

Multi-site 기상 레이더를 위한 주파수 재사용 기법

임 선 민[°], 윤 영 근^{*}, 이 영 환^{*}, 정 영 준^{*}

Frequency Reuse Method for Multi-Site Weather Radar

Sun-min Lim[°], Young-keun Yoon^{*}, Young-hwan Lee^{*}, Young-jun Chong^{*}

요 약

본 논문에서는 기상 레이더의 효율적 주파수 사용을 위해 직교 파형과 간섭 제거 기술을 이용한 주파수 재사용 기술을 제안하였다. 주파수 공유로 발생한 레이더간 간섭 영향을 줄이기 위해 직교 코드 시퀀스 간 상호 상관 최대값이 가장 작은 조합으로 선택하였으며, 잔여 간섭 성분 제거를 위해 CLEAN 알고리즘을 사용하였다. 전산 모의 실험 결과 재사용 기술 적용 후에도 성능 요구 조건을 만족하는 것으로 나타남으로써 현행 S 밴드 기상 레이더의 점유 주파수 8개를 1개로 줄일 수 있어 신규 주파수 확보 가능성 제시하였다.

Key Words : frequency reuse, weather radar, orthogonal waveform, interference cancellation

ABSTRACT

In this paper, we propose a frequency reuse method for efficient frequency use of multi-site weather radar. Our method uses a set of orthogonal pulse compression codes and CLEAN algorithm for sidelobe interference cancellation. Computer simulation results show that performance of proposed method meet performance requirements of [1], The current S-band weather radars in South Korea use the 8 different frequency channels to avoid interference. Using proposed method, number of occupied channels can reduce from 8 to 1, the 7 frequency channels may be use for other services

1. 서 론

한정된 전파 자원의 효율적 활용과 경제적 가치를 고려해 2000년 이후부터 지식 정보화 사회의 신성장 동력원의 한 매체로서 전파 자원에 대한 중요성이 부각되고 있다. 이러한 추세의 일환으로 최근에 주파수 자원의 효율적 활용을 위한 방안 연구가 국내·외적으로 활발히 추진되고 있으며, 특히 고출력의 레이더

는 이웃 대역의 타 서비스 제공에 미치는 영향이 매우 커 주파수 양립성 및 공유 측면에서 많은 어려움을 유발한다. 현재는 멀티사이트에서 운용되는 동일 용도 레이더는 각각 특정한 주파수 채널을 독립적으로 할당, 운용함으로써 원천적으로 간섭을 배제하고 있다.

이를 위한 연구 방안의 일환으로 멀티사이트에 할당된 동일 용도의 레이더 주파수를 하나의 채널로 운용할 수 있다면 주파수 자원의 효율성과 미래 소요 주

※ This research was funded by the MSIP(Ministry of Science, ICT & Future Planning), Korea in the ICT R&D Program 2013

◆° First Author and Corresponding Author : 한국전자통신연구원 전파기술연구부 스펙트럼공학연구실, smlim@etri.re.kr, 정회원

* 한국전자통신연구원 전파기술연구부 스펙트럼공학연구실, ykyoon@etri.re.kr, yhwang@etri.re.kr, yjchong@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-12-535, 접수일자 : 2013년 12월 12일, 심사일자 : 2014년 1월 20일, 최종논문접수일자 : 2014년 1월 24일

파수 확보 기술에 획기적인 전환이 될 것이다. 2013년 현재 기상청 관할 광역 측정 기상 레이다는 10 대로 각각 다른 주파수, 다른 지리적 위치에서 다양한 모델로 사용 중이다. 10대의 레이다 중 8대는 통신 시스템에서 많이 사용하고 있는 S 밴드를 사용하고 있으며, 기상 레이다의 특성상 원거리 기상 측정을 위해 매우 높은 출력을 가지기 때문에 다른 이동통신 시스템과의 주파수 공유 및 인접 대역 사용이 어렵다. 그리고 최근 잦은 기상 이변으로 기상 예측에 대한 높은 정확도를 요구하고 있어 계속적으로 추가 주파수가 요구되고 있으므로 한정된 자원의 효율적 사용을 위해 멀티사이트 레이다의 주파수 이용 효율 향상 기술에 대한 연구가 꼭 필요하다.

