

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.3.31>
JIIBC 2022-3-5

실시간 적용을 위한 드론 탐지 레이다용 신호처리 구조 설계 방안

Design Plan of Signal Processing Structure for Real-Time Application in Drone Detection Radar

공영주*, 손성환**, 현준석**, 유동길**, 조인철**

Young-Joo Kong*, Sung-Hwan Sohn**, Jun-Seok Hyun**,
Dong-Gil Yoo**, In-Cheol Cho**

요약 최근 드론은 다양한 분야에서 활용되고 있고 드론의 기술도 또한 발전하고 있다. 이에 따라 드론에 대한 위험이 증가하고 있으며, 이로 인한 위험을 줄이기 위하여 드론을 탐지하는 기술이 중요해지고 있다. 하지만 드론은 크기가 작고 반사도가 낮은 재질로 되어 있어 탐지가 어렵다. 본 논문에서는 소형/경량화한 펄스 도플러 레이다에 탑재되는 신호처리 구조를 설계하였다. 대용량 데이터를 실시간으로 처리하기 위하여 채널 별 병렬처리를 수행하고 각 단계에서 연산시간 단축을 위한 알고리즘을 적용하였다. 위상배열안테나와 통합하여 야외시험을 통해 드론 탐지 성능을 확인하였으며, 이로 인하여 본 구조 설계가 실시간으로 동작함을 알 수 있었다.

Abstract Recently, drones are being used in various fields, and drone technology is also developing. The risks of drones are increasing, then technology to detect drones is important. However, it is extremely difficult to detect and recognize drones due to the low level radar cross section of the commercial drones. In this paper, a signal processor structure that was mounted the miniaturized and light-weighted was designed. in order to process large amounts of data in real time, parallel processing was performed for each channel and an algorithm was applied to shorten the operation time in each step. As a test of verifying the detection performance through test, it was confirmed that the structure design works in real time.

Key Words : Drone, Radar, Signal Processing, CFAR, Clustering

1. 서 론

무인항공기 및 무인비행체 등 기존의 드론은 특수 목적으로 사용이 한정되어 왔지만 최근에는 기술의 발전을

통하여 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 군사용으로 경찰 및 공격 임무에 사용되고 있어 이로 인하여 드론에 대한 위험이 커지고 있다^[1]. 이에 따라 드론을 미리 탐지하고 방어하는 기술의 필

*정회원, LIG넥스원(주) (교신저자)

**정회원, LIG넥스원(주)

접수일자 2022년 4월 21일, 수정완료 2022년 5월 21일
게재확정일자 2022년 6월 10일

Received: 21 April, 2022 / Revised: 21 May, 2022 /

Accepted: 10 June, 2022

Corresponding Author: youngjoo.kong@lignex1.com
Radar R&D Lab, LIG Nex1 co., Ltd. Korea

요성이 급격히 대두되고 있다. 하지만 크기, 재질, 비행 고도 등과 같이 다른 비행체와는 다른 드론만의 특징들로 인하여 탐지가 어렵다. 이러한 드론의 탐지를 위해서 열, 음향, 레이더 등과 같은 다양한 센서를 기반으로 연구가 수행되고 있다^[2]. 그 중에서도 날씨, 온도, 주야간 상태와 무관하게 탐지가 가능한 레이더를 기반으로 한 드론 탐지 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[3].

레이더를 이용한 드론 탐지 기술은 주로 FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave)를 기반으로 연구되고 있고^[4], UWB(Ultra Wide Band) 레이더를 활용한 초고해상도 드론 영상을 획득하는 연구가 진행되고 있다^[5]. 하지만 FMCW 및 UWB 레이더 시스템을 이용한 드론 탐지의 경우에는 드론의 적은 RCS(Radar Cross Section)때문에 탐지 거리가 적어지게 된다^[6]. 따라서 원거리에 존재하는 드론을 탐지를 위하여 펄스 도플러 레이더의 운용에 대한 기술이 필요하게 된다^{[7][8]}.

