

# 다기능 레이다 자원 관리를 위한 효율적인 드웰 타임 할당 기법

차상빈\*<sup>1</sup>, 박상홍\*<sup>2</sup>, 정주호\*\*<sup>3</sup>, 김우찬\*\*\*<sup>4</sup>, 최인오\*\*\*\*<sup>5</sup>

## Efficient Dwell Time Allocation Method for Multi-Function Radar Resource Management

Sangbin Cha\*<sup>1</sup>, Sanghong Park\*<sup>2</sup>, Jooho Jung\*\*<sup>3</sup>, Woochan Kim\*\*\*<sup>4</sup>, and Inoh Choi\*\*\*\*<sup>5</sup>

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UD210009DD)

### 요 약

다기능 레이다는 한정된 자원으로 다수의 임무를 수행하여야 하며, 최근 이와 관련된 자원 관리 연구가 활발히 진행되어왔다. 특히, 드웰 타임은 탐색 및 추적 임무 성능에 영향을 주는 주요 자원이기 때문에 두 임무 간의 균형 잡힌 할당이 이루어져야 하며, 이와 관련된 기존 연구는 두 임무의 성능이 균형 있게 최대화 되도록 최적화 기법을 사용하여 수행되어왔다. 하지만, 최적화 기법을 실시간으로 적용하기에는 드웰 타임 설계 및 운용 측면에서 많은 실무적 어려움이 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여 보다 효율적인 다기능 레이다 드웰 타임 할당 기법을 제안한다. 먼저, 드웰 타임을 매개변수로 하는 탐색 및 추적 임무의 관계를 수학적으로 분석한 후, 기존 최적화 기법의 실무적 어려움을 고찰한다. 그리고 이를 해결하기 위하여 드웰 타임의 최적 펄스 개수를 다양한 할당 모드에 따라 미리 정의하여, 다기능 레이다 자원 관리의 실용성을 향상시킨다.

### Abstract

Recently, several methods for multi-functional radar resource management (RRM), which performs many tasks with limited resource, have been widely developed. Especially, a balanced allocation of dwell time, which is an important parameter for search and tracking tasks, is necessary to achieve the RRM, so the conventional methods for RRM have been conducted by using optimization algorithms. However, there are many difficulties in applying the optimization methods to multi-functional radar in terms of design and operation. Therefore, in this paper, we propose an efficient dwell time allocation method to address these difficulties. First, we mathematically analyze the relationship between search and tracking tasks with dwell time, and discuss the difficulties for RRM. Next, by previously defining the optimal number of pulses for dwell time according to several allocation modes, the efficiency for RRM can be improved.

### Keywords

radar resource allocation, multi-function radar, dwell time, search and tracking

\* 부경대학교 전자공학과

- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-7515-0650>

- ORCID<sup>2</sup>: <http://orcid.org/0000-0001-8512-1431>

\*\* 건국대학교 글로벌캠퍼스 안보·재난안전융합연구소 센터장

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7087-8079>

\*\*\* 국방과학연구소 선임연구원

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5983-6780>

\*\*\*\* 한국해양대학교 전자전기정보공학부 교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0410-1066>

• Received: Mar. 15, 2023, Revised: May 11, 2023, Accepted: May 14, 2023

• Corresponding Author: Inoh Choi

Dept. of Electronics and Communications Engineering

National Korea Maritime & Ocean University, Busan, South Korea

Tel.: +82-51-410-4317, Email: inohchoi@kmou.ac.kr

## 1. 서 론

최근 레이더 기술 발달로 인해 원하는 방향으로 전자식 빔 조향이 가능해짐에 따라, 이로 인한 다기능 레이더(MFR, Multi-Function Radar)가 개발되어 여러 분야에 활용되고 있다[1]. 이때 다기능 레이더는 다수의 표적에 대한 다양한 임무를 유한한 자원 내에 수행해야 하므로, 각 임무를 효과적으로 할당하기 위한 자원 관리 기법 연구가 진행되어왔다.

국외 연구의 경우 임무의 성능 향상을 위한 목적으로 자원 관리 연구가 수행되었으며, 주로 탐지 및 추적 성능 향상을 위해 레이더 자원(e.g 파형, 전력, 대역폭, 드웰 타임, PRF 등)을 다차원 변수로 공식화하여 최적화 알고리즘을 통한 최적의 해를 선택하는 문제로 접근하였다[2]-[4]. 여기서 드웰 타임(Dwell time)이란 각 임무에 대해 할당한 빔 조사 시간 자원을 뜻하며, 이러한 시간 자원은 탐색 및 추적 임무 성능에 영향을 주는 주요 자원이다. 따라서 한정된 시간 자원으로 다수의 임무를 수행하는 MFR 특성상, 탐지 및 추적 임무 간의 균형 잡힌 시간 자원 관리가 이루어져야 한다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 국외에서는 한정된 드웰 타임을 탐지 및 추적 임무 성능이 균형 있게 최대화 되도록 최적화 알고리즘을 사용하여 각 임무에 드웰 타임을 할당하는 방향으로 진행되었다[5]. 이와 관련된 최적화 알고리즘으로는 weighted sum, linear programming, minimax solving 알고리즘 등이 있으며, 탐지 임무에서는 SNR(Signal to Noise Ration), 추적 임무에서는 BCRLB(Bayesian Cramer-Rao Lower Bound)를 주로 비용함수로 사용하였다. 이러한 최적화 기반의 접근법으로 공학적인 관점에서 임무 성능을 위한 최적의 해를 자명하게 찾을 수 있기 때문에 해석 및 자원 관리 측면에서 아주 유용하며, 다양한 드웰 타임들을 최적으로 선택하여 운용의 폭을 보다 다양하게 넓힐 수 있다.