최근 주파수 재사용 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데 레이다간 전송 시간차를 이용한 방식^[1]은 구현은 용이하나 레이다 개수가 증가할수록 펄스 반복 시간 감소 혹은 펄스 개수 감소로 데이터 품질 저하가 나타나며, 전송 주파수차를 이용한 방식^[2]은 데이터 품질은 유지되나 레이다 개수와 정보 대역폭에 비례하여 점유 대역폭이 증가하는 단점을 가진다. 직교 파형을 이용한 방식^[3-4]은 데이터 품질이나 점유 대역폭의 증가없이 주파수 재사용이 가능하지만 앞의 두 방식에 비해 계산 복잡도가 높다는 단점을 가진다. Multi-site 기상 레이다 시스템에서 주파수 재사용이 가능하려면 알고리즘 적용 후에도 레이다 시스템 성능 요구 조건을 만족시킬 수 있어야 하는데 일 예로 표 1은 미국 기상 레이다 WSR-88D의 성능 요구 조건을 나타낸다^[5].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 기상 레이다의 현황 및 특징에 대해 설명하고, 3장에서는 기원 구된 레이다 시스템의 주파수 이용 효율 향상 방법을 소개하였으며, 4장에서는 펄스형 기상 레이다 시스템에 적용할 수 있는 주파수 재사용 방법을 제안하였다. 다음으로 5장에서는 전산 모의 실험을 통해 제안 방법의 성능을 검증하고 6장에서 결론으로 마무리하였다.

표 1. WSR-88D 성능 요구 조건
Table 1. Performance requirement of WSR-88D

Estimation Accuracy	Value
Reflectivity	≤1dB; SNR>10dB;
Radial Velocity	≤1m/s; SNR>8dB;
Spectrum Width	≤1m/s; SNR>10dB;

II. 기상 레이다

기상 레이다는 송신된 전자기파가 비, 눈 또는 우박 등의 기상 목표물에 부딪혀 되돌아오는 반사파의 신호를 분석하여, 강수 구름의 위치와 이동 상태, 강수 강도 등을 감지 추적하는 기상 관측 장비이다. 일반적으로 조밀한 시공간 해상도를 가지며, 반경 200~300 km의 넓은 영역을 관측할 수 있다.

2.1 국내 기상 레이다 운용 현황

우리나라는 1970년 관악산에 기상 레이다가 처음 설치되어 레이다 관측이 시작되었으며, 이후 제주 고산, 부산, 동해, 군산에 레이다가 설치되었다. 레이다 관측 영역 확대와 관측 사각 지대 해소를 위해서 백령도를 시작으로 진도, 광덕산, 면봉산, 성산에 레이다를 추가로 설치하였다. 노후한 관악산, 구덕산, 고산, 오성산 레이다를 새로운 S-band 레이다로 교체하였으며, 동해 레이다는 2009년에 강릉 레이다로 교체되었다. 10개 지점에서 레이다를 운영함으로써 우리나라 전역의 악기상을 감지할 수 있는 기본적인 관측망이 완성되었다^[6]. 기상 레이다가 기상 관측에서 중요한 부분을 담당하고 있지만, 전국 10개소 기상 레이다가 다양한 모델을 가지고 지역별로 운영되다 보니 자료의 품질관리와 위험기상에 대해 신속하게 대처하는데 한계가 있었다. 그래서 기상 레이다 센터를 설립하였으며, 기상 레이다 관측의 정확도 향상 및 효율적인 자료 관리를 위해 2013년부터 2018년까지 기상청 광역레이다에 대해 EEC사의 DWSR-8501 S/K 이중 편파 동

표 2. DWSR 8501S/K 스펙
Table 2. DWSR 8501S/K specification

Parameter	Value
Operating Frequency	2700 ~ 3000 MHz
Pulse Width	0.4~4.5usec
Pulse Repetition Frequency	200 ~ 2400 Hz
Range	minimum 600 Km
Maximum Velocity	up to 256 m/s
Gain minimum	≥ 45dB
Half Power Beam Width	0.95°
Type	coaxial magnetron
Peak Power	850KW
Minimum Discernible Signal	-114 dBm
Linear Dynamic Range	up to 105 dB
Maximum No. of Processed Range Bins	up to 8192
Minimum Processing Resolution	as low as 16 m

일 모델로 교체할 예정이다^[7]. 표 2는 교체 예정 모델 DWSR- 8501 S/K 레이더의 주요 스펙을 나타낸다^[8].