본 논문에서는 드론 탐지를 위하여 펄스 도플러 레이더에 실시간으로 적용 가능한 소형/경량화 레이더 신호처리 구조를 설계하고자 하였다. 고성능/고가의 시스템으로 구현하지 않고 드론 탐지가 가능하도록 신호처리 구조를 최적화하였다. 그리고 설계된 신호처리 구조를 통하여 실제 드론 탐지 시험을 통하여 탐지성능을 확인하였다.

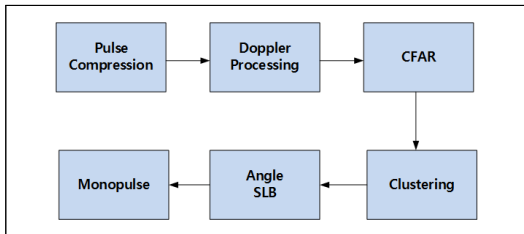


그림 1. 레이더 신호처리 흐름도
Fig. 1. Radar Signal Processing Flow Chart

표 1. 신호처리장치 사양
Table 1. Signal Processor

항목	Parameter
모델	Intel Xeon E-2276ME
코어 수	6core, 12Thread
동작 클러	2.8GHz
메모리	48Gbyte

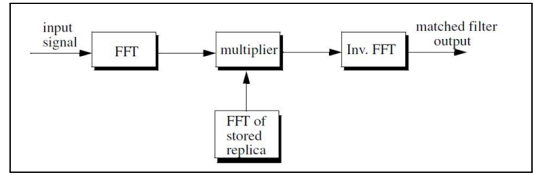


그림 2. 펄스압축 방안
Fig. 2. Pulse Compression Method

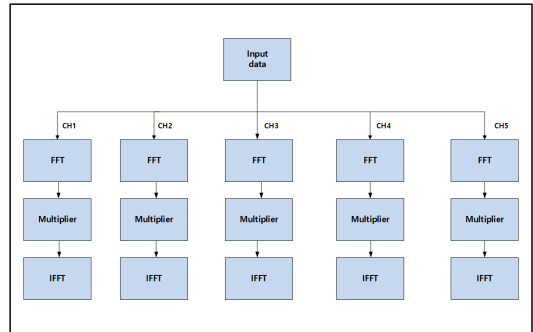


그림 3. 펄스압축 병렬 처리
Fig. 3. Pulse Compression Parallel processing

II. 본 론

레이더 신호처리는 그림 1과 같이 레이더 수신 신호를 입력받아 펄스압축, 도플러 처리, CFAR 등 표적 탐지 기능을 수행한다. 본 논문에서는 표 1의 신호처리장치의 사양으로 신호처리를 수행하도록 설계하였다. 휴대가 가능하도록 소형/경량화 신호처리장치를 구성하기 위하여 고성능 CPU 하나를 탑재하였다. 이로 인하여 대용량의 수신 데이터를 실시간으로 처리하기 위하여 연산시간 단축이 가능한 알고리즘을 설계하였다.

1. 펄스압축

펄스압축은 수식 (1)과 같이 두 신호간의 컨볼루션으로 상관도를 계산한다. 여기서 $x(t)$ 는 입력신호이고, $x_{ref}(t)$ 는 기준입력 신호이다.

$$y(t) = x(t) * x_{ref}(t) \tag{1}$$

하지만 실제 구현은 그림 2과 같이 고속푸리에 변환(Fast Fourier Transform) 방식을 이용한다. FFT 및 IFFT 등으로 펄스압축을 수행하게 된다.

펄스압축 연산시간을 단축시키기 위하여 기준입력 신

호를 미리 계산하여 내부 메모리에 장입하였다. 기준 입력 신호는 송신 펄스 폭 및 대역폭에 의하여 결정되므로 송신 펄스 폭 및 대역폭에 따라 미리 계산하여 장입한다. 그리고 연산시간을 단축하기 위하여 채널별로 병렬처리 구조인 OpenMP를 적용하였다. 그림 3과 같이 채널별로 FFT, Multiplier, IFFT를 수행하였다. 펄스압축은 거리방향으로 FFT 및 IFFT를 수행하기 때문에 데이터 정렬이 필요하지 않다.

