

레이다 드웰 시간 감소를 위한 수정된 Stepped Chirp Waveform 설계

권 지 훈*

Modified Stepped Chirp Waveform Design for Reducing Radar Dwell Time

Jihoon Kwon*

요 약

SCW(Stepped Chirp Waveform) 고해상도 파형은 하드웨어 구현의 어려움을 완화하기 위해 N개의 협대역 LFM 신호를 순차적으로 송수신하여 광대역 파형을 합성한다. 그러나 원거리 표적 처리를 위해 긴 PRI를 사용할 경우 드웰 시간이 증가하여 SCW 처리를 위한 레이더 자원 점유율이 높아지는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 M개의 서브 펄스를 개별 PRI 내 펄스 트레인으로 묶어 송수신하는 수정된 SCW 처리 기법을 제안한다. 비록 송신 구간의 블랭킹 시간이 증가하여 근접 영역 탐지가 제한되지만, 원거리 표적 처리 시 드웰 시간을 기존 대비 1/M로 단축하는 장점이 있다.

Abstract

The Stepped Chirp Waveform (SCW) high-resolution waveform synthesizes a wideband signal by sequentially transmitting and receiving N narrowband LFM signals to alleviate hardware implementation challenges. However, when using a long Pulse Repetition Interval (PRI) for long-range target processing, radar resource occupancy increases due to the extended dwell time required for SCW processing. To address this issue, this paper proposes the modified SCW processing method that bundles M sub-pulses into a pulse train within each individual PRI for transmission and reception. Although this approach increases the blanking time of the transmit section, limiting detection in close-range areas, it offers the advantage of reducing the dwell time to 1/M for long-range target processing.

Keywords

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

1. 서 론

레이더 표적을 분류(Discrimination)하기 위한 목적으로 거리 해상도를 개선하는 HRR(High Range Resolution) 파형에 관한 연구들이 보고되었다[1]-[5].

HRR 파형 중 가장 손쉽게 고려할 수 있는 방식은 광대역 LFM 파형의 사용이다. 그러나 이 방식은 높은 샘플링 레이트를 요구하기 때문에 하드웨어 구현에 어려움이 있다. 따라서 하드웨어의 부담을 줄이기 위한 대표적 HRR 파형으로 SCW(Stepped

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

• Received: May 15, 2025, Revised: Jul. 20, 2025, Accepted: Jul. 23, 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

Chirp Waveform) 등이 연구되었다[1]-[4].

SCW는 N 개의 협대역 신호를 사용해 광대역 파형을 합성하므로, RF 및 신호처리 과정에서 발생하는 하드웨어 구현 및 성능의 문제를 해결해줄 수 있다[1]. SCW는 각각 Δf 의 주파수 간격(Frequency step size)을 갖는 N 개의 LFM으로 변조된 협대역 펄스(Narrowband pulse)를 사용해, 이론적 전체대역폭 $B = N \times \Delta f$ 을 구현한다[2]. 분할된 펄스를 사용하기 때문에 수신기의 복잡도를 크게 낮출 수 있는 장점이 있지만, 광대역 처리를 위해 다수의 펄스가 필요하므로 드웰 시간이 늘어나는 단점을 갖는다[1].

SCW 처리에 요구되는 긴 드웰 시간은 동시다발적으로 다양한 임무를 수행하는 다기능레이더의 자원을 높게 점유하는 문제를 일으킨다. 특히 원거리 표적을 처리하기 위해 더욱 긴 펄스반복주기(PRI, Pulse Repetition Interval)를 사용하는 경우, 단일 표적에 대한 SCW 1회 처리를 위한 드웰(Dwell) 시간은 최소 $N \times PRI$ 의 시간이 요구되며, S 개 표적 처리를 위해서는 최소 $S \times N \times PRI$ 가 요구된다. 탐색/추적이 주 임무로 할당된 다기능레이더는 보조적 임무인 SCW 기능에 자원을 높게 할당하기 어려우므로, 드웰 시간을 줄이기 위한 기술적 방안이 요구된다.

따라서 본 논문은 현실적인 다기능레이더의 운용을 고려하여 시분할 기법을 활용한 수정된 SCW를 제안한다.

2장에서는 기존 방식으로 SCW를 처리한 결과를 보이고, 3장에서는 제안한 방식으로 SCW를 처리한 결과를 보인다. 마지막 4장은 결론을 기술하였다.

