

Stepped Chirp Waveform을 이용한 레이다 고해상도 파형 처리의 구현과 평가

권 지 훈*

Implementation and Evaluation of High-Resolution Radar Waveform Processing using Stepped Chirp Waveform

Jihoon Kwon*

요 약

레이다 표적 특징을 분석하기 위한 목적으로 SCW(Stepped Chirp Waveform)을 이용한 고해상도 파형이 연구되고 있다. SCW는 일정한 주파수 간격으로 증가하는 N개의 협대역 LFM(Linear frequency modulation)을 사용하는 방식으로, 하드웨어 구현성 향상 및 수신처리 용량 감소에 장점이 있다. 대부분 보고된 논문은 이론적 시뮬레이션, 이상적 환경, 근거리 표적을 대상으로 수행되었고, 실 레이다에 탐지된 원거리 표적을 대상으로 결과를 보고한 자료는 찾기 힘들다. 본 논문은 SCW 알고리즘을 펄스 도플러 레이다로 구현하고, 비콘 시험을 통해 하드웨어 에러를 보상하는 방법을 다룬다. 비콘 시험 보정 후, 점 표적으로 근사화할 수 있는 기준 구를 풍선에 매달아 수십 km 비행시키고, 실 측정 데이터를 통해 SCW 파형 처리 결과를 합성하고 분석한다.

Abstract

High resolution waveforms using Stepped Chirp Waveform (SCW) have been researched for the purpose of analyzing radar target characteristics. SCW is a method that uses N narrowband LFM's that increase at a specific frequency interval, and has the advantages of improving hardware implementation and reducing processing burden. Most of the reported papers were performed on theoretical simulations, ideal environments, and close-range targets, and it is difficult to find data reporting results on long-range targets detected by actual radars. This paper deals with implementing the SCW algorithm on the pulse Doppler radar and compensating for hardware errors through beacon tests. After corrections by beacon test, the reference spherical target that can be approximated as a point scatterer is hung on a balloon and flown for tens of km, and then SCW processing results are synthesized and analyzed through the measured real data.

Keywords

stepped chirp waveform, SCW, high-resolution radar, high-resolution waveform, radar target signature

* 국방과학연구소 제2기술연구원
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0046-2304>

• Received: May 02, 2025, Revised: May 15, 2025, Accepted: May 18, 2025
• Corresponding Author: Jihoon Kwon
Agency for Defense Development
Yuseong P.O. Box 35, Daejeon, Republic of Korea
Tel.: +82-42-822-4271, Email: imrf@naver.com

I. 서 론

레이다 표적 특징을 분석하기 위한 목적으로 고해상도(High resolution) 파형을 사용한다[1][2]. 일반적으로 광대역 LFM(Linear frequency modulation)을 적용함으로써 거리 방향 해상도를 개선할 수 있다. 그러나 광대역 LFM 신호처리는 순시대역폭 대비 2배 이상(실 구현은 4배 이상)의 높은 샘플링 속도를 요구한다. 따라서 처리 데이터 용량 과부하로 인한 하드웨어 구현에 제약이 따른다. 이에 대한 대안으로 로컬 신호(Local signal)를 sweep 시키는 Stretch processing 기법이 고안되었다[1][2]. 그러나 장거리 레이다에서 사용하는 L 또는 S 주파수 대역에서 광대역 RF 회로 제작에 제약이 따르기 때문에, 광대역으로 sweep 하는 로컬 신호 구현이 어렵다. 특히 제한된 펄스폭 내에 광대역 신호를 변조시키기 위해서는 로컬 신호의 빠른 Sweep rate를 요구하는데, 빠른 Sweep rate는 비선형 왜곡을 발생시키고, 비선형성은 신호처리 결과에 악영향을 미친다[3][4]. Stretch processing 기법은 주로 근거리용 FMCW 레이다에 널리 사용되며, 원거리 표적 탐지/추적을 위한 펄스도플러 레이다에 선호되지 않는다.

앞서 제기한 제한사항을 극복하기 위한 대안으로 원거리 표적/탐지 레이다를 위한 고해상도 파형으로 SFW(Stepped frequency waveform) 방식과 SCW(Stepped chirp waveform) 방식이 소개되었다[1][2]. 이 방식들은 Stretch processing 기법과 달리, N개의 협대역 신호를 사용해 광대역을 구현하기에, RF 및 신호처리 과정에서 발생하는 하드웨어 구현 및 성능의 문제를 해결해줄 수 있다[5][6]. SFW는 Δf 의 주파수 간격(Frequency step size)을 갖는 N개의 CW(Continuous Wave)로 변조된 협대역 펄스(Narrowband pulse)를 사용해, 이론적 전체대역폭 $B = N \times \Delta f$ 을 구현한다. CW 펄스를 사용하기 때문에 수신기의 복잡도를 크게 낮출 수 있는 장점이 있다. 하지만 광대역 구현을 위해 다수의 펄스들(N개)이 필요하기에 처리 시간이 길고, CW를 이용한 펄스압축을 수행하기에 시간 축으로 정합 특성이 좋지 않다. 반면에 고해상도 SCW는 레이다의 광대역 파형을 구현하는 대표적인 방법의 하나로, Δf