하지만 최적화 기반의 접근법은 실제로 실무에 적용하기에는 많은 어려움이 존재한다. 먼저 드웰 타임은 PRF와 관련되며 PRF는 레이더 운용에서 매우 중요한 작전요소이기 때문에 이러한 자원을 조절하는 것은 레이더 운용에 많은 영향을 미칠 수

있다. 또한, 변화하는 상황에 맞추어 지속적으로 최적화 계산 업데이트 및 드웰 타임을 설계하여야 하기 때문에 최적화 기법을 실시간으로 적용하기에는 실무적 운용 측면에서 적합하지 않을 수 있다.

이에, 본 논문에서는 최적화 기법의 실무적 어려움을 해결하기 위해 가변 될 드웰 타임을 미리 정의하여 상황에 맞게 탐색 및 추적 임무에 드웰 타임을 할당하는 효율적인 다기능 레이더 드웰 타임 할당 기법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 드웰 타임을 매개변수로 하는 탐색 및 추적 임무의 관계를 수학적으로 분석한다. 이후, 기존 최적화 기법의 실무적 어려움을 고찰하고, 이를 해결하기 위한 본 논문에서 제안하는 기법을 소개한다.

## II. 다기능 레이더 탐색 및 표적 추적 모델링

본 논문에서는 아래 그림 1과 같이 타임라인을 구성한다. 여기서  $k$ 는 자원 할당 구간 인덱스,  $T_{k,total}$ 는  $k$ 번째 할당 구간의 총 드웰 타임을 나타내며, 탐색 및 추적 임무 수행에 각각 할당된다.

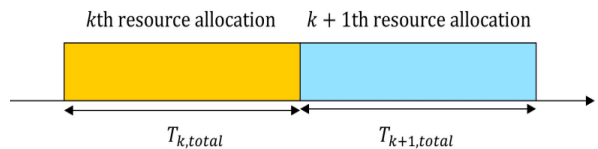


그림 1. 자원 할당 타임라인

Fig. 1. Resource allocation timeline

### 2.1 탐색 모델

$k$ 번째 할당 구간에서 아래의 그림 2와 같이  $N$ 개의 레이더 탐색 영역이 할당되었다고 가정하자. 여기서  $S_{i,k}$ 는 탐색 영역,  $\theta_{i,k}$ 는 탐색 영역 각도,  $i=1,2,\dots,N$ 는 탐색 영역 인덱스이다. 표적을 탐지하기 위해 다기능 레이더는 각각의 탐색 영역에 시간 자원을 할당하여야 하며, 각 영역에 할당된 드웰 타임이  $T_{S_{i,k}}$  일 때, 탐색 레이더의 SNR은 다음과 같이 정의할 수 있다[6].

$$SNR_{i,k} = \frac{P_{av} A_e T_{S_{i,k}} \sigma}{(4\pi)^k k_B T_s R_{i,k}^4 L_{loss} \theta_{i,k}} \quad (1)$$

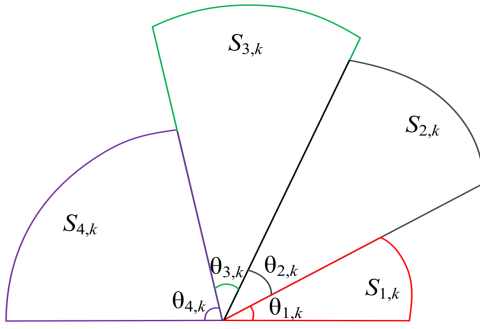


그림 2. 레이더 탐색 영역[5]  
Fig. 2. Radar search sector[5]

여기서  $\sigma$ 는 표적의 RCS,  $k_B$ 는 볼츠만 상수,  $T_s$ 는 잡음 온도,  $R_{i,k}$ 는 탐색 거리,  $P_{av}$ 는 평균 송신 전력,  $L_{loss}$ 는 감쇄를 나타낸다.

식 (1)을 통해 결정된 탐색 거리  $R_{i,k}$  및 각도  $\theta_{i,k}$ 에 대해서 드웰 타임을 많이 할당할수록 더 큰 SNR을 생성한다는 것을 알 수 있다. 또한, 주어진 드웰 타임에 대해 레이더가 더 큰 탐색 거리 및 각도로 영역을 탐지해야 할 경우 더 작은 SNR이 생성됨을 알 수 있다. 따라서, 지정된 SNR을 달성하기 위해서 더 큰 탐색 거리 및 각도를 가진 영역에 더 많은 시간 자원을 할당하여야 한다.

## 2.2 추적 모델

$k$ 번째 할당 구간에서  $Q$ 개의 표적이 있다고 가정하면, 표적의 상태전이 모델은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{x}_k^q = \mathbf{F}_q \mathbf{x}_{k-1}^q + \mathbf{u}_{k-1}^q, \quad \mathbf{F}_q = \mathbf{I}_2 \otimes \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{x}_k^q = [x_k^q, \dot{x}_k^q, y_k^q, \dot{y}_k^q]$ 는 표적의 상태 벡터(위치, 속도),  $q=1,2,\dots,Q$ 는 표적 인덱스,  $\mathbf{u}_k$ 는 공분산  $\mathbf{Q}_{k-1}^q$  갖는 zero mean gaussian 잡음을 나타내며,  $\mathbf{F}_q$ 는 상태전이 행렬[7]을 나타낸다. 이때,  $\otimes$ 는 Kronecker 연산자,  $\mathbf{I}_2$  단위행렬,  $T_0$ 는 revisit time을 나타낸다. 표적이 탐지되고, 추적 초기화가 수행되면, 다기능 레이더는 표적의 예측 지점으로 추적 범을 조사하게 된다. 이로 인해, 수신 신호로부터 표적의 거리, 방향 정보를 얻을 수 있고, 표적의 거리 및 각도 측정값은 다음과 같이 획득할 수 있다.