2.2 거리, 시선 속도 그리고 강우량

기상레이더는 강수 입자에 부딪혀 되돌아오는 신호를 이용하여 강수 지역, 강수 세기 그리고 이동 속도 등을 탐지한다. 일반적으로 펄스 형태의 에너지를 안테나를 통하여 대기중으로 방사하며 방사된 에너지는 대기중의 어떤 거리에 수상 입자로 입사되고, 수상 입자로 입사되는 에너지의 일부는 다시 후방으로 산란되는데 후방 산란되는 양의 정도는 기상 입자의 크기, 모양, 상태, 집중도에 따라 달라진다. 이 일련의 과정을 수식으로 형식화한 것이 레이더 방정식이며 식 (1)과 같다^[9].

$$P_r = \left(\frac{\pi^3 P_t G \theta \phi h}{1024 \lambda^2 \ln 2} \right) \frac{|k|^2 Z}{r^2} \quad (1)$$

여기서 P_t 는 최대 송신전력, h 는 펄스폭(m), G 는 안테나 이득, θ 는 빔폭(radian), λ 는 파장(cm), k 는 유전율(물인 경우 0.93, 얼음인 경우 0.23), Z 는 수상 입자에 의한 레이더 반사도 인자(radar reflectivity factor), r 은 목표물까지 거리를 나타낸다. 거리는 방사된 펄스가 되돌아오는 시간으로부터 추정할 수 있으므로 수신 전력 P_r , 유전율 k , 그리고 거리 r 을 알면 기상 입자에 의한 레이더 반사도 인자 Z 를 알 수 있는데 Z 는 강우율 R 과 관련된다. 레인지 빈(bin) 안에서 강우율이 어떻게 결정되는지를 살펴보기 위하여 관계에 대한 연구가 가장 많이 이루어진 미국의 WSR-88D 레이더 관계식을 예로 들어 설명하면 다음 식과 같다^[10].

$$Z = aR^b = 300R^{1.4} \quad (2)$$

위의 식과 같이 $Z-R$ 관계는 항상 지수 형태로 표현할 수 있는데 상수 300과 1.4는 환경에 따라 달라지며 강우율과 레이더 반사도 관계를 명확하게 하기 위한 수많은 연구가 진행 중이다. 일정한 목표물에 방사된 송신파의 위상(phase)은 반사하는 목표물의 레이더 빔 방향에서 이동속도(시선속도)에 따라 다르게 수신된다. 레이더 전파의 주파수 분석에서 송신파와 수신파의 위상차가 $d\phi$ 인 파는 다음 식에 의해 f_d 만큼 도플러 편이되어 수신된다.

$$\frac{dt}{d\phi} = 2\pi f_d \quad (3)$$

레이더의 송신파는 일정한 체적을 가진 펄스로 방사되고, 이 펄스 체적에서 관측 자료를 수집한다. 채집된 펄스 체적에는 서로 다른 속도를 가진 많은 기상입자가 있고, 이로 인하여 수신된 신호를 주파수 스펙트럼 분석하면 도플러 스펙트럼이 얻어진다. 이 스펙트럼의 평균 도플러 편이 $\overline{f_d}$ 와 관계식 (4)로부터 기상 입자의 평균 시선 속도 V_r 를 얻을 수 있다.

$$\overline{f_d} = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (4)$$

III. 레이더 시스템의 주파수 이용 효율 향상 방법

레이더 시스템의 경우 현재는 배타적 주파수 할당을 통해 운영되고 있으나 갈수록 사용 범위가 늘어나고, 높은 정확도가 요구되고 있어 계속적인 추가 주파수가 요구된다. 그러나 주파수는 한정된 자원으로 레이더 시스템 뿐만 아니라 다른 통신 시스템의 수요도 증가하고 있는 추세라 한정된 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 주파수 재사용 방법과 같은 연구가 시급한 실정이다. 점유 대역폭은 레이더의 개수에 비례하여 증가하므로 정확도를 높이기 위해 개수를 증가시키고 싶어도 주파수 확보가 어려워 추가 설치가 불가능할 수 있다. 이러한 주파수 부족 문제를 해결하기 위해 레이더 주파수 이용 효율 향상에 대한 연구가 진행되고 있으며 대표적인 방법들은 다음과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다.

첫 번째, 레이더간 전송 시간차를 이용한 방식은 시간 동기화된 레이더 간 시간 다중화를 수행하여 상호 간섭을 방지하는 방식으로 펄스나 기저국의 순서를 정해 사용하므로 단일 채널로 공유가 가능하다. 그러나 이 방식의 경우 공유 레이더 개수가 N 이라면 펄스 반복 주기가 N 배 증가하여 동일 탐색 시간 기준으로 판단할 때 데이터 품질이 저하되거나, 펄스 반복 주기가 동일한 경우에는 탐색 거리가 $1/N$ 으로 줄어든다. 두 번째, 전송 주파수차를 이용한 방식은 개별 레이더 간 탐색 거리에 따른 정보 대역폭만큼의 주파수 이격을 제외하고 나머지 대역을 공유하는 방식으로 점유 대역폭은 정보 대역폭과 공유 레이더의 개수에 비례하여 증가하므로 전송 시간차를 이용한 방식보다는 큰 대역폭을 필요로 한다. 마지막으로, 직교 파형을 이용한 방식은 각 레이더 전송 파형간 직교 성질로 인해 동일 채널 공유가 가능하여 탐색 거리, 데이터 품질 감소 및 점유 주파수의 증가는 발생하지 않으나 앞