의 주파수 간격을 갖는 N개의 LFM pulse를 사용하는 방식이다. Single Wideband LFM 대비 다수의 펄스(N개)를 사용하기에 처리 시간이 상대적으로 길지만, LFM 정합 처리를 이용한 펄스압축(Pulse compression) 및 Window 처리를 사용하기에 SFW 대비 정합 성능 측면에서 유리한 장점이 있다.

SCW에 대한 이론적 해석은 다양한 연구논문을 통해서 소개되었으나[5]-[9], 실 레이다에 탑재한 후 원거리 표적에 대한 SCW 파형 시험을 통해 성능 검증을 수행한 사례는 드물다. 따라서 본 논문은 개발된 SCW 알고리즘을 펄스 도플러 방식의 레이다 장비에 탑재하고, 비콘 시험을 통해 위상 및 크기 랜덤성을 갖는 하드웨어를 보정한다. 비콘 시험 보정 후, 상공에 점 표적(Point scatterer)으로 근사화할 수 있는 기준구(Reference spherical reflector)를 풍선에 매달아 수십 km 비행시켜 SCW 파형 처리 결과를 합성하고 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 SCW 파형 및 처리에 대한 수학적 이론을 기술한다. 3장은 매트랩을 이용해 SCW 파형 처리 결과를 시뮬레이션한다. 4장은 비콘 시험을 통해 SCW 처리를 보정하고, 기준구 시험을 통해 SCW 성능을 평가한다. 마지막으로 5장에서는 결론에 관해 기술하고 본 연구가 갖는 한계점 및 향후 연구에 관하여 기술한다.

II. Stepped chirp waveform 배경지식

2.1 Stepped chirp waveform 개념

그림 1에 SCW 파형의 송수신 개념을 소개한다. 펄스반복주기(PRI)에 따라 LFM 송신 펄스(Tx pulse)를 송신하면, 표적에 반사되어 Echo pulse가 수신된다. 이때 PRI마다 순차적으로 LFM의 시작 주파수를 Δf 만큼 상향하여 송신한다. N 번째 송신 펄스의 LFM 시작 주파수는 $f_0 + N\Delta f$ 가 된다. Echo pulse 신호는 각각 PRI마다 순차적으로 송신한 LFM 기준 신호와 펄스압축(Pulse compression) 처리한다. 펄스압축 후, 시간 축 방향으로 N개의 정합 처리 결과를 얻는다. 이를 그림 2에 보인다. 그림 2에서 동일한 시각에 대한 샘플 데이터 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 의 형태가

마치 주파수 도메인에서의 신호 형태로 보인다. 이 신호를 푸리에 역변환 처리하여, 시간 도메인으로 변환하면, 고해상도 처리 파형을 얻게 된다.

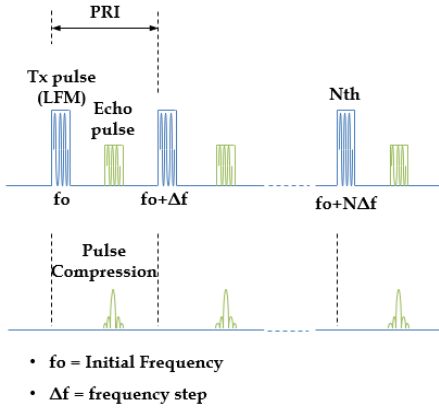


그림 1. SCW 송수신 개념

Fig. 1. Concept of SCW transmission and reception

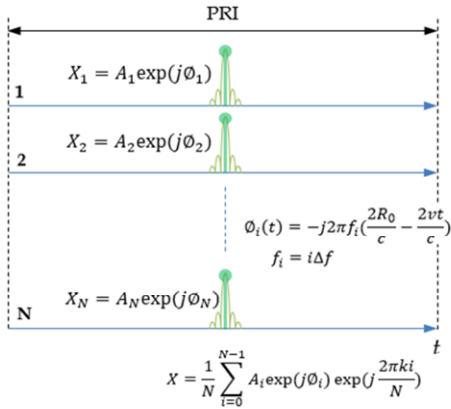


그림 2. SCW 수신신호 처리 개념

Fig. 2. Processing concept of a received SCW signal

2.2 Stepped chirp waveform 처리

본 절에서는 2.1절에서 개념적으로 기술한 SCW 처리를 수학적으로 정리한다. 시간에 따라 주파수가 증가하는 i 번째 LFM 파형 $x_i(t)$ 을 식 (1)과 같이 나타낸다. 이때 조건은 식 (2) ~ (4)와 같다. 여기서 C_i 는 신호 크기, f_i 는 i 번째 LFM 파형의 시작 주파수, T 는 펄스반복주기(PRI), τ_0 는 펄스폭, f_0 는 1번째 LFM 파형의 시작주파수, Δf 는 Step 주파수, μ 는 Sweep rate, B 는 LFM의 대역폭이다.