$$z_{q,k} = h(\mathbf{x}_k^q) + w_{q,k} \quad (3)$$

여기서  $h(\mathbf{x}_k^q)$ 는 거리 및 각도 정보,  $w_{q,k}$ 는 uncoupled 측정 오차 오차를 나타내며 식 (4)(5)와 같이 정의할 수 있다.

$$h(\mathbf{x}_k^q) = [R_{q,k}, \phi_{q,k}]^T = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_k^q - x)^2 + (y_k^q - y)^2} \\ \arctan[(y_k^q - y) / (x_k^q - x)] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$w_{q,k} = \text{blkdiag}(\sigma_{R_{q,k}}^2, \sigma_{\phi_{q,k}}^2) \quad (5)$$

이때,  $(x, y)$ 는 레이더 위치,  $\sigma_{R_{q,k}}^2, \sigma_{\phi_{q,k}}^2$ 는 거리 및 각도의 평균 제곱 오차에 대한 CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)를 나타내며, 다음과 같이 정의할 수 있다[8].

$$\begin{cases} \sigma_{R_{q,k}}^2 \propto (\mu_{q,k} \beta_k^2)^{-1} \\ \sigma_{\phi_{q,k}}^2 \propto (\mu_{q,k} / B_k)^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $\beta_k$ 는 유효 대역폭,  $B_k$ 는 수신 안테나의 3dB 빔 폭,  $\mu_{q,k}$ 는 표적의 SNR을 나타내며,  $\mu_{q,k}$ 의 경우 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\mu_{q,k} \propto \sigma^2 T_{T,q,k} / R_{q,k}^4 \quad (7)$$

이때,  $R_{q,k}$ 는 레이더와 표적 사이의 거리,  $\sigma$ 는 표적의 RCS, 그리고  $T_{T,q,k}$ 는 표적에 할당된 드웰 타임을 나타낸다. 식 (7)을 통해 많은 드웰 타임을 할당하면 오차가 줄어들음을 알 수 있다.

## III. 최적화 기반의 탐색 및 임무 자원 할당

### 3.1 탐지 임무 자원 할당

각각의 탐색 영역은 서로 다른 중요도를 가질 수 있으며, 중요도에 비례해 드웰 타임을 할당하여야 한다. 여기서 중요도는 NP-hard 문제로 취급할 수 있으며, 처한 상황마다 각각의 임무들은 천차만별 다르게 중요도를 가지기 때문에 명확한 공학적인 해답이 없다. 따라서 중요도 판단의 경우 운용자가 상황에 맞게 판단하여야 한다.

중요도가 높다고 판단되는 탐색 구역의 SNR이 작을 경우, 원하는 성능이 되도록 해당 탐색 구역에 많은 드웰 타임을 할당하여 SNR을 높여야 한다. 따라서, 원하는 성능을 위한 제약조건을 설정하고 최적화 알고리즘을 통해 각 영역에 할당될 드웰 타임을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{T_{S,k}} \left( \min_{i \in \mathbf{i}} (SNR_{i,k}) \right) \quad (8) \\ & \text{s.t.} \sum_{i \in \mathbf{i}} T_{s,i,k} = T_{k, \mathcal{S}a}, T_{S,i,k} \geq 0, \quad i \in \mathbf{i} \end{aligned}$$

여기서  $T_{S,k} = [T_{S1,k}, T_{S2,k}, \dots, T_{S,N,k}]$ 는 탐색 영역에 할당될 드웰 타임 벡터,  $T_{k, \mathcal{S}a}$ 는 탐색 임무에 할당된 총 드웰 타임을 나타낸다.

### 3.2 추적 임무 자원 할당

추적 임무 또한 운용자가 원하는 임무 성능에 맞추어 자원이 가능하며, 추적 오차의 정규화된 BCRLB는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F(T_{T,k}) = \sqrt{\text{Tr}[AC_{CRLB}(T_{T,q,k})A^T]} \quad (9)$$

여기서  $T_{T,k} = [T_{T1,k}, T_{T2,k}, \dots, T_{T,Q,k}]$ 는 추적 표적에 할당될 드웰 타임 벡터,  $A$ 는 정규화 행렬,  $C_{CRLB}$ 는 BCRLB[9] 행렬을 말하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{CRLB}(T_{T,q,k}) = \left\{ J(T_{T,q,k}) \Big|_{x_k^q}^{-1} \right\} \quad (10)$$

여기서  $J(T_{T,q,k}) \Big|_{x_k^q}$ 는 예측된 Bayesian information matrix(BIM)을 나타내며, 다음과 같이 정의할 수 있다[10].

$$\begin{aligned} J(T_{T,q,k}) \Big|_{x_k^q} &= \left[ Q_{x,k-1}^q + F_q J^{-1}(x_{k-1}^q) F_q^T \right]^{-1} \quad (11) \\ &+ \left[ T_{T,q,k} G_{q,k}^T Y_{q,k}^{-1} G_{q,k} \right] \Big|_{x_{k-1}^q} \end{aligned}$$

이때,  $Y_{q,k}^{-1}$ 는 식 (5)에서 드웰 타임 성분을 제외

한 나머지 행렬 성분,  $G_{q,k} = [\Delta_{x_k^q} h^T(x_k^q)]^T$ 는 Jacobian 행렬을 나타낸다[11]. 추적 표적 또한, 중요도에 비례해 드웰 타임을 할당하여야 하며, 추적 임무에 할당된 총 드웰 타임  $T_{k, Tra}$ 를 이용해 탐색 임무와 같이 제약조건을 설정하여 할당될 최적의 드웰 타임을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \min_{T_{T,k}} \left( \max_{q \in \mathbf{q}} (F(T_{T,k})) \right) \quad (12) \\ & \text{s.t.} \sum_{q \in \mathbf{q}} T_{T,q,k} = T_{k, Tra}, T_{T,q,k} \geq 0, \quad q \in \mathbf{q} \end{aligned}$$

