

위상코드 펄스압축 레이더의 재밍 효과

임중수
백석대학교 ICT학부 교수

Jamming Effect of Phase-Coded Pulse Compression Radar

Joong-Soo Lim
Professor, Division of Information Communication, Baekseok University

요 약 본 논문은 위상코드 펄스압축(PCPC) 레이더의 재밍 효과에 대해서 기술하였다. 대표적인 PCPC 레이더인 Barker code 레이더는 송신 펄스를 13개 또는 31개의 작은 펄스로 분리하여 각 펄스신호를 위상변조하여 송신함으로써 레이더 탐지효율을 높이고 잡음이나 재밍에 대한 영향을 감소시킨다. 일반적으로 레이더는 재밍을 받으면 탐지거리가 짧아지고 탐지 어려움은 높아진다. PCPC 레이더에 잡음재밍이나 반송파 재밍을 실시한 경우에는 펄스코드 융합이 없어서 재밍 영향이 매우 작았지만, DRFM 등을 이용하여 펄스코드 신호를 복제하여 재밍신호로 사용한 동기재밍 경우에는 재밍효과가 크게 나타났다. 특히 펄스코드 신호 복제시간이 길어지면 재밍효과가 증가되는 것을 볼 수 있다. 본 연구는 펄스압축 레이더와 전자전 재밍장치 재밍신호 설계에 유용하게 활용할 수 있다고 판단된다.

주제어 : 융합, 레이더, 위상변조, 재밍, 펄스

Abstract This paper describes the jamming effect of phase-coded pulse compression(PCPC) radar. Barker code radar, a typical PCPC radar, separates transmission pulses into 13 or 31 small pulses and phase modulates and transmits each pulse signal to increase radar detection efficiency and reduce the influence of jamming. Generally, when the radar is subjected to jamming, the detection distance becomes shorter and the detection error rate becomes higher. In the case of noise jamming or carrier jamming on the PCPC radar, the jamming effect is very small for no phase-coded convergence. However, the jamming effect is large in the case of synchronous jamming using the pulse-coded signal as a jamming signal with DRFM. It can be seen that the jamming effect increases when the storage time of the pulse-coded signal is prolonged. This study is considered to be useful for PCPC radar and EW jamming system design.

Key Words : Convergence, Radar, Phase modulation, Jamming, Pulse

1. 서론

펄스압축(PC: pulse compression) 레이더는 대표적인 저피탐(LPI: low probability interception) 레이더로 펄스폭을 길게하고 최대 출력을 작게하여 상대방에게 탐지되지 않으면서도 원하는 표적을 탐지할 수 있는 좋은 레이더이다. 이러한 펄스압축 레이더는 송신펄스폭 내부 반송파

주파수를 변경하는 칩(chirp) 레이더와 펄스폭 내부 위상을 변경하는 PCPC(phase-coded pulse compression) 레이더가 있다[1-4].

PCPC 레이더는 일반 레이더에서 사용하는 $1\mu\text{s}$ 수준의 짧은 송신펄스 신호 대신에 최대출력이 작고 길이가 긴 송신펄스를 사용하고, 긴 송신 펄스를 여러 개의

*This paper was supported by research fund of Baekseok University in 2019.

*Corresponding Author : Joong-Soo Lim(jslim@bu.ac.kr)

세부펄스로 분리한 후 각 세부펄스의 위상을 Barker Code 등을 사용하여 변조함으로써 재밍효과를 최소화 하면서 탐지효율을 높이는 레이더이다.

본 논문은 PCPC 레이더에 대해서 잡음재밍의 영향과 레이더의 펄스코드를 복제하여 사용하는 동기재밍에 대한 재밍 영향을 분석하였다. 2장에서는 PCPC 레이더의 특성을 기술하고, 3장에서는 PCPC 레이더의 재밍효과와 동기 재밍신호 발생에 사용되는 디지털 고주파저장장치(DRFM: digital radio frequency memory), 4장에서는 재밍효과를 요약하는 순서로 기술하였다.

2. 위상코드 펄스압축 레이더

위상코드 펄스압축 레이더는 Fig 1과 같이 펄스 발생부, 이진코드 발생부, 증폭기, 안테나 등으로 구성된 송신기와 저잡음 증폭기, 혼합기, 지연라인(delay line), 검파기 등으로 구성된 수신기로 되어 있다. 송신기에 사용되는 이진코드 파형 중 가장 널리 사용되는 코드는 위상코드(phase-coded) 변조방식으로 만들어지며, 위상코드 변조신호는 통신기의 확산대역(spread-spectrum) 통신신호와 유사하다[5].