$$x_i(t) = C_i \exp(j2\pi(f_i t + \frac{\mu}{2} t^2)) \quad (1)$$

$$iT \leq t \leq (i+1)T \quad (2)$$

$$f_i = f_0 + i \Delta f, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$\mu = B/\tau_0 \quad (4)$$

표적에 의해 t_d 만큼 지연되어 수신한 신호는 식 (5)와 같고, t_d 는 식 (6)과 같다.

$$x_{r,i}(t) = C'_i \exp(j2\pi(f_i(t-t_d) + \frac{\mu}{2}(t-t_d)^2)) \quad (5)$$

$$t_d = \frac{R_0 - vt}{c/2} \quad (6)$$

식 (1)에 의해서 생성된 송신신호에 대한 기준신호를 식 (7)와 같이 정의하고, 수신된 신호 식 (5)을 식 (7)을 이용하여 정합처리(Matching processing)하고, 저역통과필터(Low pass filtering) 처리하면, 식 (8)과 같이 정리된다. 식 (2)와 식 (3)의 조건에 따라 N 개의 $x_{r,i}(t)$ 수신 신호를 형성한다.

$$y_i(t) = \exp(j2\pi(f_i t + \frac{\mu}{2} t^2)) \quad (7)$$

$$x_{p,i}(t) = \exp(-j2\pi f_i t_d) \exp(j2\pi(\frac{\mu}{2}(t-t_d)^2 - \frac{\mu}{2} t^2)) \quad (8)$$

Stationary 표적에 대해서 동일 지연 시각 t_d 에 대한 샘플 데이터 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 의 형태를 고려할 시에, 동일한 위상값을 갖는 부분을 제거하면 식 (8)을 식 (9)와 같이 정리할 수 있다. 식 (9)의 위상 부분은 식 (10)과 같이 정리되며, 이때 앞서 주파수 하향변환을 고려하면 식 (3)의 f_i 는 식 (11)로 정리된다.

$$x_{q,i}(t) = \exp(-j2\pi f_i t_d) \quad (9)$$

$$\Phi_i(t) = -j2\pi f_i t_d = -j2\pi f_i (\frac{2R_0}{c} - \frac{2vt}{c}) \quad (10)$$

$$f_i = i \Delta f, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (11)$$

결국 동일 시각 $\phi_i(t_d)$ 에 대한 샘플 데이터 $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 는 식 (12)로 정리되며, 그림 2를 참고한다. 식 (12)에서 X_i 는 푸리에 변환된 주파수 도메인에서의 신호 특징을 갖고 있다. A_i 는 그림 2에서 보듯이 각 펄스별 펄스압축에 대한 크기로 정의한다.

$$X_i = A_i \exp(j\phi_i), \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (12)$$

따라서 식 (13)에서 보이듯 푸리에 역변환을 통해 식 (12)를 시간 도메인으로 변환할 수 있다. 여기서 k 는 Range 축 (그림 2의 t 축) index를 의미한다. 식 (12)를 식 (13)에 대입하며 정리하면, 식 (14) ~ 식 (17)과 같이 전개된다. 이때 식 (14)에서 식 (15)로 전개되는 과정을 위상보정(Phase correction)이라 하며, 이는 이동 속도를 지닌 표적에 의해 각각의 펄스마다 위치가 바뀌고, 이로 인하여 위상이 바뀌는 현상을 보정하는 처리로, $\exp(-2vt/c)$ 로 곱함으로써 제거한다. SCW 처리는 표적의 속도를 추정하고 각 SCW 펄스마다 위상 변화를 보정처리해야 정상적인 SCW 처리 결과를 얻을 수 있다. 위상보정 후 식은 최종 (17)과 같이 정리할 수 있다. 식 (17)에 대한 크기 정보는 식 (19)와 같고, 이는 거리축에서의 고해상도 SCW 파형 처리 결과로 표적의 거리 프로파일(Range profile)로 정의한다.

