

원격지에서 모노펄스 레이더의 주파수 위상 교정을 위한 독립된 펄스반복주파수 생성 및 제어

양재원^{*,1)} · 유승오¹⁾ · 윤재혁¹⁾ · 이동주¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

Independent PRF Generation and Control for Frequency Phase Calibration on Mono-pulse Radar at a Remote Location

Jaewon Yang^{*,1)} · Seungoh Yoo¹⁾ · Jaehyuk Yoon¹⁾ · Dongju Lee¹⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 24 February 2021 / Revised 29 April 2021 / Accepted 18 June 2021)

Abstract

This paper presents a method of independent pulse repetition frequency (PRF) generation and control for frequency phase calibration on mono-pulse radar at a remote location. In order to generate an independent PRF signal of 320[Hz], pulse width modulation (PWM) of 16-bit timer/counter was applied. For a precision control of PRF signal, 16-bit timer/counter interrupt was changed for each period. Therefore, average frequency of PRF could be controlled by 0.0001[Hz]. To calibrate a frequency phase of mono-pulse radar at a remote location, the proposed PRF generator with a precision control of frequency was used regardless of receiving PRF signal from a radar. For the verification of the proposed PRF generator, theoretical analysis and experimental results are included.

Key Words : Pulse Repetition Frequency(펄스반복주파수), Frequency Phase Calibration(주파수 위상 교정), Mono-Pulse Radar(모노펄스레이더), Pulse Width Modulation(펄스폭변조)

1. 서론

모노펄스 레이더는 자유공간에서 비행체를 실시간으로 추적하고, 비행체의 시공간 위치정보를 획득하기 위하여 사용된다. 모노펄스 레이더는 펄스반복주파수 간격으로 고풍력의 단일 펄스 신호를 비행체를 향하

여 송신하고, 비행체에 반사되어 돌아오는 단일 펄스 신호를 수신하여 전자파의 왕복시간을 획득 및 추적 거리를 계산한다. 그리고 비행체에 반사되어 돌아오는 단일 펄스 신호는 파라볼릭 안테나의 4개 피드 혼 (Feed Horns)에 동시에 수신되고, 방위각/고각 차 채널 (Difference Channels)을 이용하여 방위각/고각 변화량 (Delta Azimuth/Elevation)을 획득한다. 획득된 방위각/고각 변화량은 합 채널 (Sum Channel)과 비교되어 비행체의 추적 각도로 계산되며, 일반적인 레이더보다

* Corresponding author, E-mail: fship01@nate.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

상대적으로 정밀한 방위각/고각 정보를 획득할 수 있다^[1-3]. 전자파는 빛의 속도(3×10^8 m/s)로 이동하고, 왕복시간을 편도시간으로 계산하면 레이더를 기준으로 비행체까지의 거리 정보를 알아낼 수 있다. 레이더 기준의 비행체 추적 각도 정보인 방위각과 고각은 레이더 페데스탈 내부의 서보모터 엔코더 값과 수신기 채널의 수신주파수 위상차에 대한 각도 보상 값의 합으로 이루어진다. 그리고 계측레이더는 수신기 채널에 수신된 수신주파수의 방위각/고각 위상차를 줄여가는 방향으로 서보 모터를 움직여서 실시간으로 비행체를 추적한다.

모노펄스 레이더의 각도 추적 정확도를 향상시키기 위해서는 수신주파수에 대한 주파수 위상 교정을 수행하여야 한다^[4]. 단일주파수를 사용하는 모노펄스 레이더는 송신 주파수가 변경되면 수신기 채널에 수신되는 신호의 파장 길이가 달라지기 때문에 방위각/고각 위상차에 대한 보상 계수를 변경하여야 한다. 이를 수행하지 않을 경우, 레이더는 페데스탈 서보 정밀 제어가 불가능해지고 비행체 추적을 실패하게 된다. 일반적인 모노펄스 레이더의 수신주파수 위상 교정 방법은 근 거리에 위치한 교정신호발생장치에서 송신하는 RF 신호를 모노펄스 레이더가 수신하고, 파라볼릭 안테나 빔의 주엽(Main Lobe)과 부엽(Side Lobe) 사이의 신호감쇄지점(Null Point)을 찾아내어 해당 주파수에서의 주엽 중심점(Center Point)을 찾아 보상한다. 이를 위해서는 모노펄스 레이더에서 생성되는 펄스반복주파수를 교정신호발생장치로 입력시켜 해당 거리에서 추적대상이 움직이지 않는 고정 표적으로 인식되어야 한다.