### 3.3 최적화 기법의 실무적 운용 단점

하지만, 이러한 최적화 기법의 해는 레이다 실무에 적용하기에는 많은 어려움이 존재한다. 먼저, 탐색 및 추적 임무는 MPRF(Medium-PRF) 파형을 사용한다[12]. MPRF 파형 사용은 표적의 거리 및 속도 모호성을 발생시키고, 탐색 임무의 경우 이를 해결하기 위해 서로 다른  $N$ 개의 MPRF 파형을 사용한다. 그림 3은  $M$ -of- $N$  탐색 체계의 파형을 나타내며,  $N$ 은 서로 다른 MPRF의 burst 수,  $PRI_i$ 는  $i$ 번째 burst의 PRI,  $Q$ 는 펄스 개수이다. 따라서 탐색 임무의 드웰 타임은 다음과 같이 정의할 수 있다.

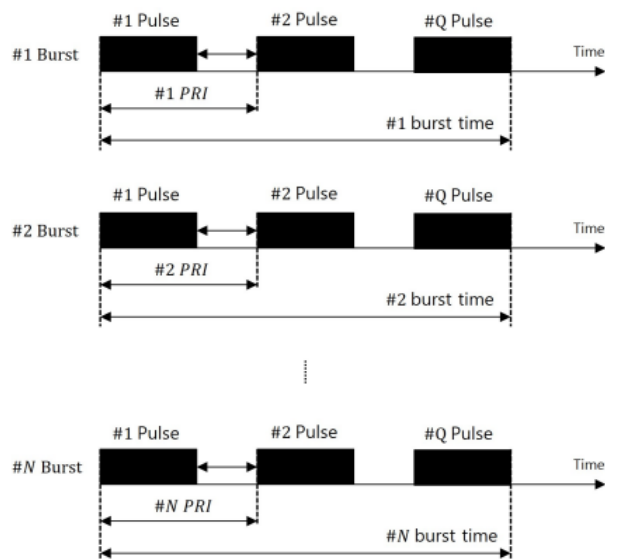


그림 3.  $M$ -of- $N$  탐색 체계의 파형  
Fig. 3. Waveform for  $M$ -of- $N$  detection

$$T_{Search} = \sum_{i=1}^N Q \times PRI_i, (i=1,2,\dots,N) \quad (13)$$

추적 임무의 경우, 추적 필터로부터 표적의 거리 및 속도를 예측할 수 있기 때문에 다수의 PRF가 아닌 하나의 PRF 추적 파형을 사용한다[13]. 아래 그림 4는 추적 임무 체계의 파형을 나타내며, 추적 임무의 드웰 타임은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

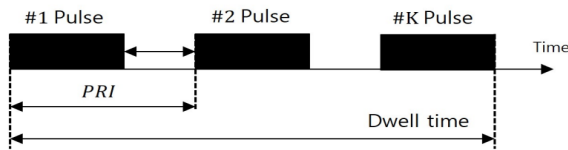


그림 4. 추적 체계의 파형  
Fig. 4. Waveform for track

$$T_{Track} = K \times PRI \quad (14)$$

식 (13)(14)을 통해서 알 수 있듯이, 드웰 타임은 펄스 개수와 PRF에 의해 결정되며 다양한 최적의 드웰 타임들을 설계하기 위해 펄스 개수 및 PRF를 조절하여야 함을 알 수 있다. 하지만, 표적의 모호성 문제를 해결하기 위한 PRF 조합이 요구되는 만큼, PRF 조절은 모호성 해결에 문제가 발생할 수도 있으며, 또한 PRF는 레이다 운용에서 매우 중요한 작전요소이기 때문에 PRF 조절은 레이다 운용에 많은 영향을 미칠 수 있다. 그렇기 때문에, 다양한 최적의 드웰 타임들을 실제로 설계 및 운용하기에 실무적으로 많은 어려움이 존재한다. 따라서 이러한 실무적 운용의 어려움을 해결하기 위한 연구가 필요하다.

#### IV. 제안된 기법

본 절에서는 새로운 드웰 타임 할당 기법을 제안한다. 제안된 기법은 모호성 PRF 조합을 사용하여 레이다 운용에 차질을 일으키지 않고, 펄스 개수 조절을 통해 드웰 타임을 설계함으로써 최적화 기반 접근법의 실무적 어려움을 해결하면서 다양한 드웰 타임을 설계할 수 있는 장점이 있다. 또한 가변될 드웰 타임의 정도에 따라 사전에 다수의 할당 모드를 구성하여 지속적인 최적화 계산 업데이트가 아닌 모드 변경을 통해 실시간으로 빠르게 드웰 타임

을 할당함으로써 긴박한 상황에 대응할 수 있다. 제안된 기법의 자세한 설명은 다음과 같다.

##### 4.1 모호성 해결을 위한 PRF 조합

PRF의 경우, 표적의 모호성과 관련되며, PRF에 따라 최대 비모호 거리 및 속도가 결정된다. 표적의 상태가 최대 비모호 거리 및 속도를 넘어설 경우, 표적의 모호성 문제가 발생하며, 이를 해결하기 위해 최적의 PRF 조합이 요구된다. 이러한 PRF 조합은 레이다 운용 목적에 따라 다르며, 이와 관련된 연구는 많이 수행되어왔다. 따라서, 드웰 타임을 조절하기 위해 PRF를 조절하는 것은 모호성 해결에 영향을 미치지 않기 때문에 드웰 타임 설계를 위한 변수로 사용하지 않고, 모호성 해결을 위해 선택된 PRF 조합을 사용함으로써 모호성 문제해결에 영향을 미치지 않게 한다.