$$H_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i \exp(j \frac{2\pi k i}{N}) \quad (13)$$

$$H_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_i \exp(j \frac{2\pi k i}{N} - j2\pi f_i (\frac{2R_0}{c} - \frac{2vt}{c})) \quad (14)$$

$$H_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_i \exp(j \frac{2\pi k i}{N} - j2\pi f_i \frac{2R_0}{c}) \quad (15)$$

$$H_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A_i \exp\left(j \frac{2\pi i}{N} \left(-\frac{2NR_0 \Delta f}{c} + k\right)\right) \quad (16)$$

$$H_k = \frac{\sin \zeta}{\sin \pi \frac{\zeta}{N}} \exp(j \frac{N-1}{2} \frac{2\pi \zeta}{N}) \quad (17)$$

$$\zeta = -\frac{2NR_0 \Delta f}{c} + k \quad (18)$$

$$|H_k| = \left| \frac{\sin \zeta}{\sin \pi \frac{\zeta}{N}} \right| \quad (19)$$

2.3 Stepped chirp waveform의 모호성

SCW 파형 처리에 있어서 거리 모호성은 $R_u = c/(2\Delta f)$ 에 의해 결정된다. 이는 앞서 푸리에 역변환 처리로 합성된 거리 프로파일은 거리 모호성 내 존재하는 모든 스캐터러들의 상대적 거리 반사를 모두 포함을 의미한다. 만약 측정 표적의 길이가 거리 모호성보다 크다면, 거리 모호성 윈도우 밖에 존재하는 모든 스캐터러들은 합성된 거리 프로파일에 fold-over 된 형태로 나타난다. 이는 푸리에 변환의 특성에 기인한다. 이를 수식으로 정리하면 식 (20) ~ 식 (24)와 같고, 이때 식 (20)은 식 (10)에서 속도와 관련된 부분을 제외한 수식이다[2].

$$\phi_i(t) = -j2\pi f_i \frac{2R_0}{c} \quad (20)$$

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta f} = \frac{4\pi(f_{i+1} - f_i)R_0}{(f_{i+1} - f_i)c} \quad (21)$$

$$R_0 = \frac{\Delta \phi}{\Delta f} \frac{c}{4\pi}, \quad \Delta \phi = \Delta \phi + 2N\pi \quad (22)$$

$$R_0 = \frac{\Delta \phi + 2N\pi}{\Delta f} \frac{c}{4\pi} = R_0 + N(\frac{c}{2\Delta f}) \quad (23)$$

$$R_u = \frac{c}{2\Delta f} \quad (24)$$

III. Stepped chirp waveform 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해 파라미터를 다음 표 1과 같이 설정한다. 전체대역폭은 Frequency step과 펄스 수의 곱으로 결정되며, 개별 펄스의 변조 방식을 LFM(대역폭 5MHz)으로 설정하였다.

앞서 식 (8)은 식 (5)와 식 (7)을 정합처리하여 얻으며, SCW에 대해 각각 협대역 LFM의 정합처리로 이해할 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 정합처리를 펄스도플러 레이다에서 일반적 구조인 하향변환 후

펄스압축 처리하는 방식을 이용한다. 이는 식 (5)을 하향변환 후 디지털 변환 처리한 후에 저장된 LFM 신호와 정합처리(펄스압축)하는 방식으로 결국 식 (8)의 형태를 얻게 된다.

표 1. SCW 시뮬레이션 파라미터

Table 1. SCW simulation parameters

Parameters	Conditions	Ref.
Waveform	SCW	
Modulation	LFM	
LFM bandwidth	5MHz	
Frequency step (a)	5MHz	
N. of processing pulse (b)	40	
Total bandwidth	200MHz	(a) × (b)
Range resolution	0.75m	
SCW ambiguity	30m	eq. (24)
Target type	Point Scatter	
Target speed	500m/s	
Swerling model	4	
FFT size	256	

그림 3은 표적으로부터 반사된 후 하향 변환 처리된 수신신호 펄스 1개를 보이고, 그림 4는 수신신호 펄스 40개 전부를 보인다. 그림 5는 그림 4에서 보인 신호를 펄스압축 처리한 결과를 보인다.

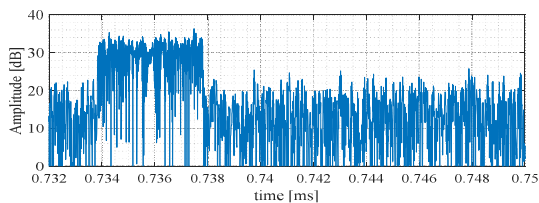


그림 3. SCW 수신신호 (싱글 펄스)

Fig. 3. Received SCW signals (Single pulse)

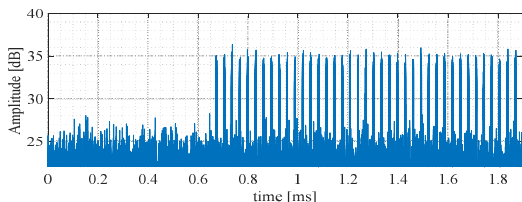


그림 4. SCW 수신신호 (N개 펄스)