모노펄스 레이더에서 생성된 펄스반복주파수와 교정신호발생장치의 펄스반복주파수를 일치시키는 방법은 유선 신호(Fig. 1)와 무선 신호를 이용하는 방법, 그리고 독립된 펄스반복주파수 생성기를 이용하는 방법(Fig. 2)이 있다. 동축케이블 또는 광케이블 포설 등의 인프라 시설이 구축되지 않은 타 지역에서 유선 방식은 사용이 불가능하여 적외선 아날로그 신호를 송/수신하는 무선 방식을 사용하여야 한다. 하지만 무선 기반의 적외선 아날로그 신호 송/수신 장치는 적외선 송신과 수신안테나가 필요하고, 변조/복조 신호처리장치가 별도로 필요하여 가격이 비싸다. 따라서 본 논문에서는 독립된 펄스반복주파수 생성기를 이용하여 모노펄스 레이더의 펄스반복주파수와 유사한 신호를 생성하고 Try and Error를 이용하여 펄스반복주파수를 제어하는 방법에 대하여 서술한다.

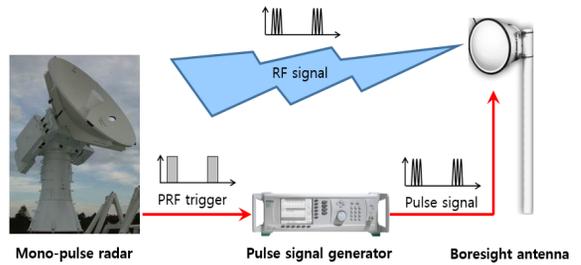


Fig. 1. Radar calibration using a radar PRF trigger

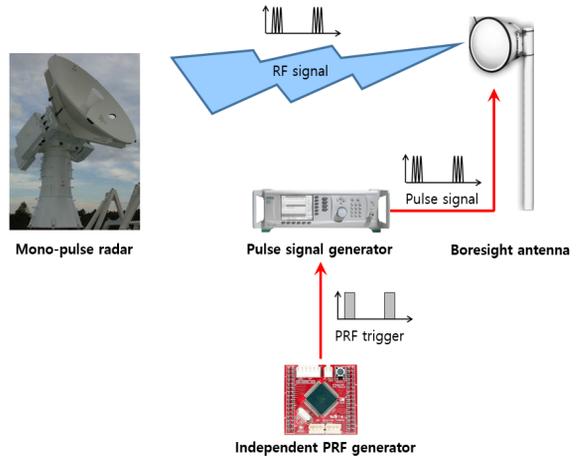


Fig. 2. Radar calibration using a PRF generator

2. 독립된 펄스반복주파수 생성기

모노펄스 레이더에서 사용하는 320[Hz]의 펄스반복주파수를 생성하기 위하여 16[MHz] 동작 클럭을 가지는 8비트 마이크로프로세서 ATMEGA128을 사용하였다. 그리고 16비트 타이머/카운터 기능을 이용하여 펄스폭변조(PWM, Pulse Width Modulation) 신호를 생성하였다. 펄스반복주파수를 정밀 제어하기 위하여 16비트 타이머/카운터의 인터럽트 주기를 변화시켜 평균 펄스반복주파수를 0.0001[Hz] 단위로 제어하였다.