II. 기존 방식을 이용한 SCW 처리

기존 방식을 이용한 SCW 처리 개념을 그림 1에 보인다. PRI에 따라 송신 펄스(Tx pulse)를 송신하고, 표적으로부터 반사된 신호(Rx pulse)를 수신한다. PRI마다 순차적으로 시작 주파수를 Δf 만큼 상향하여 송수신한다. 수신신호는 기준신호와 펄스 압축(Pulse compression) 처리한다. 펄스 압축 후, 시간 축 방향으로 N 개의 정합 처리 결과를 얻는다. 거리모호성($R_u = cPRI/2$)을 고려하여 긴 PRI를 사용하면, 드웰 시간($N \times PRI$)이 길어진다. 따라서 자

원점유율에 따른 드웰 시간에 제한을 설정하면, PRI 또는 펄스 개수 N 에 제약이 따른다. PRI의 제한은 측정거리(Instrument range)를 줄이고, N 의 제한은 전체대역폭 B 를 줄여 거리 해상도를 떨어뜨린다. 시뮬레이션을 위한 SCW 주요 파라미터를 표 1에 기술한다. 파라미터에 따라 생성한 SCW 수신신호(150개 중 3개 펄스)를 그림 2에 보이고, 150 펄스를 PRI별로 나눠, 펄스압축 처리한 결과를 그림 3에 보인다.

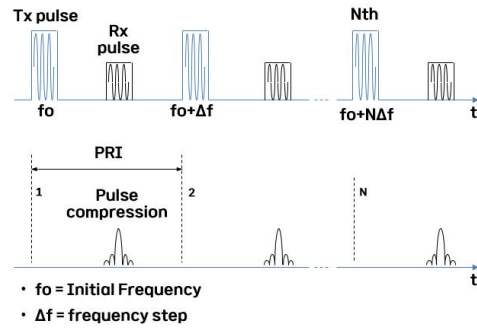


그림 1. SCW 파형 송수신 개념[4]
Fig. 1. Concept of SCW transmit/receiving[4]

표 1. SCW 시뮬레이션 파라미터
Table 1. SCW Simulation parameters

Parameters	Conditions	Ref.
Waveform type	SCW	
Modulation	LFM	
Frequency step (a)	2MHz	
Total pulse number (b)	150	
Total bandwidth	300MHz	(a) × (b)
Range resolution	0.5m	$\Delta R = c / (2B)$
Ambiguity	75m	$R_u = c / (2 \Delta f)$
PRI / Dwell time	0.6ms / 90ms	
Target type	Point Scatter	
Target speed	500m/s	

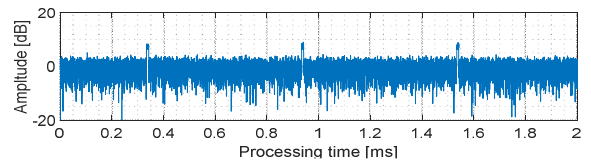


그림 2. SCW 수신신호(기존 방식)
Fig. 2. SCW receiving signals(Conventional method)

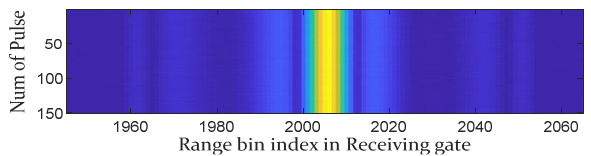


그림 3. SCW 펄스압축처리 150개 펄스 (기존방식)
Fig. 3. SCW pulse compression 150 pulses (Conventional)

그림 4는 그림 3에서 생성한 결과를 이용하여 펄스 번호 축 방향으로 푸리에 역변환 처리한 결과이다. 강한 신호가 있는, 다시 말해서 표적이 위치하는 지점을 기준으로 세로축으로 자른 결과를 그림 5에 보이며, 이를 거리 프로파일(Range profile)로 정의한다[4].

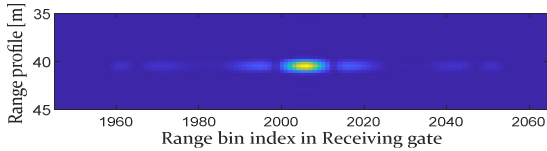


그림 4. SCW 푸리에 역변환 처리 (기존방식)

Fig. 4. SCW Fourier inverse transform (Conventional)