Fig. 4. Received SCW signals (N pulses)

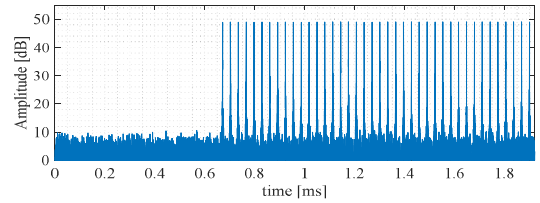


그림 5. 펄스압축 처리된 SCW 신호

Fig. 5. Pulse compression of SCW signals

그림 6은 그림 5에 보인 (1 by M_{total}) 데이터를 PRI 별로 분할하여 (N by MPRI)행렬 형태로 전환한 후, 위상보정 처리한 결과를 보인다. 그림 7은 그림 6의 결과를 이용하여 y축 방향인 N of pulse 축으로 푸리에 역변환을 처리한 결과이다. 이때 합성된 축 방향이 거리프로파일이며, 단위는 $\Delta R = c/(2N\Delta f)$ 와 관련한다. 표적이 위치하는 지점(강한 신호가 위치하는 지점)에서 y축으로 자른 결과를 그림 8에 보인다.

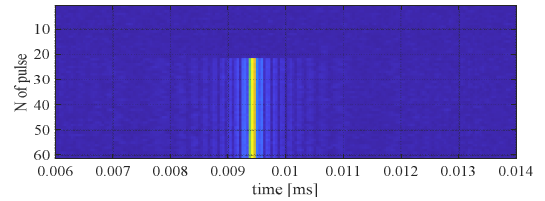


그림 6. Phase correction 처리 후 데이터

Fig. 6. Data after phase correction processing

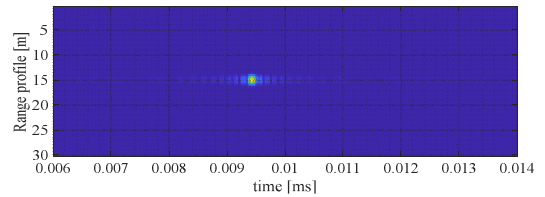


그림 7. 푸리에 역변환 처리 결과

Fig. 7. Result of Fourier inverse processing

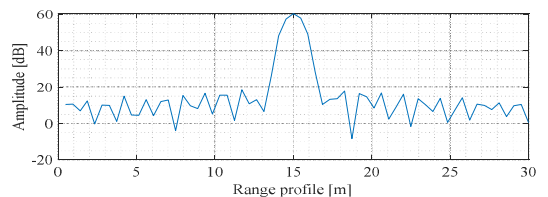


그림 8. 고해상도(거리) SCW 처리 결과 (표적 거리 프로파일)

Fig. 8. High range resolution SCW processing result (Target's range profile)

SCW 처리에 있어서 가장 중요한 성질은 점 표적에 대한 시뮬레이션 및 시험에서 명확하게 보이는데, 이는 주파수 간격에 따라 사용 주파수가 증가함에 따라 수신신호의 위상이 일관성 있게 (비례적으로) 증가하는 부분이다. 그러나 실제 구현하는 하드웨어 특성에 의해서 위상 및 크기 랜덤성이 추가될 수 있는데, 이러한 영향을 그림 9 및 그림 10에 보인다.

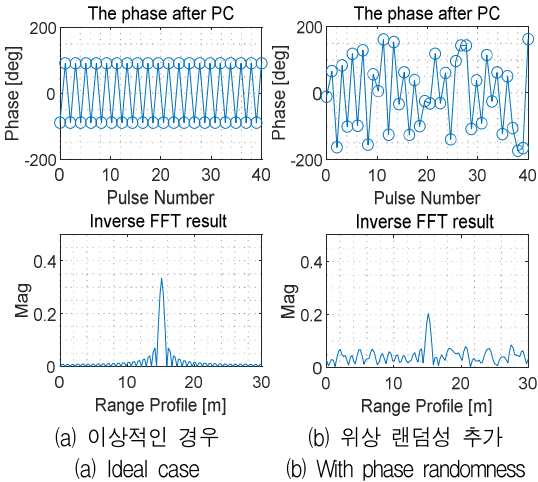


그림 9. 위상 랜덤성 추가에 따른 SCW 성능 저하
Fig. 9. SCW performance degradation due to addition of phase randomness