의 두 방식에 비해 간섭 제거 등의 추가 기능으로 인해 신호 처리 복잡도는 증가한다. 그러나 직교 파형을 이용한 방식에 이용되는 신호처리 복잡도는 최근 이동통신 시스템에 이용되는 신호 처리의 복잡도와 비교하면 낮은 편이므로 검출 정확도 및 주파수 자원을 고려할 때 기상 레이더 시스템에 직교 파형을 이용하는 방식이 적절하다고 판단된다.

IV. Multi-site 기상 레이더를 위한 주파수 재사용 방법

레이더 시스템에서 짧은 펄스폭과 큰 최대 전력을 지닌 파형을 전송하면 수신단에서는 높은 거리 분해능과 높은 검파 성능을 갖는다. 펄스 압축 방식이란 이러한 파형 대신에 긴 펄스폭과 적은 최대 전력을 지닌 파형을 전송하여도 동일한 거리 분해능과 검파 성능을 얻게 하는 레이더 방식을 말한다¹¹⁾. 펄스 압축에 일반적으로 많이 사용되는 코드로는 PN code, Barker code, 및 Frank code 등이 있으며, 코드 상관 특성의 주 로브 폭과 사이드 로브 특성 분석을 통해 코드를 선택할 수 있다.

K 개의 레이더를 가정하는 경우 대표적인 방법은 직교 행렬로부터 K 개의 직교 코드를 생성하는 방법이다. 길이 N 을 가지는 k 번째 코드 s_k 는 레이더간 독립성이 유지되도록 다음 식과 같은 직교 성질을 만족해야 한다.

$$A_{s_k}[l] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_k[n] s_k^*[n+l] = \begin{cases} 1, & l=0 \\ 0, & l \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$C_{s_i, s_j}[l] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_i[n] s_j^*[n+l] = 0, \quad i \neq j \quad (6)$$

그러나 생성 코드가 위의 자기 상관 함수 (1)과 상호 상관 함수 (2)의 이상적인 성질을 만족시키기는 매우 어려우므로 주어진 직교 코드들의 집합에서 상관 부엽이 작은 것을 선택해야하며, 그럼에도 불구하고 부엽의 크기가 신호 검출에 영향을 미치는 경우에는 간섭 제거 알고리즘으로 간섭 신호 성분을 없애야한다. 예를 들어 길이 N 의 하다마드 직교 행렬로부터 K 개 레이더를 위한 조합을 선택하는 경우의 수는 $N/(N-K)!$ 로 계산된다. 본 논문에서는 이 조합들 중 레이더간 간섭 영향을 최소로 하기 위해 자기 상관 부엽과 상호 상관 부엽의 최대값이 최소가 되는 경우로 선택, 할당하였다.

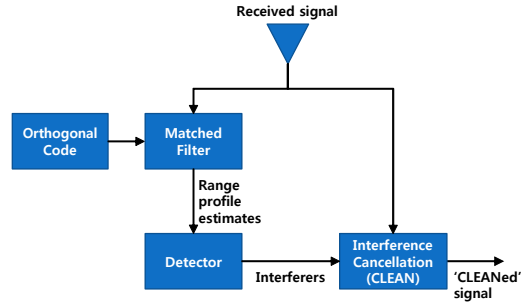


그림 1. 직교 코드 레이더의 간섭 제거 신호 처리
Fig. 1. Signal processing of orthogonal code radar for interference cancellation

직교 코드를 가진 여러 레이더가 동일 채널을 사용한다고 가정하면 직교 코드 간 상관성으로 인해 타겟 검출에 심각한 간섭을 일으킬 수 있다. 일 예로 간섭 신호가 원 신호의 에코 신호보다 큰 경우 사이드 로브의 간섭 성분 영향으로 타겟의 거리 및 속도 추정에 오류가 발생할 수 있다. CLEAN 알고리즘¹²⁾은 대표적인 간섭 제거 알고리즘으로 사이드 로브를 제거하여 검출 오류를 낮출 수 있는데 직교 코드 레이더에서는 그림 1과 같이 동작한다. 점 타겟을 가정하여 자세히 설명하면 다음과 같다.