위상코드 변조방식에서 가장 널리 사용되는 코드방법은 Fig. 2와 같은 이진(binary) 위상코딩이다. 이진 위상코딩 방식은 전체 펄스폭 τ 을 펄스폭이 τ_{el} 인 n 개의 세부펄스(segment)로 나누어서 각 세그먼트의 위상을 0 또는 π [radian]로 랜덤하게 설정한다. 이 경우 펄스압축 신호의 세그먼트 수는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다 [5,6].

$$n = \frac{\tau}{\tau_{el}} \quad (1)$$

펄스압축 방법의 장점은 수신기의 정합필터가 디지털 쉬프트레지스터(shift register)와 같이 간단한 지연라인에 의해 구현될 수 있다는 것이다. 이 경우 지연라인의 탭(tap)은 세그먼트 폭 τ_{el} 와 같으며, 랜덤하게 발생되는 0 또는 π [radian]를 위상 가중치로 사용한다.

바커 코드(Barker code)가 위상코드 방식의 펄스압축기에 널리 사용된다. 이 코드의 특성은 수신측에서 펄스압축을 하면 주엽을 제외한 모든 부엽의 크기가 일정하며, 가장 긴 바커 코드의 탭 수는 13(1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1)이다. 따라서 큰 압축비가 요구되는 경우, 선형

궤환을 갖는 쉬프트레지스터를 사용하여 세그먼트의 수를 크게 한다. N 단(stage)의 레지스터가 발생할 수 있는 최대 탭수(sequence)는 $n = 2^N - 1$ 개가 되며, 부엽출력의 크기는 일반적으로 최대 출력값의 $\frac{1}{n}$ 이 된다.

Fig. 1에서 입력신호를 $v(t)$ 라 하면 이에 대한 정합필터는 $v^*(-t)$ 과 같이 표현되는 복소공액 임펄스 응답을 갖는다. 따라서 출력신호는 식(2)과 같이 상승적분(convolution integral) 형태로 표현되며, 이는 신호에 대한 자기상관함수(ACF: auto-correlation function)를 의미한다.

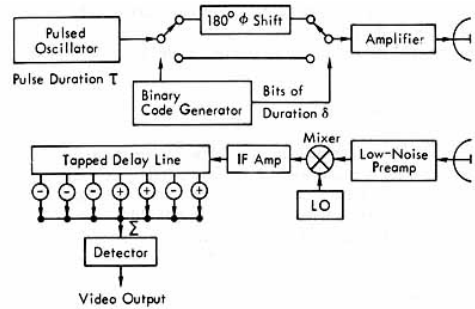


Fig. 1. Phase-Coded Pulse Compression Radar

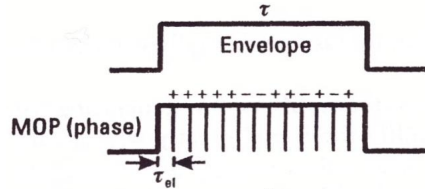


Fig. 2. Phase-Coded Pulse Signal

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} v(\tau)v^*(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

정합필터 출력에 대한 푸리에(Fourier) 변환은 $V(\omega) \cdot V^*(\omega) = |V(\omega)|^2$ 과 같이 PSD (power spectral density)로 주어지며, $V(\omega)$ 는 입력신호의 푸리에 변환이다. 따라서 출력신호는 식(3)와 같이 표현될 수 있다.

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |V(\omega)|^2 e^{j\omega t} d\omega \quad (3)$$

Fig. 3은 n=7인 경우 Barker 코드를 사용한 PCPC 레

이더의 정합필터(taped delayline 을 사용함)를 통과한 출력모양이다. 이 경우 최대출력이 7, 사이드로브 출력은 1이 되어 최대출력의 1/n이 되는 것을 볼 수 있다. 사이드로브의 출력은 일종의 잡음으로 최대출력의 $\frac{1}{2n} - \frac{2}{n}$ 가 된다[6].