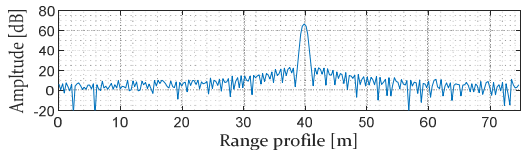


그림 5. 표적 지점에서의 합성된 거리 프로파일

Fig. 5. Range profile synthesized at the target position

II. 제안하는 방식을 이용한 SCW 처리

제안하는 방식의 SCW 처리 개념을 그림 6에 보인다. 각각의 펄스를 차례대로 송수신하는 기존 방식과 달리, M 개의 서브 펄스를 하나의 송신 펄스 트레인(Tx pulse train)으로 묶어서 송수신토록 구성하였다. 하나의 펄스 트레인에 포함할 수 있는 펄스 수 M 은 블랭킹 시간(Blanking time)과 관련한다. 예를 들어 근거리 15km 영역 내를 블랭킹 처리하는 경우, 약 100us로 산출되며, 이를 고려하여 M 을 5로 설정한다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1를 참조하며, 제안방식의 경우 드웰시간이 18ms로 감소한다.

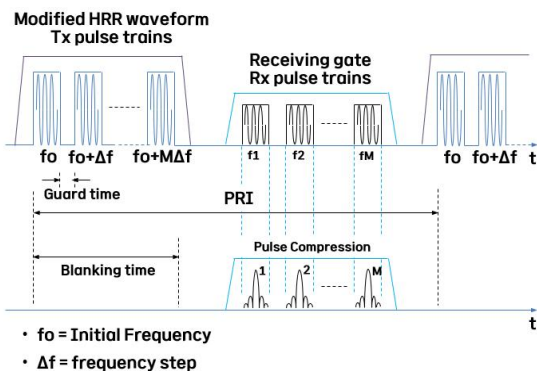


그림 6. 제안한 SCW 파형 송수신 개념

Fig. 6. Proposed SCW waveform TRX concept

송신 구간의 증가로 인해 근거리 탐지에 제약이 발생하나, 기존 방식 대비 드웰 시간을 1/5로 줄일 수 있는 장점이 있다. 가드 시간(Guard time)은 송신 펄스 간 간섭과 수신처리 게이트를 고려해 8us로 설정하였다. 제안하는 방식을 이용해 5개씩 서브 펄스를 묶어 전송한 수신신호 중 일부를 그림 7에 보이고, 전체 150개 펄스에 대한 수신신호를 그림 8에 보인다.

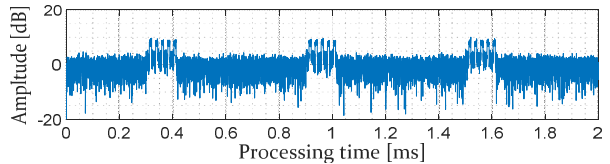


그림 7. SCW 수신신호 (제안한 방식)

Fig. 7. SCW Receiving signals (Proposed method)

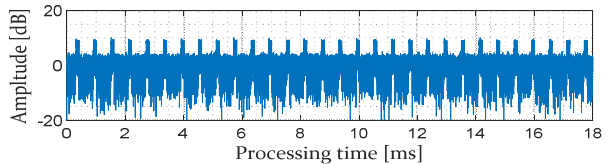


그림 8. 전체 수신신호 150개 펄스 (제안한 방식)

Fig. 8. Total receiving signals 150 pulses (Proposed method)

PRI 별로 5개의 서브 펄스가 송수신되기 때문에, 150개의 펄스를 송수신하기 위해서는 30번의 PRI가 요구된다. 개별 펄스를 송수신하는 방식 대비 1/5로 전체 시간(드웰 시간)이 감소하는 장점이 있지만, 개별 PRI 수신 게이트(Receiving gate) 내에 5개씩 서브 펄스가 수신되기 때문에, 이를 나누기 위한 리셰이핑(Reshaping) 과정이 추가로 필요하다. 그림 9는 30개의 PRI별로 리셰이핑한 결과를 보여주며, 이때 등속으로 움직이는 표적을 가정하여 위상 보정은 5개 서브 펄스 중 첫 번째 펄스를 기준으로 정렬하였다. 그림 10은 각 수신 게이트 내 서브 펄스를 다시 5개로 분할처리한 결과를 보인다. 이때 양쪽 끝으로 제로 패딩(Zero padding)을 추가하였다. 그림 11은 그림 10에서 생성한 리셰이핑된 데이터를 펄스압축 처리한 결과로 이상적 리셰이핑 처리 시에 그림 3의 결과와 같다.