2.1 타이머/카운터 변수 설정

독립된 펄스반복주파수 생성기에 사용된 제어기의 동작 클럭(Operating Clock)은 16[MHz]이고, 생성하고자 하는 펄스반복주파수(PRF)는 320[Hz]이므로 타이머/카운터의 증가 카운트(UpCount) 값은 50,000으로 계산된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$UpCount = \frac{Operating\ Clock}{PRF} = \frac{16[MHz]}{320[Hz]} = 50,000 \quad (1)$$

제어기의 동작 클럭과 모노펄스 레이더의 펄스반복 주파수는 고정된 값이지만, 각 시스템에 사용된 발진기(Oscillator)가 가지는 오차를 보상하기 위하여 펄스 반복주파수의 정밀 제어가 필요하다. 증가 카운트 값을 1씩 조절할 경우, 펄스반복주파수는 $\pm 0.0064[Hz]$ 간격으로 제어가 가능하며, 이를 식 (2)로 표현하였다.

$$PRF_{step} = \frac{16[MHz]}{50,000} - \frac{16[MHz]}{50,001} \cong 0.0064[Hz] \quad (2)$$

2.2 타이머/카운터 설계

모노펄스 레이더의 펄스반복주파수와 일치시키기 위해서는 독립된 펄스반복주파수 생성기를 $0.0001[Hz]$ 간격으로 정밀 제어하는 것이 필요하다고 가정하였다. 이를 해결하기 위하여 타이머/카운터 기능을 이용한 평균 증가 카운트 개념을 적용하였다.

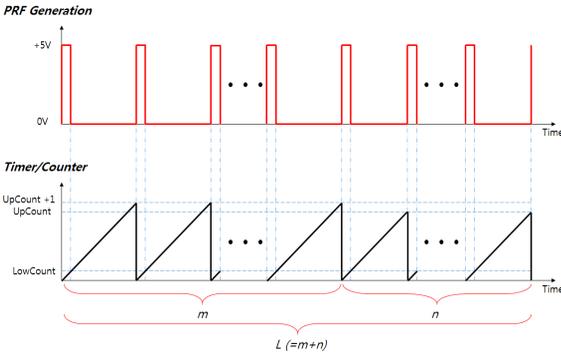


Fig. 3. PRF generation according to timer/counter

Fig. 3는 타이머/카운터의 초기화(Reset) 시점을 변경하여 펄스반복주기(Pulse Repetition Period)를 특정 구간에서 변화시키는 방법을 도시화한 것이다. 식 (2)에 따라 증가 카운트를 1씩 조절할 경우, $\pm 0.0064[Hz]$ 간격으로 제어가 가능하고, 필요로 하는 정밀 제어 간격은 $\pm 0.0001[Hz]$ 이므로 64배의 정밀 제어가 필요하다. 따라서 $L=(m+n)$ 값은 64로 계산된다.

타이머/카운터 값이 0일 때 PWM 출력은 +5 V가 되고, 설정된 LowCount 값과 일치하면 PWM 출력은 0 V가 된다. 그리고 m 횟수 동안 타이머/카운터 값이 UpCount+1과 같아지면 초기화됨과 동시에 PWM 출력

이 +5 V로 바뀌게 된다. 따라서 UpCount 값이 50,000 이라면, m 횟수 동안의 펄스반복주파수는 $319.9936[Hz]$ 으로 계산되며 식 (3)과 같다.

$$PRF = \frac{Operating\ Clock}{UpCount + 1} = \frac{16[MHz]}{50,001} = 319.9936[Hz] \quad (3)$$

그리고 n 횟수 동안 타이머/카운터 값이 UpCount와 같아지면 타이머/카운터 값이 0으로 초기화되고 PWM 출력은 +5 V가 된다. 이 구간 동안의 펄스반복주파수는 식 (4)와 같이 $320[Hz]$ 으로 계산된다.

$$PRF = \frac{Operating\ Clock}{UpCount} = \frac{16[MHz]}{50,000} = 320[Hz] \quad (4)$$