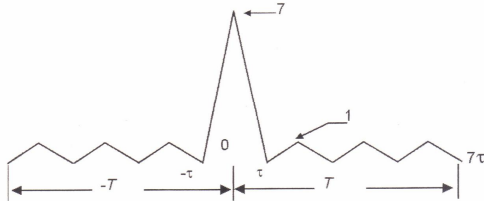


Fig. 3. Video output at n=7 for PCPC Radar 1

3. 위상코드 펄스압축 레이더의 재밍

위상코드 펄스압축 신호를 사용하는 탐색 및 추적레이더에 대한 재밍은 정확한 방향탐지[7-9]와 Fig. 4와 같이 레이더 파형을 복제한 후 이와 유사한 재밍신호를 레이더에 송신하여 레이더가 실제 표적을 정확하게 탐지하지 못하도록 하는 것이다.

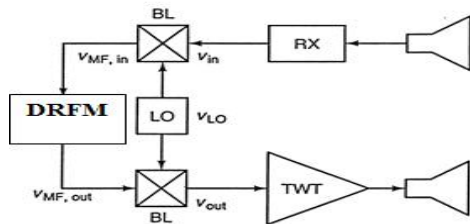


Fig. 4. Repeater Jammer with DRFM

추적레이더에 대한 재밍기술은 레이더의 추적게이트를 교란시켜서 허위표적을 발생시키는 것이다. 거리-도플러 모호성 특성을 갖는 펄스압축 레이더는 복제신호 재밍에 취약한 특성을 갖는다.

복제재밍 신호는 수신된 레이더 신호의 위상과 주파수를 고속 메모리에 저장한 후에 필요한 시간에 메모리에 저장된 신호를 재생시켜서 이를 레이더에 반복하여 송신함으로써 레이더의 거리추적(range tracking)이나 속도추적(velocity tracking)을 교란시킨다[10].

잡음 재밍은 펄스압축 레이더에 대한 재밍효과가 매우 작다. 이는 펄스압축 레이더에서 수신기의 정합필터를 상관기(correlator)로 생각하면 쉽게 설명된다. 즉, 펄스압축

신호에 대한 상관성이 전혀 없는 잡음은 상관기에서 이득을 얻을 수 없지만, 상관성을 갖는 레이더 반사신호는 최대 처리이득을 얻는다. 따라서 잡음재밍은 재밍효과가 매우 낮다.

Fig. 5는 n=31인 PCPC 레이더에 대한 잡음재밍 효과를 식 (3)을 사용하여 시뮬레이션한 결과이다. 레이더 신호의 크기가 31인 경우 잡음재밍 신호의 크기는 4이하로 재밍효과가 매우 작다.

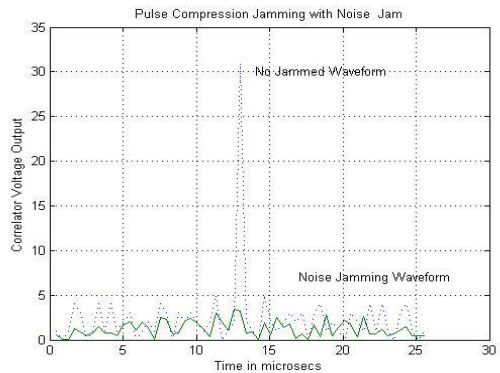


Fig. 5. Effect of Noise Jamming for PCPC Radar at n=31

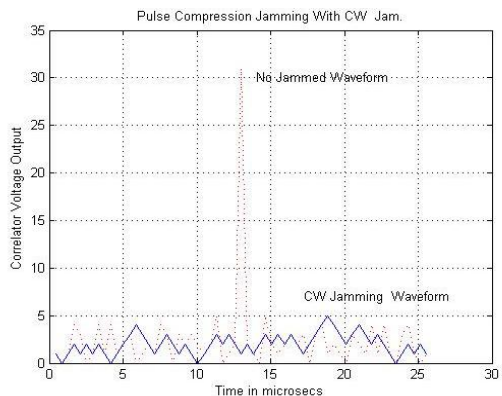


Fig. 6. Effect of CW Jamming for PCPC Radar at n=31

PCPC 레이더의 효과적인 재밍방법은 레이더의 펄스코드 파형을 고주파기억장치를 사용해서 복제하여 이를 변조해서 송신하는 재밍방법이다. 이 경우 재밍 신호의 펄스코드는 레이더의 표적 반사신호의 펄스코드와 많은 부분 일치하므로 재밍효과가 크다[10].

PCPC 레이더의 펄스코드에 대한 재밍효과는 레이더 펄스코드에 대한 상관성으로 나타나므로 식 (1)에서 세그먼트

의 수, 즉 레이더 펄스코드를 복제하는 시간에 비례해서 커진다.