$$T(x) = \sum_{n=1}^L A_n \delta(x - x_n) \quad (7)$$

여기서 x_n 은 타겟에 대한 시간 지연, A_n 은 복소수 후방 산란 계수 그리고 $\delta(\cdot)$ 은 임펄스 응답을 나타낸다. 레이더 신호로 사용된 이진 코드 시퀀스는 다음과 같다

$$B = \{b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{N-1}\} \quad (8)$$

이진 시퀀스의 비주기적인 자기상관함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_A(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1-|m|} b_k b_{k+m} \quad (9)$$

위의 자기 상관함수는 다음과 같이 시퀀스의 형태로 표현할 수 있다.

$$C_A = \{c_{-N} \ c_{-N+1} \ \dots \ c_{-1} \ c_0 \ c_1 \ \dots \ c_N\}$$

여기서 c_0 는 주 로브 최대치로 1과 같으며 다른 항은

간섭 사이트 로브이다. 수신 신호는 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$R = \sum_{n=1}^L A_n B(x_n) \quad (10)$$

위 식에서 $B(x_n)$ 은 x_n 만큼 시간 지연을 가진 이진 코드 시퀀스이다. 정합 필터는 선형 필터이므로 수신 신호에 정합 필터링을 수행하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \sum_{n=1}^L A_n C_A(x_n) \quad (11)$$

여기서 $C_A(x_n)$ 는 x_n 만큼 시간 지연을 가진 경우에 대한 자기 상관 시퀀스이다. 이상적인 CLEAN 알고리즘은 앞의 정합 필터 결과에서 사이트 로브 간섭 영향을 제거하는 것으로 제거를 위해 사용되는 사이트 로브 시퀀스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_A = \{c_{-N} \ c_{-N+1} \ \dots \ c_{-1} \ 0 \ c_1 \ \dots \ c_N\} \quad (12)$$

공간적으로 잘 나뉜 다수개의 타겟을 가정하더라도 가장 강한 타겟의 주 로브는 약한 타겟의 사이트 로브에 의해 영향을 받는다. 공간적으로 분리되어 있기 때문에 수신 신호의 정합 필터 결과에서 최대값은 가장 강한 타겟으로부터의 주 로브의 피크값과 거의 같을 것이며, 나머지 사이트 로브 중에서 가장 강한 것이 두번째 타겟의 주로브가 된다. 이러한 순서로 가장 강한 타겟부터 약한 타겟의 순서대로 신호 검출이 가능하다. 이진 코드 레이더 시스템에서의 CLEAN 알고리즘은 다음과 같은 순서로 진행된다.

1. 초기 반복 인덱스 $j=0$ 으로 셋팅하고 초기 프로세싱 시퀀스 정합 필터로부터 처리 결과 $P_j = H$ 를 이용한다. 초기 타겟 시퀀스는 $T_j(x) = 0$ 으로 임의의 시간 지연 x 에 대해 0으로 설정한다.
2. 프로세싱 시퀀스의 최대값 $M_j = \max(|P_j|)$ 과 그것의 시간 지연 인덱스 $X_j = \arg\{\max(|P_j|)\}$ 을 구하고 타겟 시퀀스를 $T_j(x) = T_j(x) - M_j\delta(x - X_j)$ 로 설정한다.
3. 프로세싱 시퀀스를 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} P_j(x = X_j - N \dots X_j + N) \\ \leftarrow P_j(x = X_j - N \dots X_j + N) - M_j C_A \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 C_A 는 이진 코드 시퀀스의 비주기적 자기 상관 함수이다.

4. 잔류 신호 시퀀스 $|P_j|$ 의 표준 편차를 계산하고 기대되는 잡음 레벨 값과 비슷하면 단계 5로 가고, 아니면 $j = j + 1$ 로 하고 단계 2로 간다.
5. $T_j(x)$ 는 정확한 타겟 정보이다.

CLEAN 알고리즘을 성공적으로 구현하기 위해서는 모든 타겟으로부터 계산된 응답의 주 로브 피크값이 타겟 신호를 구별할 수 있을 만큼 충분히 커야만 한다.