##### 4.2 할당 모드에 따라 펄스 개수 정의 및 드웰 타임 설계

먼저, 가변될 드웰 타임의 할당 정도에 따라 총  $N$ 단계의 할당 모드로 구성한다. 여기서, 할당 모드의 단계가 높아질수록 더 많은 펄스 개수를 설정하며, 펄스 개수 설정은 탐지 및 추적 임무 성능에 의해 결정된다.

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < \dots < Q_N \quad (15)$$

여기서  $Q_i, (i=1,2,\dots,N)$ 는 각각의 할당 모드에 미리 설정한 펄스 개수를 나타낸다. 할당 모드에 따라 펄스 개수를 미리 정의하면, 모호성 해결을 위해 선택된 최적의 PRF 조합과 펄스 개수를 이용하여 각 운용 모드의 드웰 타임을 설계할 수 있다. 아래 그림 5는 제안된 기법을 통해 정의된 드웰 타임을 나타내며, 할당 모드의 단계가 높아질수록 펄스 개수가 증가함에 따라 더 많은 드웰 타임이 나타난다. 따라서, 펄스 개수 조절을 통해 표적의 모호성 문제에 영향을 미치지 않으면서 많은 드웰 타임 설계가 가능하며, 이를 이용해 다기능 레이다 자원 할당의 실용성을 향상시킬 수 있다.

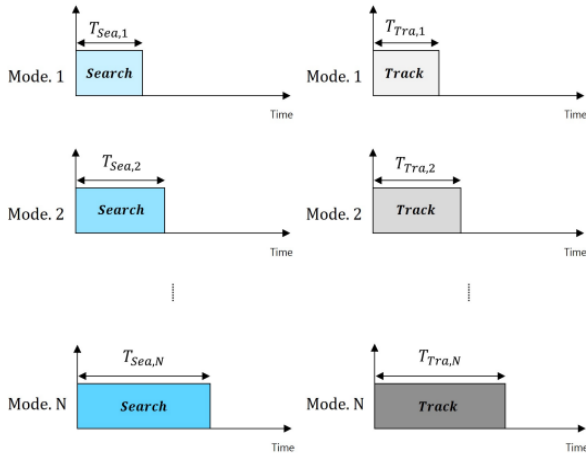


그림 5. 제안된 기법  
Fig. 5. Proposed method

#### 4.2 제안된 기법의 드웰 타임 할당 과정

할당 모드에 따른 드웰 타임이 정의되면 자원 할당 과정은 다음과 같다. 먼저 그림 6과 같이 5개의 탐색 영역과 3대의 표적이 있다고 가정하면 각각의 임무에 드웰 타임을 할당하여야 한다. 드웰 타임 할당의 경우 할당 모드에 따라 변하며 모드 단계가 높을수록 더 많은 드웰 타임을 할당할 수 있다. 그림 6(a)는 각각의 임무에 Mode 1에 해당하는 드웰 타임을 할당한 것이고, 그림 6(b)는 두 번째 탐색

영역과 두 번째 표적이 중요하다고 판단되어 할당 모드를 높여 Mode 2에 해당하는 드웰 타임을 할당함으로써 임무 성능을 높였다. 이와 같이 운용자가  $k$ 번째 할당한 자원 대비 임무 성능을 보고, 특정 탐색 구역 및 추적 표적이 중요하다고 판단할 경우, 할당 모드를 높여 더 많은 드웰 타임을 할당한다.

또한, 할당 가능한 총 자원은 한정적이기 때문에 레이더가 부과할 수 있는 허용량을 초과할 수는 없다. 만약 할당된 총 드웰 타임의 합이 허용량을 초과하면 운용자가 임무 중요도의 우선순위를 결정하고 우선순위에 따라 할당 모드를 조절하여 총 드웰 타임을 조절한다. 예를 들어 그림 7과 같이 총 드웰 타임의 합이 허용량을 초과하는 상황이 발생하면 중요도 우선순위 판단을 통해 2, 4, 5번째 탐색 영역의 드웰 타임을 줄여 총 드웰 타임을 조절한다.

#### V. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 제안된 기법에 대한 시뮬레이션 결과를 도시한다. 탐색 및 추적 임무 할당 모드를 구성하고, 할당 모드에 따라 서로 펄스 개수를 설정한다. 그 후, 시나리오를 설정하여 본 논문에서 제안하는 기법의 성능을 분석한다.