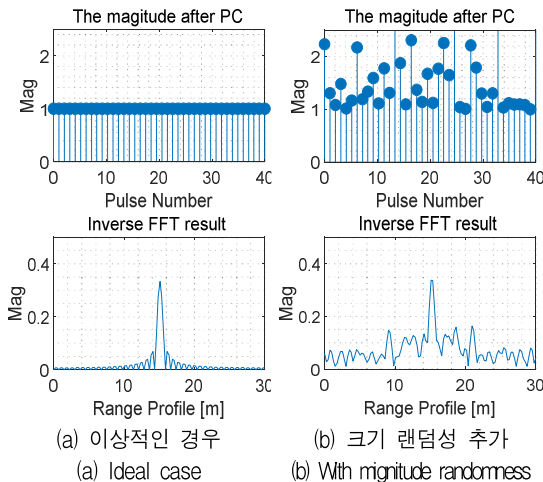


그림 10. 크기 랜덤성 추가에 따른 SCW 성능 저하
Fig. 10. SCW performance degradation due to addition of magnitude randomness

그림 9는 정규분포를 따르는 난수 $randn$ 함수를 사용하여, 식 (12)에 위상 랜덤성 $\exp(-j \times \beta \times randn)$ 을 추가한 시뮬레이션이다. 위상 랜덤성이 합성된 거리 프로파일에 크기 감소 및 왜곡을 초래한다. 그림 10은 식 (12)에 크기 랜덤성을 추가한 시뮬레이션이다. 전체적으로 잡음 레벨이 증가함을 확인할 수 있다.

IV. SCW 보정 및 성능평가

4.1 광대역 비콘을 이용한 SCW 보정

위상 및 크기에 랜덤성이 존재하여 성능이 열화되는 현상을 보완하기 위해서는 실제 사용하는 파형에 대한 위상과 크기를 보정하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 Trough-pass 기능이 탑재된 광대역 비콘 장치를 이용해, 사용하는 SCW 파형에 대한 위상과 크기의 틀어짐을 측정하고 보상하는 방안을 활용한다. 실제 시험을 통해서 사용한 장비의 위상의 틀어짐을 그림 11에 보인다. 그림 11은 SCW에서 사용하는 주파수 간격에 따라 증가되는 위상의 차이값을 보인다. 한편, 장비의 크기 틀어짐은 정도가 크지 않고, 주로 잡음 레벨 증가로 나타나기에 본 논문에 관련 그래프를 생략하였다.

그림 11에서 측정된 위상 랜덤성의 경우에는 레이다 내 구성품인 신호발생기에 의한 영향이 지배적이다. 이를 보상하기 위해 비콘 시험을 10회 반복하여 위상 변동의 평균값을 찾은 후 푸리에 역변환 처리 전에 이 평균값을 보상처리 하였다.

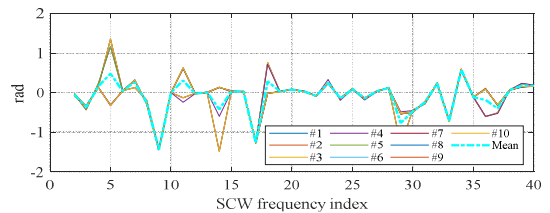


그림 11. 비콘 시험 - 실 레이다 장비의 위상 차이값 측정 결과

Fig. 11. Beacon test - SCW phase difference measurement of the used radar

보상값을 반영하지 않은 결과를 그림 12, 보상값을 반영한 결과를 그림 13에 보인다. 총 10회 처리 결과에 대한 평균값을 굵은 보라색으로 도시하였다.

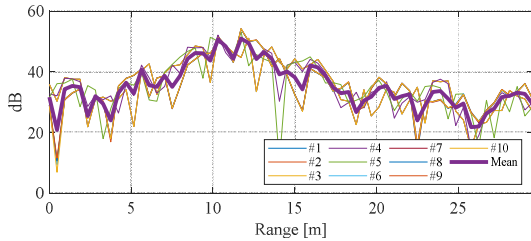


그림 11. 비콘 시험 - SCW 거리 프로파일 (보상값 반영하지 않은 고해상도 합성 결과)

Fig. 11. Beacon test - SCW Range profile (High-Range Resolution without compensation processing)

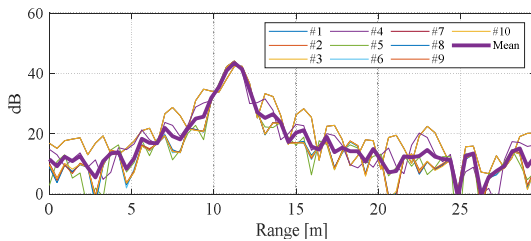


그림 12. 비콘 시험 - CW 거리 프로파일 (보상값을 반영한 고해상도 합성 결과)

Fig. 12. Beacon test - SCW Range profile (High-Range Resolution with compensation processing)

