

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(3), 254-262(2014)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.3.254>

## 다기능 레이더의 임무 스케줄링 및 복수 운용 개념 분석

정순조\*, 장대성\*\*, 최한림\*\*\*, 양재훈\*\*\*\*

Task Scheduling and Multiple Operation Analysis of  
Multi-Function Radars

Sun-jo Jeong\*, Dae-Sung Jang\*\*, Han-Lim Choi\*\*\* and Jae-Hoon Yang\*\*\*\*

Defense Agency for Technology and Quality\*

Korea Advanced Institute of Science and Technology\*\*,\*\*\*

Samsung Thales Co.\*\*\*\*

## ABSTRACT

Radar task scheduling deals with the assignment of task to efficiently enhance the radar performance on the limited resource environment. In this paper, total weighted tardiness is adopted as the objective function of task scheduling in operation of multiple multi-function radars. To take into account real-time implementability, heuristic index-based methods are presented and investigated. Numerical simulations for generic search and track scenarios are performed to evaluate the proposed methods, in particular investigating the effectiveness of multi-radar operation concepts.

## 초 록

레이더 임무 스케줄링은 제한된 자원 환경에서 레이더의 성능을 향상시키기 위해 효과적으로 임무 배치를 하는 것이다. 본 논문에서는 다기능 레이더의 복수 운용 시의 스케줄링 성능 평가를 위해 총 지연 시간의 합을 목적함수로 정의하고, 실시간성을 고려한 휴리스틱 접근법을 제시한다. 제안된 스케줄링 기법들을 일반적인 임무 시뮬레이션 환경에서 비교·분석하였으며, 특히, 다기능 레이더의 복수 운용에서의 스케줄링 성능을 분석한다.

**Key Words** : Multiple Radar Resource Management(복수 레이더 자원관리), Multi-function radar(다기능레이더), Task Scheduling(임무 스케줄링), Total weighted tardiness(총지연시간)

## 1. 서 론

레이더는 과거 기계식 레이더에서부터 수동 위상배열 레이더를 거쳐 오늘날의 전자주사식 능동 위상배열 레이더(AESA : Active Electronically

Scanned Array)로 발전되어 왔다. 또한, 하나의 레이더에서 탐색, 추적, 화기 통제 등의 기능 중 단일 기능만을 수행하는 방식에서 현재는 단일 레이더에서 모든 기능을 수행하는 다기능레이더(MFR : Multi Function Radar)도 등장하였다

† Received: October 16, 2013 Accepted: February 24, 2014

\*\*\* Corresponding author, E-mail : hanlimc@kaist.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

[3,14]. 다기능 위상 배열 레이더는 빔의 방향을 전자적으로 빠르게 변경할 수 있어, 다양한 기능을 가지는 다수의 임무들을 신속하고 유동적으로 전환해가며 처리할 수 있다. 레이더가 가지고 있는 시간은 한정되어 있고, 각 임무가 처리되는 시점에 따라 표적의 탐지율과 추적 성능이 결정되므로, 임무들이 수행될 시간과 순서를 효율적으로 결정할 필요가 있다[4]. 이러한 문제를 다기능 레이더의 임무 스케줄링이라 하며, 이를 해결하는 다양한 접근방법들이 제시되었다[1,12,15,17-20].

레이더는 크기, 전력, 발열 및 계산 처리 능력 등에 비교적 제한이 크므로 보다 효율적이고 계산 부담이 적은 알고리즘의 개발이 필요하다. 또한 임무 목록의 시변성에 의한 재 스케줄링 요구 간격에 비해 계산 처리 능력의 제한이 크므로, 매년 최적해를 구하려는 방식은 용이하지 않으며, 휴리스틱(heuristic)을 통해 짧은 시간 안에 적절한 성능의 해를 구하는 것이 효율적이다[4].

스케줄링의 성능을 비교하기 위해서는 적절한 목적함수를 설정하여, 스케줄링에 따른 레이더 운용 성능의 변화를 반영하는 것이 중요하다. 레이더의 탐색, 추적 성능 등을 정확히 평가하려면 자세한 레이더 특성과 신호 처리과정 및 추적 필터에 대한 고려가 필요하다. 단, 이러한 접근 방법은 복잡성에 비해 레이더 성능에 미치는 스케줄링만의 효과를 판별하기가 난해하므로, 임무 스케줄링 수준에서 용이하게 도출할 수 있는 성능 지수가 필요하다[4].

한편, 복수(multiple)의 레이더는 여러 대의 단일 레이더로 구성되어 동일 시간대에 다수 표적에 여러 빔을 방사 할 수 있는 효과적인 레이더 운용 환경의 장점을 가지고 있다. 본 연구는 이를 활용하기 위한 레이더 임무 스케줄링 문제로 다수 표적들을 추적하는 환경에서 적절한 임무 배열을 통해 레이더 성능을 효과적으로 향상 시키는 것을 목적으로 한다. 기존 다기능 레이더 복수 운용에 대한 연구들은 지역단위의 광범위 수준에서의 레이더 운용에 대해 다루어왔다[9,10,16]. 반면, 본 논문에서는 위상 배열레이더 시스템을 구성하는데 필요한 배열요소(T/R 모듈 등)가 일정하게 제한된 경우에 이를 하나의 레이더에 집중하는 것과 여러 대의 레이더로 나누어 구성하는 경우에 필요한 스케줄링에 대해서 논하고자 한다. 이는 동일한 레이더를 복수로 운용하는 것이 아니라, 한정된 레이더 시스템 구성 자원으로 단일 레이더의 성능을 복수의 레이더로 분할한 경우의 시스템 성능을 알아보기 위한 것이다.