V. 전산 모의 실험

본 절에서는 4장에서 설명한 기상 레이더 시스템에 이진 직교 코드 기반의 주파수 재사용 알고리즘 적용하였을 때에 대한 성능 검증을 수행하였다. 전산 모의 실험에 사용한 시스템 파라미터는 표 3과 같으며, 8대 레이더 각각에 대한 파라미터 설정은 표 4로 정리하였다. 기준 레이더는 빔폭 1°를 가지는 펄스빔으로 주 로브로 송·수신되며, 검출 대상 타겟은 3개로 위치, 속도, 강수량을 다르게 설정하였다. 나머지 7개의 간섭 레이더로부터 발생된 신호는 주로브로 송신되고 사이트 로브로 수신되는 경우를 가정하였으며 위치, 속도는 각각 다르게 설정하고 강수량만 동일하게 100mm/H로 설정하였다. 그림 2~4는 에코 신호의 시간 샘플 신호를 나타내는 것으로 그림 2는 단일 채널 단독 사용에 대한 3개 타겟으로부터 에코 신호 시간

표 3. 레이더 시스템 파라미터
Table 3. Radar system parameters

Parameter	Value
Operating Frequency	3000 MHz
Pulse Width	12.8 usec
PRF[Hz]	322
Range	minimum 460 Km
Maximum Velocity	up to 256 m/s
Antenna Max Gain	≥ 45 dB
Antenna Sidelobe Level	≤ 16 dB
3dB Beam Width	1°
Peak Power	850 KW
Noise Figure	6 dB
System Loss	8 dB
Code Length	128
Number of Pulses	20
Number of Targets	3

표 4. 전산 모의 실험 파라미터

Table 4. Computer simulation parameters

Radar		Range [Km]	Radial velocity [m/s]	Rain rate [mm/h]	SNR [dB]
Ref. radar	Target 1	350	7.5	9	27.34
	Target 2	400	6	7	24.56
	Target 3	450	4.5	5	21.38
Interference radar	Radar 1	10	7.5	100	44.86
	Radar 2	30	3	100	35.32
	Radar 3	50	4.5	100	30.88
	Radar 4	70	4.5	100	27.96
	Radar 5	90	3	100	25.78
	Radar 6	110	1.5	100	24.03
	Radar 7	130	6	100	22.58

샘플을 나타낸 것이고, 그림 3은 단일 채널을 8개 레이다가 공유하는 경우 즉, 7개의 간섭 레이다가 존재하는 경우의 수신 신호를 나타낸 것이다. 그림 4는 그림 3의 수신 신호에 대해 정합 필터링을 통해 코드 시퀀스를 추정하고, 펄스 간 비교를 통해 도플러 주파수 옵셋을 보상하고 간섭 신호를 제거한 것으로 그림 2의 간섭 없는 신호와 거의 같게 나타났다. 그림 5와 6은 수신 신호로부터 계산된 거리 프로파일을 나타낸 것으로 그림 5는 간섭 포함된 수신 신호의 정합 필터링 결과로 표 3에 표시된 간섭 레이다 신호들이 모두 나타나 검출 오류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 간섭 제거 알고리즘을 적용한 경우로 기준 레이다의 타겟 위치인 350km, 400km, 450km에서만 신호가 관찰되는 것을 확인하였다.

표 5는 8개 레이다 공유 상황에서 3개의 타겟에 대한 거리, 속도 그리고 강우량 추정 결과를 정리한 것이다. 가장 낮은 SNR을 가지는 타겟 3을 기준으로 표

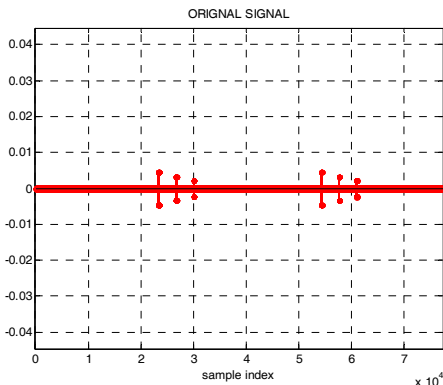


그림 2. 단일 채널 단독 레이다의 멀티 타겟 에코
Fig. 2. Multi-target echos for single-radar in single channel

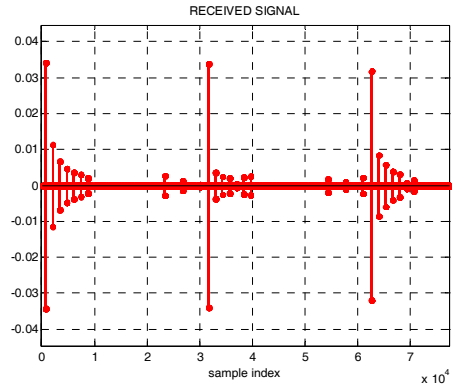


그림 3. 단일 채널 멀티 레이다의 멀티 타겟 에코
Fig. 3. Multi-target echos for multi-radar in single channel