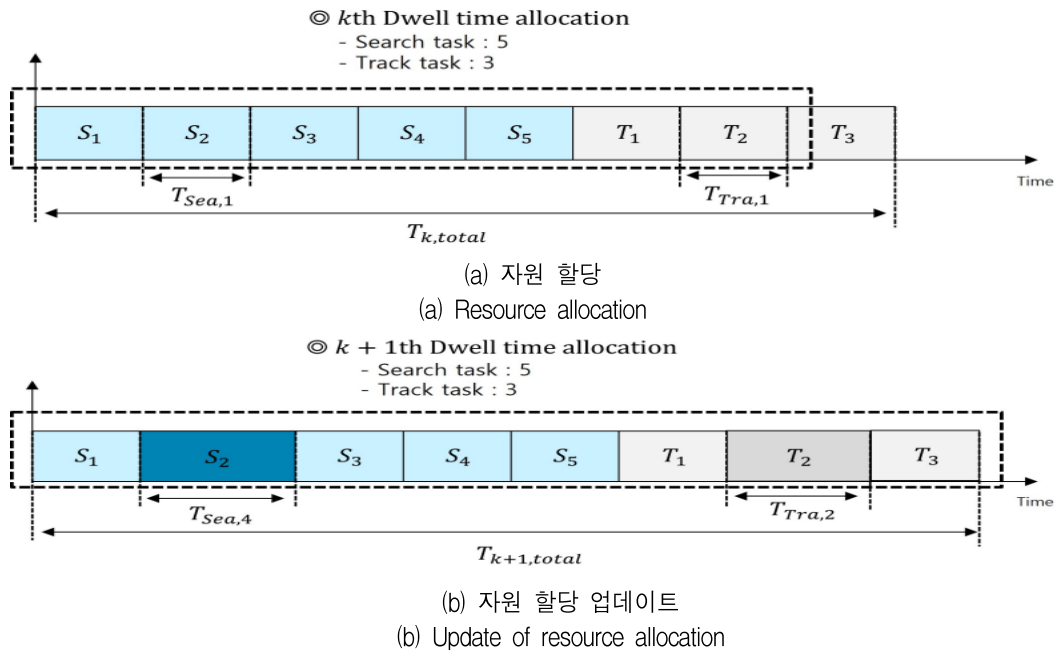


그림 6. 제안된 기법 자원 할당(첫번째 경우)  
Fig. 6. Resource allocation of proposed method(case 1)

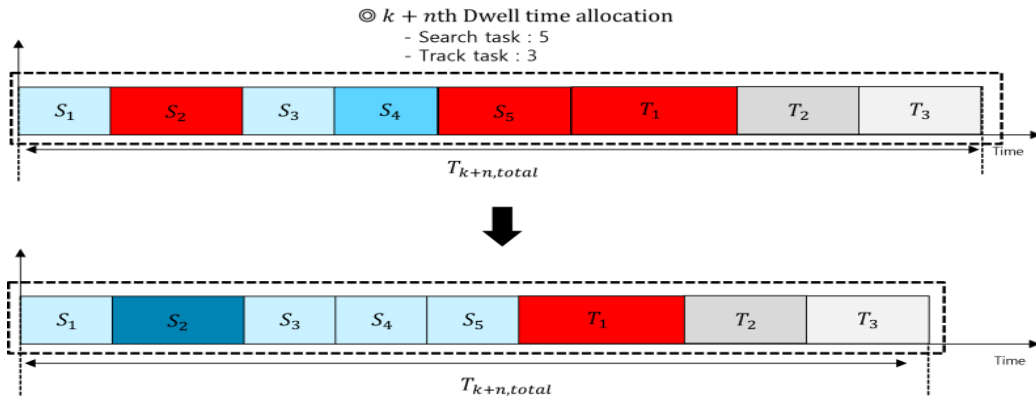


그림 7. 제안된 방법의 자원 할당(두번째 경우)  
Fig. 7. Resource allocation of proposed method(case 2)

### 5.1 시뮬레이션 구성

본 시뮬레이션에서는 탐색 및 추적 할당 모드를 3단계로 구성하였으며, 아래 표 1과 같이 설정하였다. PRF의 경우, 모호성 해결을 위한 PRF 조합이 사용되었다고 가정하였으며 각 할당 모드에 따라 각각 50, 100, 150개의 펄스를 사용하여 드웰 타임을 설계하였다.

표 1. 할당 모드 설정

Table 1. Setting of allocation modes

	Mode	Pulse number	Dwell time
Search	Mode 1	50	0.03s
	Mode 2	100	0.06s
	Mode 3	150	0.09s
Track	Mode 1	50	0.03s
	Mode 2	100	0.06s
	Mode 3	150	0.09s

탐색 구역은 총 6개 구역, 추적 표적은 4대로 설정하였으며 각각의 파라미터는 표 2, 표 3과 같다. 또한 레이다 파라미터는 표 4와 같다.

표 2. 탐색 구역 파라미터

Table 2. Search sector parameters

Sector index	1	2	3	4	5	6
$R_i$ (km)	120	120	120	150	100	105
$\theta_i$ ( $^\circ$ )	8	8	8	8	6	8

표 3. 표적 파라미터

Table 3. Target parameters

Target index	1	2	3	4
Position(km)	(32,77)	(53,15)	(60,70)	(95,60)
Velocity(m/s)	200	250	220	190
Direction	(-1,-1)	(-0.5,-1)	(1,2)	(-2,1)
RCS	2	1.5	1	1

표 4. 레이다 파라미터

Table 4. Radar parameter

$P_{av}$ [W]	10000	$A_e$ [ $m^2$ ]	15
$c$ [m/s]	$3 \times 10^8$	$G_t, G_r$ [W]	400
$\lambda$ [m]	0.05	$T_0$ [Hz]	1
$k_B$	$1.38 \times 10^{-23}$	$T_s$ [K]	290
$L_{loss}$ [W]	100	$B_k$ [MHz]	3
$\beta_k$ [degree]	3		

### 5.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 시나리오는 아래 그림 8과 같다.

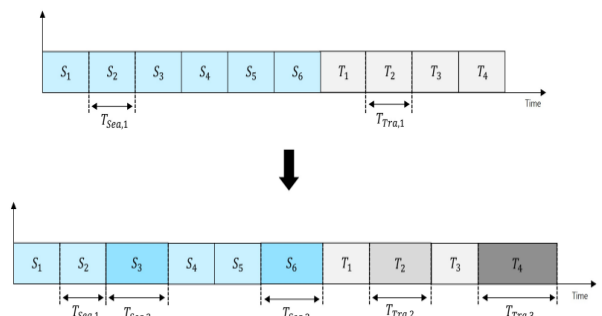
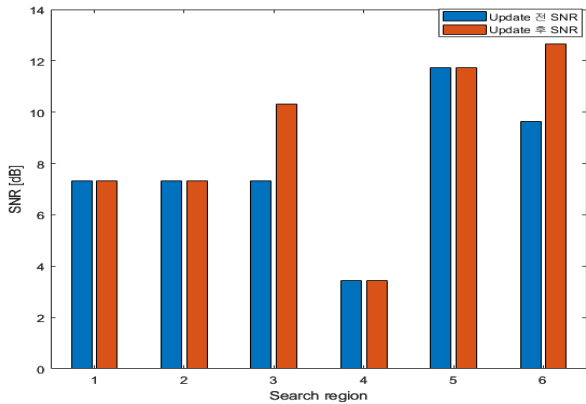