2. 도플러 처리

도플러 처리는 표적의 속도정보를 획득하기 위해서 동일 거리 위치의 모든 펄스 단위 샘플들에 대해(slow time 방향) FFT를 수행하는 것으로 도플러 주파수 성분을 획득하여 속도 정보를 추출한다. 펄스단위로 획득된 펄스압축 데이터를 slow time 방향으로 푸리에변환을 수행한다. 거리방향으로 정렬되어 있는 펄스압축 데이터를 slow time 방향으로 푸리에변환을 수행하기 위해서는 펄스방향으로 정렬이 필요하다. 대용량 데이터를 정렬하기 위해서는 많은 연산시간이 소요된다. 본 논문에서는 데이터 정렬없이 도플러 처리를 수행하는 방안을 적용한다. 일반적으로 도플러 처리는 DFT(Discrete Fourier Transform)을 적용하여 수행한다. 수식 2는 DFT 정의를 나타낸다.

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n X(j) W_n^{(j-1)(k-1)} \quad (2)$$

$$W_n = e^{(-2\pi i)/n}$$

여기서 X는 입력데이터, Y는 결과데이터, n은 펄스수, k는 FFT수를 나타낸다.

정의된 DFT를 풀어서 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Y(1) &= X(1) W_n'(1,1) + X(2) W_n'(2,1) + \dots + X(n) W_n'(n,1) \\ Y(2) &= X(1) W_n'(1,2) + X(2) W_n'(2,2) + \dots + X(n) W_n'(n,2) \\ &\vdots \\ Y(k) &= X(1) W_n'(1,k) + X(2) W_n'(2,k) + \dots + X(n) W_n'(n,k) \end{aligned}$$

여기서 $W_n'(j, k) = e^{(-2\pi i)(j-1)(k-1)/n}$ 로 재정의한다. 재정의된 $W_n'(j, k)$ 를 이용하여 DF base를 만들어 수식 3과 같이 매트릭스 곱을 적용하여 도플러 처리를 수행한다.

$$\begin{pmatrix} Y(1,1) & \dots & Y(m,1) \\ \vdots & & \vdots \\ Y(1,k) & \dots & Y(m,k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_n'(1,1) & \dots & W_n'(n,1) \\ \vdots & & \vdots \\ W_n'(1,k) & \dots & W_n'(n,k) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X(1,1) & \dots & X(n,m) \\ \vdots & & \vdots \\ X(1,n) & \dots & X(n,m) \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 X는 펄스압축 데이터, Y는 도플러 처리 데이터,

W_n' 은 DF base, m은 거리방향 샘플 수, n은 펄스 수, k는 FFT수를 나타낸다.

$W_n'(j, k)$ 로 정의된 DF Base 매트릭스는 펄스 수와 FFT 수에 정해지는 값이므로 미리 계산하여 내부메모리에 저장한다. 그림 4와 같이 OpenMP를 활용하여 데이터 정렬없이 채널별로 매트릭스 곱을 병렬 수행하여 도플러 처리를 수행한다.

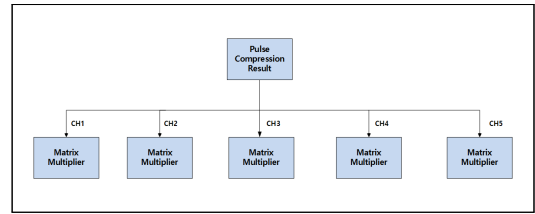


그림 4. 도플러 처리 병렬 처리
 Fig. 4. Doppler Process Parallel processing

3. CFAR

CFAR(Constant False Alarm Rate)는 주위 잡음 신호에 따라서 임계값을 설정하는 기법으로 표적 탐지의 기본적인 알고리즘이다. 레이더 시스템에서 주요 사용되는 CFAR는 CA CFAR(Cell Average CFAR), OS CFAR(Ordered Statistic CFAR) 등이 있다. 본 논문에서는 비균일 잡음환경이나 다수 표적 표적상황에서 주로 사용되는 OS CFAR를 적용하였다. OS CFAR는 그림 5와 같이 참조 셀을 오름차순으로 정렬해야 하므로 많은 연산량이 필요하다. 따라서 OS CFAR를 실시간으로 적용하기 위해서는 연산량 단축이 필요하다.