Fig. 7은 n=31인 PCPC 레이더 재밍에서 레이더 펄스코드의 1/4주기를 복제해서 반복재밍을 한 결과로 레이더 신호의 크기가 31인 경우 재밍신호의 최대 크기는 12 수준이다.

Fig. 8, 9는 펄스 코드의 1/2 주기, 1주기를 복제해서 반복 재밍한 결과로 신호크기가 31인 경우 재밍신호의 최대 크기는 14, 31로 재밍효과가 매우 크다.

레이더 펄스코드 신호를 사용해서 재밍을 하기 위해서는 먼저 레이더 방향을 탐지한 후[11,12], 레이더 펄스코드와 동일한 재밍용 펄스코드를 만들어야 한다. 고주파기억장치(DRFM)은 레이더 신호를 복제하여 재머에서 펄스코드를 만들 수 있는 현재까지 개발된 장비 중에서 유일한 장비이다[13].

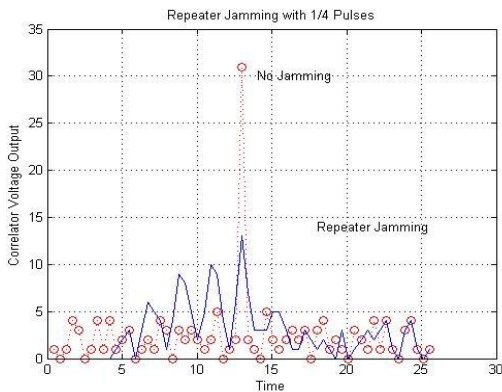


Fig. 7. Effect of Coherent Jamming for PCPC Radar at n=31 with 1/4 pulse-code

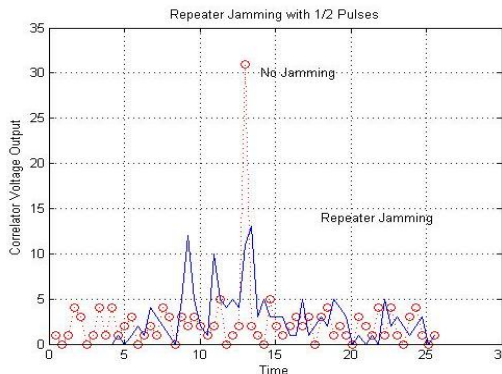


Fig. 8. Effect of Coherent Jamming for PCPC Radar at n=31 with 1/2 pulse-code

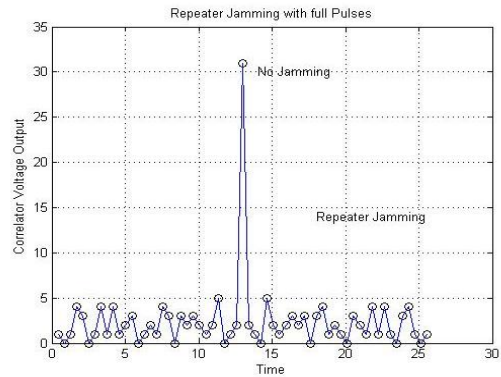


Fig. 9. Effect of Coherent Jamming for PCPC Radar at n=31 with 1 pulse-code

DRFM은 Fig. 10과 같이 레이더가 송신하는 고주파(RF) 신호를 수신하여 Nyquist 이론을 적용한 샘플링 속도로 입력신호를 디지털로 변환하고 이를 메모리 소자에 기억시킨 후, 필요한 시간에 데이터를 읽어서 아날로그 신호로 변환하여 송신한다.

실제 구현되고 있는 DRFM은 입력신호를 효율적으로 디지털화하여 저장할 수 있도록 RF신호를 기저대역(baseband)으로 변환한다. 이 경우 도플러 편이는 주파수의 상향 및 하향 시 사용되는 오실레이터 주파수를 달리 함으로써 얻을 수 있다. 펄스코드 파형의 저장은 고속 디지털 메모리의 용량에 따라 펄스코드 신호를 일부분 또는 전부 저장하여 사용한다[14,15].