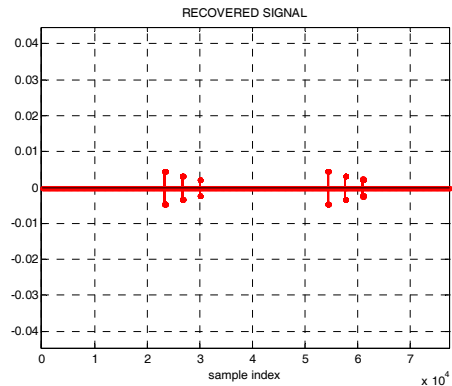


그림 4. 간섭 신호 제거 및 도플러 효과 보상된 신호
Fig. 4. Interference cancellation and Doppler effect compensated signals

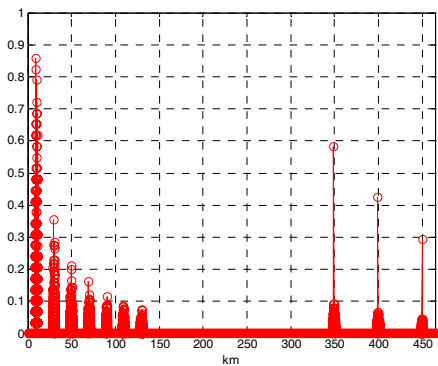


그림 5. 간섭 신호가 포함된 에코 신호의 정합 필터링 결과
Fig. 5. Matched filtering result of echo signals with interference

4의 설정값과 표 5의 추정값을 비교해보면 거리는 15m, 속도는 0.0011m/s 그리고 강우량은 0.01mm/h

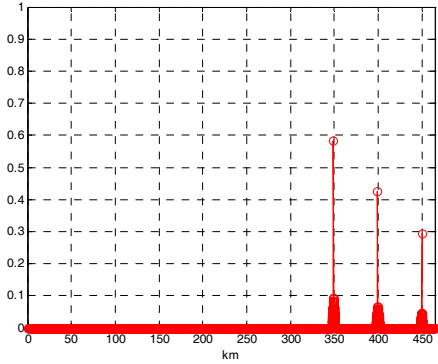


그림 6. 간섭 제거된 신호의 정합 필터 결과
Fig. 6. Matched filtering result of interference removed signal

표 5. 단일 채널 멀티 레이더의 추정 성능
Table 5. Estimation performance of multi-radar in single channel

	Range [Km]	Radial velocity [m/s]	Rain rate [mm/h]	Spectrum width [m/s]
Target 1	350.010	7.4971	9.01	0.0262
Target 2	400.005	5.9976	7.01	0.0347
Target 3	450.015	4.5011	5.01	0.0550

만큼의 오차를 나타낸다.

기상 레이더 시스템에서 주파수 재사용이 가능하려면 알고리즘 적용 성능이 기상 레이더의 성능 요구 조건을 만족시켜야만 한다. 표 1 WSR-88D 레이더의 성능 요구 조건은 SNR=8dB일 때 반사도와 속도 추정 오차에 대한 요구 조건을 만족시켜야 한다. 표 6은 앞의 전산 모의 실험과 동일한 조건에서 타겟의 SNR을 8dB 이하로 맞추기 위해 안테나 최대 이득을 35dB로 조정된 경우로 멀티 타겟의 SNR을 나타낸다. 표 7은 표 6의 SNR 조건에서 단일 채널을 단독 사용하는 경우에 대한 추정값이고, 표 8은 단일 채널을 8개 레이더가 공유하는 경우에 대한 추정값을 나타낸 것으로 표 8을 표 3의 설정값과 비교 했을 때 반사도, 속도, 스펙트럼 폭 모두 표 1의 성능 요구 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 표 7 단일 채널 단독 사용과 표 8 단일 채널 공유 사용의 성능 차이를 비교하면 반사도와 속도 추정값은 거의 비슷하지만 스펙트럼 폭의 경우 간섭 제거 알고리즘 수행 후의 잔류 성분으로 인해

표 6. 멀티 타겟의 SNR
Table 6. SNR of multi-target

	Target 1	Target 2	Target 3
SNR[dB]	7.34	4.56	1.38

표 7. 단일 채널 단일 레이더의 추정 성능
Table 7. Estimation performance for single-radar in single channel

	Range [Km]	Radial velocity [m/s]	RCS [dB]		Spectrum width [m/s]
			설정	추정	
Target 1	350.010	7.5017	42.63	42.64	0.0724
Target 2	400.000	5.9963	42.17	42.21	0.1700
Target 3	450.015	4.5001	41.03	41.09	0.2355

표 8. 단일 채널 멀티 레이더의 추정 성능
Table 8. Estimation performance for multi-radar in single channel

	Range [Km]	Radial velocity [m/s]	RCS [dB]		Spectrum width [m/s]
			설정	추정	
Target 1	350.010	7.5092	42.63	42.64	0.1951
Target 2	400.000	5.9937	42.17	42.23	0.3143
Target 3	450.015	4.5131	41.03	41.21	0.4869

약간 성능 차가 나타나는 것으로 확인되었다.