연산량을 단축하기 위하여 그림 6과 같이 거리방향으로 구역을 나누어서 OS CFAR를 적용한다. 거리방향 3셀씩 묶어 구역을 나누고 각 구역내에서 가장 큰 파워를 가지는 셀에 대해서 우선적으로 OS CFAR를 적용한다. 우선적으로 수행한 셀에 대하여 OS CFAR결과가 히트인 경우에 대해서만 구역 내 나머지 셀도 OS CFAR를 수행한다. 여기서 히트는 CFAR 문턱치를 넘는 셀을 칭한다. 가장 큰 파워 셀의 결과가 히트가 아니면 나머지 두 셀의 결과도 히트가 아닐 확률이 상당히 높으므로 나머지 두 셀에 대해서는 OS CFAR를 수행하지 않는다. 일반적으로 레이더 수신 신호의 대부분은 잡음이기 때문에 OS CFAR를 수행하는 횟수는 기존의 방안보다 상당히 줄어들게 된다^[9].

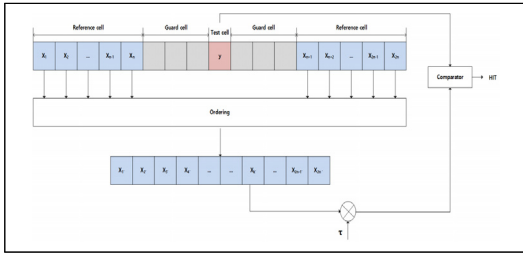


그림 5. OS CFAR 블록도
Fig. 5. OS CFAR block structure

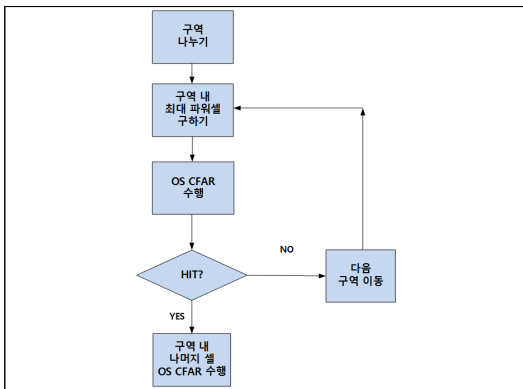


그림 6. OS CFAR 처리 방안
Fig. 6. OS CFAR Processing Method

4. 클러스터링

클러스터링은 CFAR를 수행한 결과에 대하여 인접 셀의 히트들을 하나의 표적으로 묶는 알고리즘이다. 그림 7은 거리-도플러 맵에서 클러스터링을 수행하는 방법을 나타내었다. 2차원 거리-도플러 맵에서 거리방향으로 셀 인덱스를 증가시키면서 해당 셀의 히트 여부를 검사하고, 이웃한 셀이 히트일 경우에는 같은 클러스터 번호를 부여한다^[10]. 그림 8과 같이 해당 셀이 히트일 경우에는 해당 셀 주변 모든 셀을 검사하지 않고 클러스터링을 수행한 이전 해당 셀 주변 4셀의 히트 여부를 확인하여 주변 셀이 히트일 경우 해당 셀을 주변 히트와 같은 클러스터 번호를 부여한다.

5. 각도 SLB

각도 SLB(Side Lobe Blanking)은 주 채널 데이터와 SLB 채널의 데이터의 파워를 비교하여 각도 부엽에서 발생하는 오프젝트를 제거한다. 클러스터링을 수행한 표적

에 대하여 주 채널 데이터와 SLB 채널 데이터의 파워를 비교를 병렬처리하여 오프젝트를 제거한다.