4.2 기준구를 통한 SCW 거리 프로파일 합성

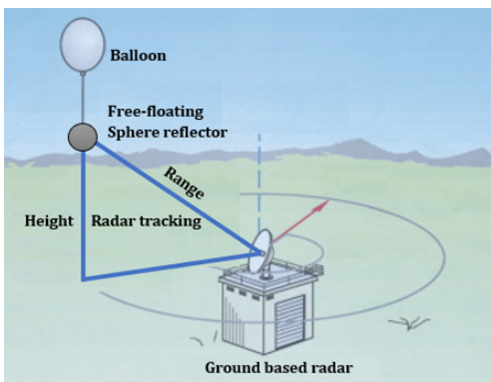


그림 13. 풍선에 기준구를 매달아 측정하는 SCW 시험
Fig. 13. SCW test using balloon-borne spherical reflector

고해상도 SCW 파형 기능 및 성능을 실 검증하기 위한 가장 효과적인 방법은 점 표적으로 근사화

할 수 있는 기준구를 상공에 날려 거리 프로파일 정보를 합성하는 것이다. 이를 위해 본 시험에서는 그림 13과 같이 풍선에 기준구를 매달아 측정하는 방식인 Ballon-borne 구형 리플렉터(Spherical reflector)를 이용하였다[10]. 레이더로 측정된 기준구 표적의 비행경로를 그림 14에 보인다.

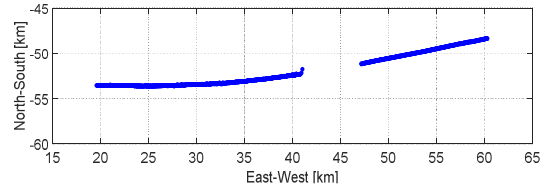


그림 14. 기준구 표적의 비행경로 (레이더 측정)

Fig. 14. Flight path of a balloon-borne spherical reflector

기준구에 대해 보상값을 반영하지 않은 결과를 그림 15에 보인다. 비콘 시험을 통해서 얻은 보상값을 반영하여 처리한 결과를 그림 16에 보인다.

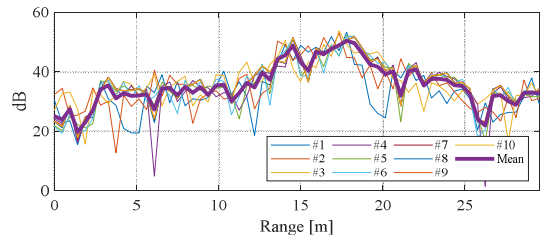


그림 15. 기준구 시험 - SCW 거리 프로파일 (보상값 반영하지 않은 고해상도 합성 결과)

Fig. 15. Reference target test - SCW Range profile (High-Range Resolution without compensation processing)

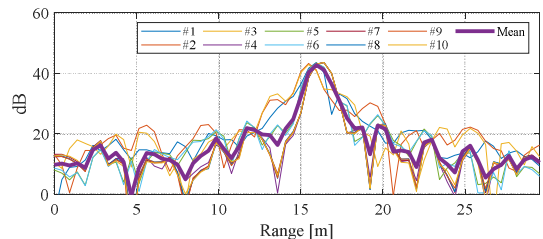


그림 16 비콘 시험 - CW 거리 프로파일 (보상값을 반영한 고해상도 합성 결과)

Fig. 16 Beacon test - SCW Range profile (High-Range Resolution with compensation processing)

Peak 지점을 기준으로 3dB 지점을 찾고, 두 지점 상의 물리적 거리를 계산하면 표적의 길이는 대략

1.5m 수준으로 측정된다. 표 1에 전체대역폭 B가 200MHz 임을 감안하면, 거리분해능 $\Delta R = c/2B$ 의 수식에 따라 이상적으로 0.75m가 계산된다. 이상적인 수준에 2배 정도 긴 측정 결과를 얻었다. 이에 대한 원인은 3가지로 추정된다. 첫째 하드웨어의 위상 및 크기 랜덤성을 완벽하게 보상하지 못한 점, 둘째 기준구가 완벽한 점 표적이 아니라는 점, 셋째 표적의 움직임 및 환경적 요인으로 인하여 위상보정이 정확하게 반영되지 않아 에러가 커진 것으로 판단된다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문은 레이다 표적 신호의 특징을 분석하기 위한 고해상도(High resolution) 파형 중, SCW 파형의 이론, 시뮬레이션, 보정, 및 시험을 기술하였다. 2장에서는 SCW 파형의 처리를 수학적으로 정리하였으며, 3장에서는 시뮬레이션을 통해 거리 프로파일 합성 결과를 보였다. 그리고 위상 및 진폭의 랜덤성이 추가될 때의 성능 열화 현상을 분석하였다. 4장에서는 실 레이다와 Through-pass 형태의 광대역 비콘을 통해 SCW의 위상 및 진폭 천이를 측정하고, 이를 보상처리 한 결과를 보였다. 실 표적을 대상으로 SCW 성능을 정량적으로 분석하기 위해 점 표적으로 근사화 가능한 기준구를 풍선에 매달아 원거리로 날린 후, SCW를 파형 송수신하고 고해상도 처리하여 얻은 결과를 제시하였다.