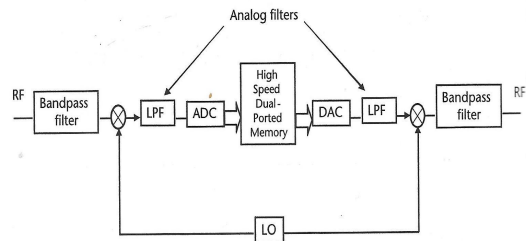


Fig. 10. Block Diagram of DRFM

4. 결론

본 논문은 위상코드 펄스압축 레이더의 구성과 PCPC 레이더의 재밍 효과에 대해서 기술하였다. Barker code를 사용하는 레이더는 송신 펄스를 13개 또는 31개의 작은 펄스로 분리하여 각 펄스신호를 위상 변조하여 송신함으로써

레이더 탐지효율을 높이고 재밍에 대한 영향을 감소시킨다.

PCPC 레이더에 잡음재밍이나 반송파 재밍을 실시한 경우에는 재밍 영향이 매우 작았지만, DRFM을 이용하여 레이더의 펄스코드 신호를 복제하여 재밍신호로 사용한 동기 재밍 경우에는 재밍효과가 크게 나타났다. 특히 펄스코드 신호 복제시간이 길어지면 재밍효과가 증가되는 것을 볼 수 있었으며, 레이더 펄스코드 전주기를 복제해서 재밍하는 경우 레이더 신호 크기가 31이면 재밍신호 크기도 31이 되어 재밍효과가 매우 큰 것을 알 수 있었다.

본 연구 결과는 펄스압축 레이더의 전자보호(EP: Electronic Protection) 장비설계와 전자전 재밍장치의 재밍효과 예측과 재밍신호 발생장치 설계에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후에는 PCPC 레이더 재밍장치의 송신기와 안테나 등을 고려한 종합적인 재밍연구가 필요하다고 사료된다.

REFERENCES

[1] B. R. Mahafaza. (2005). *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab(2nd Edition)*. Chapman and Hall, 297-300.

[2] D. L. Adamy. (2000). *EW 101 A First Course in Electronic Warfare*. Artech House, 23-25.

[3] D. C. Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*. Artech House, Boston, 201-214.

[4] J. S. Lim. (2017). Data Convergence of Circular Array Correlative Interferometer Direction finding with 7 Antennas. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(11), 1-6.

[5] F. Neri. (2001). *Introduction to electronic Defense Systems, 2nd ed*. Artech House, Boston, 324-334.

[6] A. D. Mattino. (2012). *Introduction to Mordern EW Systems*. Artech House, 58-61.

[7] J. S. Lim & G. S. Chae. (2016). Analysis of Direction Finding Accuracy for Amplitude-Phase Comparison and Correlative Interferometer Method. *Journal of the Society of Digital Policy & Management*, 14(1), 195-201.

[8] J. S. Lim, Y. H. Kim & K. C. Kim. (2017). A Simulator for Analyzing of Correlative Interferometer Direction Finder. *Journal of the SMB Convergence Society*, 7(2), 53-58.

[9] Y. H. Kim, J. S. Lim, G. S. Chae & K. C. Kim. (2015). An investigation of the Azimuth Error for Correlative Interferometer Direction Finding. *Journal of the*

Korea Convergence Society, 6(5), 249-255.

[10] D. C. Schleher. (1999). *A Electronic Warfare in the Information Age*. Artech House, Boston, 219-224.

[11] Y. Xun & Z. Z. Cui. (2009). Two- Dimensional Circular Array Real-Time Phase Interferometer Algorithm and its Correction. *2nd International Congress on Image and Signal Processing*, 1-4.

[12] S. Y. Oh, K. C. Cho, J. H. Kim., J. B. Yun & K. J. Han. (2013). A Self-Organizing Angle-based Routing Protocol for Urban Environments. *Journal of the Society of Digital Policy & Management*, 11(10), 379-385.

[13] J. Huang & Y. Jiang. (2015). Design and Realization of DRFM System based on FPGA and DSP. *IET International Radar Conference*.

[14] D. L. Adamy. (2015). *EW 104 EW against a New Generation of Threats*, Artech House, 319-321.

[15] A. D. Mattino. (2012). *Introduction to Modern EW Systems*. Artech House, 272-274.

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[중심회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과
- 1994년 3월 : Auburn대학교 공과대학 전자공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임연구원, 전자전연구실장
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2003년 3월 ~ 2015년 2월 : 백석대학교 창업보육센터장
- 2016년 7월 ~ 현재 : 백석대학교 전산정보원장
- 관심분야 : ICT융합, 정보통신, 전자기기, 전자전, 레이더
- E-mail : jslim@bu.ac.kr