상수 m과 n의 값이 각각 $m=1, n=63$ 이라고 가정할 경우, 평균 펄스반복주파수는 $319.9999[Hz]$ 으로 계산된다. 또한 $m=2, n=62$ 라고 가정할 경우, 평균 펄스반복주파수는 $319.9998[Hz]$ 으로 계산된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$UpCount_{(avg)} = UpCount + \frac{m}{m+n} \quad (5)$$

$$PRF_{(avg)} = \frac{Operating\ Clock}{UpCount_{(avg)}} [Hz] \quad (6)$$

모노펄스 레이더의 펄스반복주파수가 $320.0017[Hz]$ 이라고 가정할 경우, UpCount 값은 49,999으로 설정하고 $m=47, n=17$ 으로 계산된다. 따라서 독립된 펄스반복주파수 생성기는 처음 47회 동안 $320[Hz]$ 를 내보내고, 나머지 17회 동안 $320.0064[Hz]$ 를 생성하게 된다. 그리고 평균 펄스반복주파수는 0.2초 주기로 반복하여 모노펄스 레이더는 교정신호발생장치에서 출력되는 RF 신호를 정지된 표적으로 인식하게 된다.

2.3 펄스반복주파수 변화에 따른 표적 추적 상태

Fig. 4은 모노펄스 레이더 내부에서 생성되는 펄스반복주파수 $PRF_{(radar)}$ 와 외부의 독립된 펄스반복주파수 생성기에서 생성된 펄스반복주파수 $PRF_{(external)}$ 가 일치할 때와 일치하지 않을 때의 표적 추적 상태를 도시화한 것이다. 레이더 펄스반복주파수 $PRF_{(radar)}$ 가 외부 펄스반복주파수 $PRF_{(external)}$ 보다 낮다면, 추적 대상인

교정 신호가 레이더 방향으로 진입하면서 추적 거리가 가까워지게 된다. 반면에 레이더 펄스반복주파수 $PRF_{(radar)}$ 가 외부 펄스반복주파수 $PRF_{(external)}$ 보다 크다면, 추적 대상인 교정 신호가 레이더 반대방향으로 거리가 멀어지게 계측된다. 따라서 레이더 위상 교정을 수행하기 위해서는 Fig. 4의 중간처럼 레이더 펄스반복주파수 $PRF_{(radar)}$ 와 외부 펄스반복주파수 $PRF_{(external)}$ 를 일치시켜 추적 대상인 교정 신호의 거리가 항상 일정하도록, 추적 대상이 정지해있도록 하여야 한다. 그렇지 않다면, 장비 운용자가 빠르게 이동하는 교정 신호를 추적 실패하게 되고, 이로 인하여 수신주파수 위상 교정이 불가능하다.

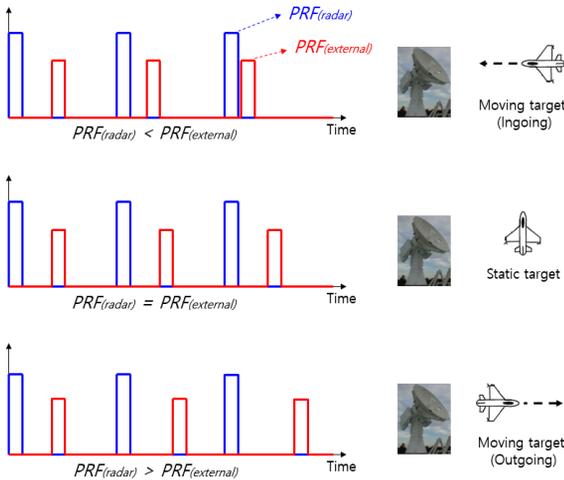


Fig. 4. Status of target according to PRF generation

2.4 펄스반복주파수 생성 및 제어 방법

Fig. 5는 제어기를 이용한 독립된 펄스반복주파수 생성 및 제어 방법을 표현한 것이다. 변수 UpCount, $L(=m+n)$, m의 초기 값을 설정하고, 이를 펄스신호발생기의 트리거로 입력한다. 주파수 위상 교정을 수행하고자 하는 레이더 방향으로 RF신호를 송신한다. 레이더는 이 교정 신호를 추적하고, 레이더 A-Scope 화면에서 교정 신호의 거리가 멀어지면 UpCount 값을 감소시키고, 거리가 가까워지면 UpCount 값을 증가시킨다. UpCount 값이 바뀐 후에 표적의 거리 변화가 없이 일정하다면 펄스반복주파수 제어가 완료된 것이다. 표적 거리 변화가 있으면서 이동방향이 바뀌지 않았다면, UpCount 값을 변경하는 절차를 수행한다. 표적 거리 변화가 있으면서 이동방향이 바뀌었다면, 거