대부분의 보고된 SCW 논문은 이론적 시뮬레이션, 이상적 환경, 근거리 표적 대상을 고려하여 연구를 수행하였다[5]-[9]. 한편, 본 논문은 수십 km에 떨어진 기준구 표적에 대한 SCW의 시험 및 분석을 제시하였고, 또한 하드웨어 상에 발생하는 문제를 구체적으로 기술 및 보완하였기에, 본 논문에서 제시한 연구 결과는 충분히 의미가 있다고 평가할 수 있다.

향후 연구에 대해 개선해야 할 사항을 기술하면, 첫째로 구현된 신호발생기의 위상을 일정하게 유지할 수 있는 하드웨어 기능/성능을 보완해야 한다. 다시 말해서, 비콘을 이용하여 위상의 틀어짐을 측정하여 보상처리 하기에 앞서, 일차적으로 하드웨어적

개선이 선행되어야 한다. 둘째 주파수 간격, 펄스 수, 및 LFM 대역폭 등의 SCW 파라미터를 다양하게 변경하여, 여러 표적에 대한 고해상도 파형 효과성을 검증하는 시뮬레이션, 시험 및 분석이 수행되어야 할 것이다. 마지막으로 점 표적에 대한 결과를 바탕으로 멀티 스캐터러를 갖는 실제 표적에 대한 시험을 충분히 시행하여, 원거리 표적의 특징을 통계적으로 분석할 수 있는 연구를 수행해야 할 것이다.

References

- [1] W. L. Melvin and J. L. Scheer, "Principles of Modern Radar: Advanced techniques", Scitech publishing, pp. 19-85, 2013. <https://doi.org/10.1049/SBRA020E>.
- [2] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", 3rd Edition, CRC Press, pp. 237-271, 2013. <https://doi.org/10.1201/b14904>.
- [3] A. Andrei, et al. "FMCW transceiver wideband sweep nonlinearity software correction", 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13), Ottawa, ON, Canada, Apr. 2013. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2013.6586032>.
- [4] K T. Kim, "Focusing of high range resolution profiles of moving targets using stepped frequency waveforms", IET radar, sonar & navigation, Vol. 4, No. 4, pp. 564-575, Nov. 2010. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2007.0178>.
- [5] M. Kronauge and H. Rohling, "New chirp sequence radar waveform", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 2870-2877, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120813>.
- [6] A. J. Wikinson, R. T. Lord, and M. R. Inggs, "Stepped-Frequency Processing by Reconstitution of Target Reflectivity Spectrum", Proc. of the 1998 South African Symposium on Communications and Signal Processing, Rondebosch, South Africa, pp. 101-104, Sep. 1998. <https://doi.org/10.1109/COMSIG.1998.736930>.
- [7] R. T. Lord and M. R. Inggs, "High Resolution

- SAR Processing Using Stepped-Frequencies", Proc. of the 1997 IEEE international Geoscience and Remote Sensing Conference, Singapore, pp 490-492, Aug. 1997. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.615924>.
- [8] S. Daniel and J. Schoebel, "Stepped -frequency radar signal processing", Journal of applied geophysics, Vol. 112, pp 42-51, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.11.003>.
- [9] Y. Haojuan, G. Meiguo, and L. Guoman, "Coherent Spectrum Synthesis of Frequency-Stepped Chirp Signal", Proc. of the 2009 IET international Radar Conference, Guilin, China, pp. 1-4, Apr. 2009. <https://doi.org/10.1049/cp.2009.0271>.
- [10] J. Kwon, et al, "Experimental test of long range radar RCS calibration and measurement", Proc. of the 2024 kimst conference, Jeju, Korea, pp. 649-650, Jun. 2024.

저자소개

권 지 훈 (Jihoon Kwon)



2004년 8월 : 충남대학교
전기전자전파(공학사)
2007년 2월 : 광주과학기술원
정보기전공학부(공학석사)
2020년 2월 : 서울대학교
지능형융합시스템(공학박사)
2007년 1월 ~ 2022년 5월 :

삼성탈레스 레이더연구소 (現 한화시스템)

2022년 6월 ~ 현재 : 국방과학연구소 제2기술연구원
관심분야 : 레이더, 신호처리, 인공지능, 초고주파응용