VI. 결론

본 논문에서는 한정된 주파수 자원의 효율적인 사용을 위해 배타적 주파수 할당 방식을 채택하고 있는 기상 레이더 시스템을 위한 주파수 재사용 알고리즘을 제안하였다. 다양한 알고리즘 중에서 탐색 거리 및 데이터 품질 감소가 적고, 점유 대역폭 증가가 발생하지 않는 직교 코드를 사용 및 간섭 제거 알고리즘을 이용하는 방식을 제안하였으며, 광역 기상 레이더 시스템 파라미터 기반으로 전산 모의 실험을 수행한 결과 단일 채널 단독 사용의 경우보다 추정 성능은 약간 감소되었지만 레이더 자체의 성능 요구 조건은 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 직교 파형을 이용한 주파수 재사용 기술을 S 밴드 기상 레이더에 적용한다면 8개 채널에서 1개 채널로 점유 주파수를 감소시킬 수 있어 기상 정확도를 향상을 위한 추가 레이더 설치도 가능할 것으로 기대되며, 확보된 7개의 가용 주파수는 다른 용도의 서비스 활용에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] Multi-station HF FMCW radar frequency sharing with GPS time modulation multiplexing, Patent Number 06856276, Codar.

[2] J. J. M. de Wit, W. L. van Rossum, and A. J. de Jong, "Orthogonal waveforms for FMCW MIMO radar," *IEEE Radar Conf.*, pp. 686-691, Kansas City, MO, May 2011.

[3] N. Lee and J. Chun, "Orthogonal pulse compression code design for waveform diversity in multistatic radar systems," *IEEE Radar Conf.*, pp. 1-6, Rome, Italy, May 2008.

[4] S. J. Lee, et. al., "A Study on frequency reuse method of ocean surface radar using matched filtering and orthogonal waveforms," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 211-212, Yongpyeong, Korea, Feb. 2013.

[5] J. Bech and J. L. Chau, Doppler radar observations - weather radar, wind profiler, ionospheric radar, and other advanced applications, InTech, 2012.

[6] <http://web.kma.go.kr/>

[7] K. Y. Park, et. al., "Introduction plan of single model radar with High Technology," *Weather Radar Workshop*, 2010, 10.

[8] <http://www.eecradar.com/pdf/EEC-S-Band-Specs.pdf>

[9] Rain Radar Manual from <http://www.hrfco.go.kr/html/notice/seminar.jsp>,

[10] <http://www.wdtb.noaa.gov/>

[11] H. Lee, System design and analysis of pulse compression radar for meteorological observation network, Ph.D. dissertation, GIST, 2011.

[12] H. Deng, "Effective CLEAN algorithms for performance enhanced detection of binary coding radar signals," *IEEE Trans. signal processing*, Vol. 52, No. 1, pp. 72-78, Jan. 2004.

임 선 민 (Sun-min Lim)



2000년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 학사
 2002년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 석사
 2010년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 박사
 2006년 9월~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원

<관심분야> Cognitive Radio 및 스펙트럼 센싱, 비선형 시스템의 선형화

윤 영 근 (Young-keun Yoon)



1997년 2월 : 충북대학교 전기공학과 졸업
 1998년 2월 : 충북대학교 전파공학과 석사
 2007년 8월 : 충북대학교 전파공학과 박사
 2000년 4월~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원

<관심분야> 전파공학, 통신공학, 전파전파

이 영 환 (Young-hwan Lee)



1984년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 졸업
 1994년 2월 : 광운대학교 전자공학과 석사
 2007년 2월 : 한국정보통신대학교 전자공학과 박사
 1989년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 전파기술연구부 스펙트럼공학연결 책임연구원

<관심분야> 전자장해석, 이동통신안테나, 무선설비 기술기준 및 표준화

정 영 준 (Young-jun chong)



1992년 2월 : 제주대학교 전자공학과 학사
 1994년 2월 : 서강대학교 전자공학과 석사
 2005년 2월 : 충남대학교 전자공학과 박사
 1994년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 스펙트럼공학연구실 실장, 책임연구원

<관심분야> 스펙트럼공학, RF 회로 및 시스템, 디지털 무전기