문이다. 표적으로부터 부분별로 발생하는 서로 다른 주파수 편이 정보를 표적 영상형성에 사용하여 더욱 개선된 영상을 얻는 역 SAR(ISAR) 기법이 표적인식에 적용된다.

(5) LPI 및 ARM 대책

ELINT나 ESM 장비에 의해 레이다의 방향, 동작 주파수 밴드, 펄스 폭, 펄스 반복주기, 스캔 속도 등이 탐지된 후 레이다가 유도탄에 의해 공격을 받게되므로 이를 회피하기 위해 LPI 레이다를 이용한다.

LPI 레이다는 매우 낮은 스펙트럼 밀도의 송신출력과 매우 낮은 부엽 안테나를 이용하여 미사일에 노출을 어렵게 한다.

(6) 스틸스 (Stealth) 대책

스틸스는 레이다 표적의 신호특징(Signature)을 줄이는 수단으로 사용하며, 레이다 유효반사 단면적을 감소시켜 신호대 클러터비를 천배 이상 줄여서 레이다로 하여금 표적을 탐지 못하게 하거나, 오인하도록 하는 기법이다. 스틸스 대책은 RCS 감소가 기대되는 비행체 구조물의 공진에 해당하는 장 파장을 사용하는 방법, ISAR 방법, 송수신 분리형의 많은 수의 수신기를 사용하여 여러 거리, 각도면에서 반사되는 에너지를 수신하여 종합하는 기법 등이다.

(7) 디지털 빔 형성

속도가 빠르고 기동이 심한 표적의 정확한 위치를 알기 위해서는 높은 데이터 갱신률의 탐색 및 추적 시에도 부엽의 모양을 광범위하게 조정할 수 있는 안테나가 필요하다. 최신 기술은 10개 이상의 빔 동시에 형성하기 위해 능동 어레이 신호를 IF 및 비디오단에서 받아 처리한다. 장점으로는 각 빔의 독립조정, 거리 방위 방향의 안테나 패턴의 조정이 용이하다.

(8) 적응성

레이다 주변 신호 환경은 미리 알 수 없고 시간에 따라 변하므로 환경 적응성이 요구된다. 차세대 레이다는 환경변화를 실시간으로 적응하여 주변환경을 식별하고 인식하는 능력을 가지고 있어야 한다. 안테나는 각도와 부엽의 적응 널을 만들어서 방향성 제어를 제거하고 넓은 널을 만들어서 지상의 클러터 성분을 방위방향으로 제거한다. 신호처리 과정에서 적응성은 도플러 필터시에 비균질 클러터로부터 들어오는 거리, 방위, 고도성분의 클러터를 제거하기에 용이하다.

(9) 고분해능과 고정밀 방향성

주파수 및 방위각도의 정확한 스펙트럼 추정은 다수의 협대역 저고도 비행체를 추적하거나 같은 분해능 내에 있는 다수의 표적을 추적하는데 매우 중요한 기능이다. 레이다에서는 주어진 펄스 갯수가 작기 때문에 FFT를 사용하는 경우 요구되는 분해능을 얻기 어렵다. 최대 엔트로피 추정법(MEM), 최대 Likelihood 방법 등을 이용하여 적은 데이터로 모델에 적합한 차수를 얻고, 몇 개의 변수로 스펙트럼을 추정한다. 그러나 SNR이 높아야 하고 계산량이 많다는 단점이 있다.

(10) 다차원 신호처리

다차원 신호처리는 레이다 신호를 시간, 주파수, 진폭크기, 도달방향과 분극 영역 등의 각기 다른 영역에서 처리하여, 상호 정보를 이용하여 탐지확률을 높이고 오경보 발생률을 줄이는 방법이다. 이 기법은 통합된 설계를 통하여 이루어진다. 공간상에서 Space-Time 문제를 대역확산 및 LPI 레이다처럼 광대역 수신을 위한 빔의 형성이 필요하다. 다차원 처리방법은 공간 빔 형성과 시간 필터를 연결하여 가능하다.