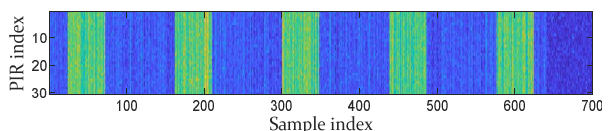


그림 9. PRI 간격별로 수신신호 리셰이핑

Fig. 9. Reshaping the received signal by PRI interval

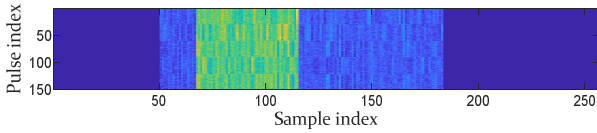


그림 10. 서브펄스를 나눠 전체 리세이핑 데이터 생성
Fig. 10. Divide pulses to generate the total data

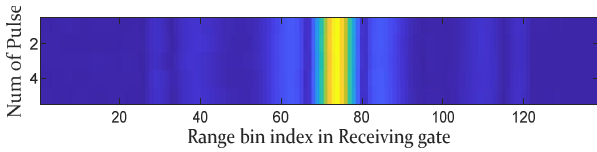


그림 11. 리세이핑된 데이터의 펄스압축 처리 결과
Fig. 11. Pulse compression result of the reshaped data

그림 12는 기존 SCW 처리 방식과 같게, 그림 11의 데이터를 세로축으로 푸리에 역변환한 결과이며, 표적이 위치한 지점에 대한 거리 프로파일을 그림 13에 보인다. 기존 방식과 제안하는 방식의 처리 결과는 유사한 HRR 합성 결과(거리 프로파일)를 보여준다. 이는 거리 프로파일이 펄스 축으로 푸리에 역변환하여 합성하기 때문이다. 단, 데이터 리세이핑 과정 중에 표적 속도에 따른 데이터 정렬(위상 보정)에 오차가 존재하는 경우, 합성 신호에 블러링(Blurring)이 발생할 수 있다.

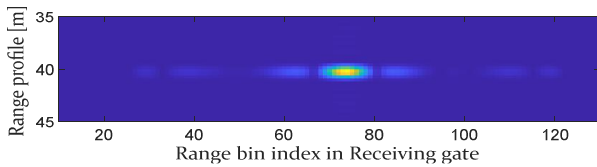


그림 12. 그림 11에서 보인 데이터의 푸리에 역변환 처리
Fig. 12. Fourier inverse transform of the reshaped data

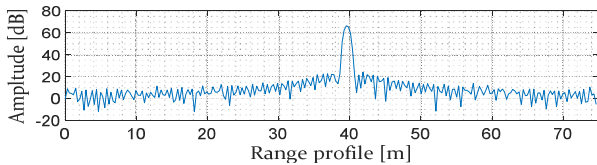


그림 13. 제안한 방식을 이용해 합성한 거리 프로파일
Fig. 13. Range profile synthesized using the proposed method

IV. 결 론

본 논문에서는 레이더 원거리 표적 탐지를 위해 긴 PRI를 사용할 시 발생하는 SCW 드웰시간 문제를 개선하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 각 PRI마다 M 개의 펄스 트레인 묶어서 송수신하여 처리하는 방식으로, 기존 방식 대비 드웰 시간을

$1/M$ 로 줄이는 장점이 있으며, 거리 프로파일 합성 성능은 기존 방식과 유사함을 분석하였다. 한편, 송신 펄스 트레인으로 인해 블랭킹 시간이 증가하여 근접 영역 탐지 거리에 제한이 발생하는 단점이 있으나, 근접 영역 탐지 거리 제한은 다기능레이더의 근거리용 SCW를 사용함으로써 손쉽게 해결할 수 있다.

제안한 방식은 지상용 다기능레이더의 원거리 표적의 고해상도 거리 프로파일을 얻는 과정에서 이미 개발된 SCW의 레이더 자원점유율을 낮추기 위한 대안으로 고안되었다. 자원점유율은 과형의 드웰 시간 감소를 통해 달성될 수 있으며, 이를 위해 SCW 펄스 트레인을 묶어서 송수신하는 방안을 적용하였다. 향후 현재 개발된 지상용 다기능레이더에 기술을 탑재하여, 수십 km 비행하는 원거리 기준 표적(기준구 및 표적)을 대상으로 검증 시험을 시행할 예정이다.

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 ed., CRC Press, pp. 237-271, 2013. <https://doi.org/10.1201/b14904>.
- [3] J. Kwon, "Implementation and evaluation of high-resolution radar waveform processing using stepped chirp waveform", JKIIIT, Vol. 23, No. 5, pp. 159-167, May 2025. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2025.23.5.159>.
- [4] M. Kronauge and H. Rohling, "New chirp sequence radar waveform", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., pp. 2870-2877, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120813>.
- [5] 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>.