리가 멀어지면 UpCount 값을 감소시키고, 거리가 가까워진다면 m 값을 증가시킨다. 표적의 거리 변화가 없으면 레이더 펄스반복주파수 제어가 완료된 것이고, 그렇지 않다면 m 값을 증가시키는 알고리즘을 재수행한다.

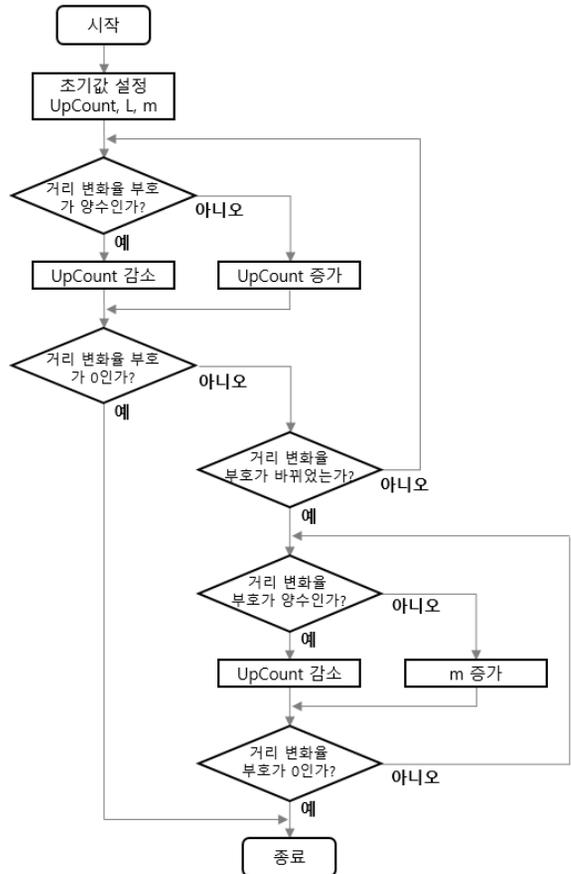


Fig. 5. Independent PRF generation and control

3. 펄스반복주파수 생성 및 제어 검증

Fig. 6은 8비트 마이크로프로세서 ATMEGA128 모듈을 이용하여 독립된 펄스반복주파수 생성기를 설계한 상세 블록도이다. 4개의 푸쉬 스위치를 입력으로 받고, LCD 모듈을 이용하여 Upcount 값과 m 값을 표시하였다. GPIO(General Purpose Input/Output) 1핀을 출력으로 사용하여 +5 V/0 V의 펄스 신호를 발생시켰고, 이를 펄스신호 발생기(Giga-tronics사의 2520B, 상용장비)의