(11) 표적 식별

통상 표적식별은 IFF나 ESM에 의한 방법이 있지만 비협조 표적식별(NCTR)이 궁극적 목표이다. 이러한 기법에는 여러가지 처리 영역에 따라 다양한 방법이 있지만 신뢰도를 높이기 위해 인공지능이나 신경망을 이용하여 많은 영역의 정보가 포함된 레이다 영상정보에서 자동식별하는 기법들이 필요하다.

(12) 적용성

레이다 기술 적용성 측면에서 디지털 빔 형성 및 적응성이 유리하며, 이들 기술은 디지털 기술(VLSI, VHSIC)의 처리능력과 구조에 제한을 받는다. 차세대 레이다의 특징으로서 모듈화, 프로그램 가능성 등을 들 수 있으며, 여러종류의 레이다를 하나의 프로세서로 프로그램 변경만으로 사용가능하다. 모듈화는 모든 프로그램 가능 신호처리기(PSP)의 공통 사항이며, 병렬 프로세서 측면에서 다중 DSP를 이용하여 보드 레벨의 속도를 GFLOPS 정도로 최대화 하고 있다.

VII. 결론

레이다 신호는 주변환경에 따라 시간, 주파수, 공간 영역에서 고유한 신호특성을 가지고 있으며, 신호처리 기법도 다양하다. 본 논문에서는 레이다 신호처리에 관련된 주요 기법에 대해 개괄적으로 고찰하고, 향후 레이다 신호처리 발전추세와 응용분야에 대해 살펴 보았다. 레이다 신호처리 분야는 일반적으로 잘 알려진 음성이나 영상 신호처리 분야와 달리 고유한 알고리즘과 구조가 요구된다. 레이다 신호처리 기술은 "스마트"한 레이다를 위한 두뇌 역할을 하기 때문에 그 필요성과 중요성이 증가하고 있다. 그러나, 고

속, 대용량의 신호를 주어진 빔 주사시간 동안에 실시간으로 처리하여 표적정보를 추출해야 하기 때문에 아직도 상용 프로세서의 속도 한계내에서 알고리즘의 수행에 다소 제약을 받고 있다. 최근 레이다의 응용이 군사적인 목적 뿐만 아니라 민수용으로 공항, 항공기, 선박, 자동차, 위성 등 많은 분야에 필수적으로 요구되는 발전추세에 따라 우리도 이에 대한 관심과 기술개발로 국제적 기술수준에 뒤떨어지지 않도록 해야 할 것이다.

參考文獻

- [1] M. Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1990.
- [2] C. Schleher, *MTI and Pulse Doppler Radar*, Artech House, 1991.
- [3] F. Nathanson, *Radar Design Principles: Signal Processing and Environment*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1990.
- [4] Eli Brookner, *Aspect of Modern Radar*, Artech House, 1988.
- [5] B. Lews, F. Kretschmer, Jr., and W. Shelton, *Aspects of Radar Signal-Processing*, Artech House, 1986.
- [6] R. Nitzberg, *Adaptive Signal Processing for Radar*, Artech House, 1992.
- [7] A. Farina, *Antenna-Based Signal Processing Techniques for Radar Systems*, Artech House, 1992.
- [8] Y. Kwag, S. Park et al, "Programmable Pulsed Doppler Radar Signal Processor Implementation With DSP for Adaptability and Multifunction," IEE International Conference on Radar-'92, pp.379-382, U.K., Oct. 1992. (●)

감사의 글

본 논문 작성에 도움을 준 레이다 신호처리 연구팀 박성철, 조명제, 박영찬 연구원들에게 감사드립니다.

筆者紹介



郭 濼 吉

1953年 11月 20日生

1976年 2月 한국항공대학 항공통신공학과, 학사

1981年 2月 한국과학기술원 전기전자공학과, 석사

1987年 6月 미국 오하이오대학 전기공학과, 박사

1976年 3月 ~ 1983年 8月 국방과학연구소 선임연구원

1983年 9月 ~ 1987年 5月 미국 오하이오대학 Avionics Research Center 연구원

1992年 3月 ~ 1992年 7月 한국과학기술원 전기전자공학과 대우교수(겸직)

1987年 7月 ~ 현재 국방과학연구소 책임연구원, 신호처리연구실장

주관심 분야 : 적응 신호처리, 레이더 신호처리, 디지털 통신