그림 8. 시뮬레이션 시나리오  
Fig. 8. Simulation scenario

우선 각각의 탐색 및 추적 임무에 우선 Mode 1 단계에 해당되는 드웰 타임을 할당하였다. 이후 운용자가 3, 6번 탐색 구역, 2, 4번 추적 표적이 중요하다고 판단하여 운용 모드를 높여 더 많은 드웰 타임을 할당하여 임무 성능을 높였다. 이때 변경된 운용 모드는 다음과 같다.

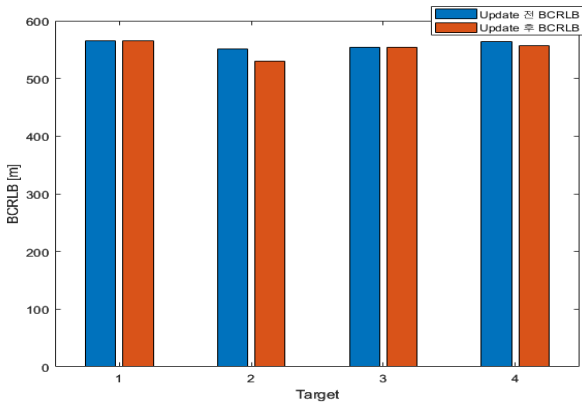
- 탐색 구역 3번 : Mode 2, 탐색 구역 6번 : Mode 2
- 추적 표적 2번 : Mode 2, 추적 표적 4번 : Mode 3

그림 9는 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과이다. 탐색 구역 3, 6번의 경우, 기존 Mode 1에서 Mode 변경을 통해 드웰 타임을 더 많이 할당한 결과 SNR이 증가함을 확인할 수 있다(그림 9(a)). 추적 표적 또한 Mode 변경을 통해 많은 드웰 타임을 할당한 결과 기존 Mode 1에 비해 BCRLB가 줄어들음을 확인할 수 있다(그림 9(b)).



(a) 탐색 임무 자원 할당

(a) Resource allocation for search task



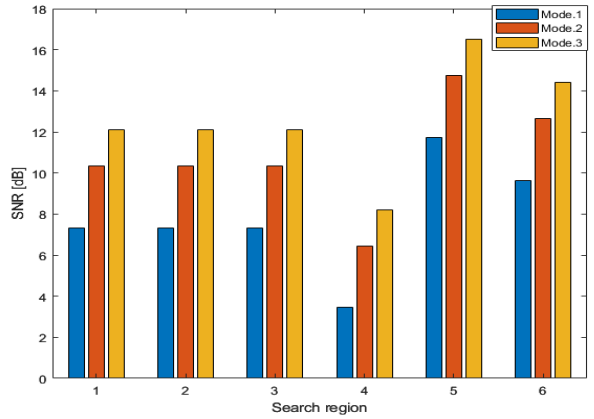
(b) 추적 임무 자원 할당

(b) Resource allocation for track task

그림 9. 시뮬레이션 결과

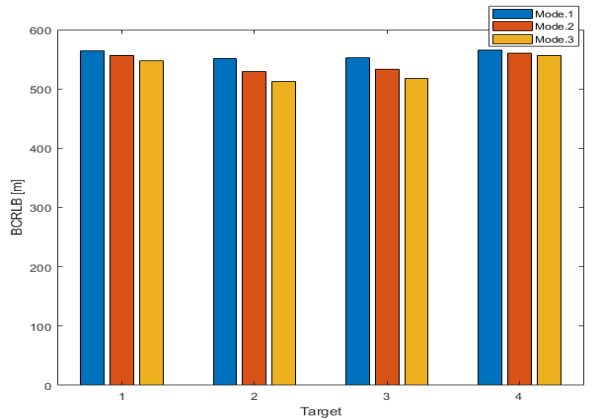
Fig. 9. Simulation result

그림 10은 할당 Mode에 따른 탐색 및 표적의 성능을 나타낸 결과로, Mode가 높아짐에 따라 임무 성능이 좋아짐을 확인할 수 있다.



(a) 탐색 임무

(a) Search task



(b) 추적 임무

(b) Track task

그림 10. 할당 모드에 따른 시뮬레이션 결과

Fig. 10. Simulation result according to allocation mode

## VI. 결론

본 논문에서는 최적화 기반의 드웰 타임 할당의 실무적 어려움을 해결하기 위해, 새로운 드웰 타임 할당 기법을 제안하였다. 최적화 기반의 접근법은 최적의 해를 설계하기 위해 PRF를 조절해야 하는 경우가 발생하며, 이는 레이더 운용에 막대한 영향을 미친다. 이에 본 논문에서는 펄스 개수 조절과 모호성 해결을 위한 PRF 조합을 사용하여 미리 다양한 드웰 타임을 정의함으로써 최적화 기법의 실무적 어려움을 해결하였다.



또한 변화하는 상황에 맞추어 지속적으로 최적화 계산 업데이트 및 드웰 타임 설계가 아닌 상황에 따라 실시간으로 할당 모드를 조절하여 탐색 및 추적 임무 드웰 타임을 빠르게 할당함으로써 자원 관리 실용성을 향상시켰다.

향후 연구에서는 본 자원 할당 기법을 revisit time 조절과 임무 스케줄링에 결합하여 연구할 예정이다, 또한 단일대역이 아닌 이중대역으로 확장하여 자원 할당 연구를 수행할 예정이다.