외부 트리거로 입력시켰다. 펄스신호 발생기에서 생성된 X밴드 펄스 신호를 X밴드 안테나로 RF 출력하였다. Fig. 7은 설계/제작된 펄스반복주파수 생성기와 펄스신호 발생기(상용장비)의 모습이다. 생성된 펄스반복주파수 신호는 펄스신호발생기에 외부 트리거 형태로 입력된다. 레이더 운용자가 모노펄스 레이더의 A-Scope 영상을 확인하고, 교정 장비에서 발생하는 RF 신호를 실시간 추적하였다. 그리고 거리 변화율을 확인하여 원격지의 다른 사람에게 이를 알려주었다. 원격지에 있는 사람은 추적 대상인 RF 신호의 거리 변화율이 양(+), 음(-)인지를 확인하고 마이크로프로세서의 상태 변수 값을 조절하였다. 외부 스위치 4개를 이용하여 UpCount와 m 값을 증가/감소하도록 하였다. 첫 번째와 두 번째 푸쉬 스위치는 UpCount값을 1 단위로 증가/감소시키고, 세 번째와 네 번째 스위치는 m 값을 1 단위로 증가/감소하였다. Fast PWM 모드를 이용하여 타이머/카운터의 인터럽트 발생 시점을 실시간으로 변경함으로써 고정밀의 펄스반복주파수를 생성하였다. LCD 디스플레이를 이용하여 현재의 UpCount 값과 m 값을 표시하고, 그 값을 조절 가능하도록 하였다. 모노펄스 레이더와 설계된 펄스반복주파수 생성기의 펄스반복주파수가 일치할 때의 UpCount 값은 49,972 이었고, L값은 64, m 값은 56 이었다. 이를 식 (5)에 대입하여 평균 UpCount 값으로 표현하면 49,972.875 이다.

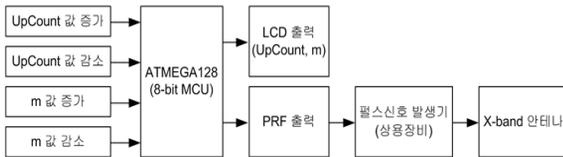


Fig. 6. Block diagram of Independent PRF generator



Fig. 7. PRF generator and pulse signal generator

4. 결론

본 논문에서는 독립된 펄스반복주파수 생성기를 이용하여 모노펄스 레이더의 펄스반복주파수와 유사한 펄스반복주파수 신호를 생성하고 제어하는 방법에 서술하였다. 펄스반복주파수를 정밀 제어하기 위하여 16비트 타이머/카운터의 인터럽트 주기를 규칙적으로 변화시킴으로써 0.0001[Hz] 단위로 평균 펄스반복주파수를 조절할 수 있었다. 따라서 모노펄스 레이더의 펄스반복주파수를 유선으로 수신할 수 없는 원격지에서 본 펄스반복주파수 생성기를 이용하여 모노펄스 레이더의 주파수 위상 교정을 수행할 수 있었다.

References

- [1] David Barton, Samuel Sherman. Monopulse Principles and Techniques, Second Edition. Artech. 2011.
- [2] Y. S. Jang, C. H. Ryu and H. W. Kim, “A Monopulse Radar Uncertainty Study Classified on Target Property,” Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 229-236, 2017.
- [3] Y. S. Jang, G. B. Kim, J. T. Park and C. H. Lee, “Required Performance Analysis of Wavefront Distortion System against Monopulse Radar,” Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 27, No. 6, June 2016.
- [4] J. W. Lee and K. Y. Hwang, “A Study on the Performance Analysis of Pulse Repetition Frequency Jitter Compensation for Generating Doppler Profile,” Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 23, No. 3, pp. 213-220, 2020.
- [5] J. W. Yang, S. H. Yoo, J. H. Yoon and D. J. Lee, “Asynchronous Pulse Repetition Frequency Generator for Phase Calibration of Range Instrumentation Radar,” KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 260-261, Nov. 2020.
- [6] M. H. Ka and A. I. Baskakov, “Selection of Pulse Repetition Frequency in High-Precision Oceanographic Radar Altimeters,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 4, No. 3, pp. 345-348, July 2007.

- [7] K. R. Kim, et. al., "Range Design of Pulse Repetition Frequency for Removal of SAR Residual Image," Journal of Korean Institute of Communications and Information Science, Vol. 41, No. 11, pp. 1653-1660, 2016.
- [8] B. Pyne, V. Ravindra and H. Saito, "An Improved Pulse Repetition Frequency Selection Scheme for Synthetic Aperture Radar," Proceedings of the 12th European Radar Conference in France, pp. 257-260, Sept. 2015.
- [9] W. Zhang, M. Yang, B. Chen, Y. Lin and J. Wang, "A Phase Error Calibration Method for Distributed VHF Radar System," 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), pp. 1-4, 2016.