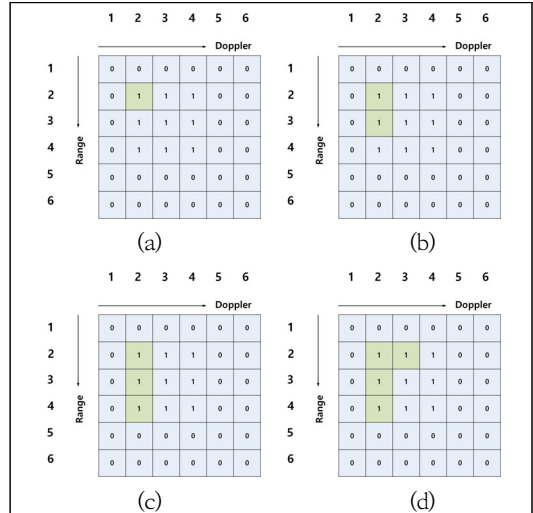


그림 7. 거리-도플러 맵 클러스터링 방안
Fig. 7. Clustering Method of Range-Doppler Map

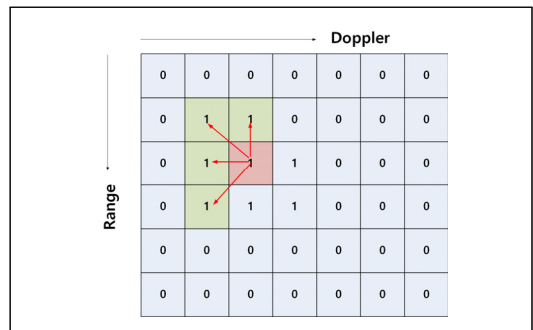


그림 8. 클러스터링 방안
Fig. 8. Clustering Method

6. 모노펄스

모노펄스는 표적과 안테나의 각도 오차를 추출하는 기능으로 모노펄스 각도오차를 기반으로 표적의 방향을 계산한다.

III. 야외 시험

본 논문에서 설계한 연산시간이 단축된 신호처리 구조

- [7] Kee-Woong Lee, Kyoung-Min Song, Jung-Hwan Song, Chul-Ho Jung, Woo-Kyung Lee, Myeong-Jin Lee, Yong-Kyu Song, "Implementation of Radar Drone Detection Based on ISAR Technique", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 28, No. 2, pp. 159-162, Feb 2017. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.2.159>
- [8] Dong-Gil Dong, Jun-Seok Hyun, In-Chel Cho, Sung-Hwan Sohn, "A Study on Algorithm to Improve Accuracy of Initial Track Beam Steering Using Radar Radial Velocity Measurement", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 21, No. 4, pp. 63-73, Aug 2021. <https://doi.org/10.7236/IIBC.2020.20.2.67>
- [9] Young-Joo Kong, Seon-Keol Woo, Sungho Park, Seung-Yong Shin, Youn Hui Jang, Eunjung Yang, "OS CFAR Computation Time Reduction Technique to Apply Radar System in Real Time", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 29, No. 10, pp. 791-798, Oct 2018. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.10.791>
- [10] Young-Joo Kong, Seon-Keol Woo, Sungho Park, Seong-Hyun Ryu, Yeon-Duk Kang, "Separation of Adjacent Target using Range-Doppler Clustering Method", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 20, No. 2, pp. 66-73, Apr 2020. <https://doi.org/10.7236/IIBC.2020.20.2.67>
- [11] Jae-Hwan Lim, Hyoung-Suk Jin, Jong-Hyun Lee, "The Fabrication of Compact Active Array Antenna for Drone Detection Radar", Journal of IKEEE, Vol. 25, No. 4, pp. 703-709, Dec 2021. <https://doi.org/10.7471/ikeee.2021.25.4.703>

저 자 소개

공 영 주(정회원)



- 2009년 2월 : 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원

손 성 환(정회원)



- 2006년 2월 : 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)
- 2010년 2월 : 인하대학교 정보통신대학원 (공학박사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원

현 준 석(정회원)



- 2016년 2월 : 한밭대학교 제어계측과 (공학사)
- 2019년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 선임연구원

유 등 길(정회원)



- 2011년 2월 : 한양대 전자컴퓨터공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 한양대 전자전기제어계측공학과 (공학석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 수석연구원

조 인 철(정회원)



- 2015년 2월 : 서원대학교 컴퓨터교육과 (공학사)
- 2017년 2월 : 인하대학교 정보컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2017년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원(주) 선임연구원