## References

- [1] S. H. Jin, N. H. Jeong, J. H. Choi, S. H. Lee, C. H. Kim, and K. T. Kim, "Radar Beam Scheduling Using Pareto Optimal Point to Optimize Dual Cost Function", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 30, No. 8, pp. 677-687, Aug. 2019. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.8.677>.
- [2] J. Yan, H. Liu, B. Jiu, and Z. Bao, "Power Allocation Algorithm for Target Tracking in Unmodulated Continuous Wave Radar Network", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 1098-1108, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360039>.
- [3] X. Wang, W. Yi, M. Xie, B. Zhai, and L. Kong, "Time management for target tracking based on the predicted Bayesian Cramer-Rao lower bound in phase array system", 2017 20th International Conference on Information Fusion, Xi'an, China, pp. 1-5, Jul. 2017. <https://doi.org/10.23919/ICIF.2017.8009857>.
- [4] J. Yan, H. Liu, W. Pu, S. Zhou, Z. Liu, and Z. Bao, "Joint beam selection and power allocation for multiple target tracking in netted collocated MIMO radar system", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 64, No. 24, pp. 6417-6427, Dec. 2016. <https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2607147>.
- [5] J. Yan, W. Pu, J. Dai, H. Liu, and Z. Bao, "Resource Allocation for Search and Track Application in Phased Array Radar Based on Pareto Bi-Objective Optimization", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 4, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2894960>.
- [6] D. K. Barton, "Modern Radar System Analysis", Norwood, MA, USA: Artech House, 1988.
- [7] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, and T. Kirubarajan, "Estimation With Applications to Tracking and Navigation", New York, USA: Wiley, 2001.
- [8] H. L. V. Trees, "Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory", New York, USA: Wiley, 2002.
- [9] P. Tichavsky, C. H. Muravchik, and A. Nehorai, "Posterior Cramer-Rao bounds for discrete-time nonlinear filtering", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 46, No. 5, pp. 1386-1396, May 1998. <https://doi.org/10.1109/78.668800>.
- [10] S. B. Roy, A. S. Madhukumar, and J. Joung, "On joint Pareto frontier in multiple access and relay rate regions with Rayleigh fading", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, No. 5, pp. 3777-3786, May 2017. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2598578>.
- [11] J. Yan, H. Liu, B. Jiu, B. Chen, Z. Liu, and Z. Bao, "Simultaneous multibeam resource allocation scheme for multiple target tracking", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 63, No. 12, pp. 3110-3122, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2417504>.
- [12] S. Hong, B. L. Cho, K. Yoon, K. S. Kim, and C. Kim "A study on Selective MTI to Reduce the Error of Velocity Estimation for MPRF Radar System", *Journal of KIIT*, Vol. 20, No. 4, pp. 81-87, Apr. 2022. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.4.81>.
- [13] T. H. Kim, E. H. Kim, and S. W. Lee, "Real-Time PRF Selection for Search/Track in MPRF Waveform Airborne Radar", *Journal of KIEES*, Vol. 25, No. 10, pp. 1050-1061, Oct. 2014. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.10.1050>.

저자소개

차 상 빈 (Sangbin Cha)



2017년 2월 : 부경대학교 전자공학과(공학사)  
2019년 2월 : 부경대학교 전자공학과(공학석사)  
2019년 3월 ~ 2020년 11월 : 포항공과대학교 안보융합기술센터 연구원  
2020년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 전자공학과 박사과정  
2021년 2월 ~ 2022년 8월 : 국민대학교 전자전파기술센터 연구원  
2022년 10월 ~ 현재 : 건국대학교 글로벌캠퍼스 안보·재난안전융합연구소 연구원  
관심분야 : 레이더표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 이중대역 레이더자원관리, 미세도플러 분석/식별

박 상 흥 (Sanghong Park)



2004년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학사)  
2007년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)  
2010년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)  
2010년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 전자공학과 정교수  
관심분야 : 이중대역 레이더자원관리, 미세도플러 분석, 전력단지 EMI/EMC 분석, 레이더표적인식, 레이더영상, 레이더 신호처리

정 주 호 (Joocho Jung)



1995년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)  
1998년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)  
2007년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)  
2018년 11월 ~ 2020년 11월 : 포항공대 안보융합기술센터 센터장  
2020년 11월 ~ 2022년 8월 : 국민대학교 안보융합기술연구소 센터장  
2022년 9월 ~ 현재 : 건국대학교 글로벌캠퍼스 안보·재난안전융합연구소 센터장

관심분야 : 이중대역 레이더자원관리, 미세도플러 분석, 전력단지 EMI/EMC 분석, 레이더표적인식, 레이더영상, 레이더 신호처리

김 우 찬 (Woochan Kim)



2008년 2월 : 한양대학교 전자정보시스템공학과(공학사)  
2011년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과(공학석사)  
2016년 8월 : 한양대학교 전자시스템공학과(공학박사)  
2016년 10월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원  
관심분야 : 표적추적 및 정보융합시스템, 함정전투체계, 자료결합필터, 표적기동분석, 항법필터, 레이더정보처리

최 인 오 (Inoh Choi)



2012년 8월 : 부경대학교 전자정보통신공학과(공학사)  
2014년 8월 : 부경대학교 전자공학과(공학석사)  
2020년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)  
2019년 12월 ~ 2021년 2월:

국방과학연구소 선임연구원  
2021년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전자전기정보공학부 전자통신공학전공 교수  
관심분야 : 이중대역 레이더자원관리, 탄도미사일 방어시스템, 생체신호탐지, 미세도플러 분석/식별, 다중편파 SAR 영상 보정, 레이더표적식별, FMCW 차량 레이더 및 LiDAR