본 논문에서는 레이더 운용 성능을 반영한 스케줄링 성능평가 목적함수로 총 지연 시간의 합(TWT : total weighted tardiness)을 정의하였고, 임무 처리한계시점(due time)에 따른 임무 환경의 일반적인 상황들을 시뮬레이션으로 구현하여 스케줄링 기법들을 비교·분석하였다. 또한, 복수의 다기능 레이더 시스템에 대한 임무 스케줄링 성능을 비교·분석하기 위한 레이더의 표적 탐지, 측정치 생성 모델을 포함한 레이더 시뮬레이션을 설명하고, 동적(dynamic) 환경에서 스케줄링 기법들을 시뮬레이션 하여 효율적인 기법들을 확인하였다.

## II. 본 론

### 2.1 다기능 레이더 임무 스케줄링

#### 2.1.1 능동위상배열방식 레이더(AESA) 및 기능

능동 전자주사식 위상배열 레이더(AESA)는 레이더의 안테나에 송수신이 가능한 통합 모듈로 안테나의 요소를 구성하고 있으며, 기계식 재래 레이더와 다르게 목표물이 탐지 되었을 때, 신속하게 전기적인 신호를 이용하여 빔의 방향이나 세기를 제어 할 수 있어 고속 기동 물체 추적에 효과적인 성능을 보인다. 이러한 특성으로 주로 항공기 레이더에서 채택되고 있으며[13], 최근 방공 레이더에서도 AESA 방식이 적용되고 있다 [13,22].

다기능 레이더 기능으로는 탐색(search), 플롯 확인(confirmation), 추적 초기화(track initiation), 추적(track), 추적관리(track maintenance)로 나눌 수 있다. 각 기능들은 [3]의 연구의 레이더 기능과 동일하게 정의하였다. 탐색 기능은 레이더 운용에서 미리 정해진 영역과 frame time에서 미지의 목표물을 탐색하는 기능이며, 플롯확인 은 탐색된 표적에 다시 빔을 주사하여 false alarm 여부를 확인하는 단계이다. 추적 초기화는 플롯 확인 단계 이후의 표적을 짧은 주기로 추적하기 위해 추적 필터에 충분한 데이터를 확보하는 기능이다. 추적은 표적의 정보를 지속적으로 얻는 과정이며, 주기는 미리 정해진 값 또는 표적의 추적 상황에 따른 우선순위, SNR, 오차 공분산 등에 따라 결정된다. 추적관리는 탐지된 표적의 탐지 실패 시 예상 위치 주변에 복수의 빔을 주사하여 추적 표적을 획득하려는 기능이다[3].

#### 2.1.2 다기능 레이더 임무 스케줄링

단일 다기능 레이더 운용에서 임무 스케줄링은 레이더가 처리하는 여러 가지 임무들을 레이

더의 전술적인 이득을 최대화 하도록 하나의 시간 축 상에 임무를 배치하는 것이다. 본 연구에서는 복수 레이다에서의 임무 스케줄링을 다루고 있으므로 동일 시간대에 복수의 임무 수행이 가능함을 고려해야 한다. 이는 임무 스케줄링단위에서 임무 배열뿐 아니라, 각 임무를 수행할 레이다 선택에 따른 스케줄링 복잡도(complexity) 증가를 의미한다.

임무 스케줄링에서 할당된 각 임무들은 처리 시간(processing time, dwell time), 우선순위(weighting), 처리한계시점을 가지게 된다. 레이다의 할당된 임무들은 표적 상황에 따라 수행되는 주기와 시간이 변할 수 있으며, 급하게 처리를 원하거나 여유를 가지는 임무들의 중요도에 따라 이들의 처리한계시점 역시 상이하게 된다. 이러한 임무들의 스케줄링 목적은 임무들을 가능한 요청된 시간 안에 처리 하여야 하며, 레이다의 유희시간을 최소화한 효과적인 운영이어야 한다.

복수의 다기능 레이다 시스템은 동시에 여러 대의 레이다로 탐색과 추적 기능을 수행 할 수 있다. 또한, 하나의 레이다에서 방사된 하나의 빔은 동시에 하나의 임무만을 수행하며, 하나의 임무는 빔의 dwell time 동안 방해 없이 완전히 수행되어야 하며, 일시 정지 하였다가 이후에 이어서 수행 할 수 없다(non-preemptive).

### 2.1.3 임무 스케줄링 목적 함수

임무 스케줄링 목적함수로는 레이다 운용 성능 변화가 반영되고 스케줄링 성능을 비교 할 수 있는 함수로 설정하여야 한다. 레이다의 성능을 평가하기 위해서는 레이다의 신호 처리과정과 필터 등에 대한 자세한 특성을 고려하여야 한다. 이러한 변수들은 유기적인 관계로 복잡·다양해지며, 이를 고려한 목적함수는 비선형성을 가져 레이다 성능에 미치는 스케줄링만의 효과를 판별하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 임무 스케줄링 성능을 용이하게 평가하기 위해 레이다 성능을 반영한 스케줄링 목적함수를 정의하였다[4].

레이더 임무 스케줄러 임무처리에서 추적 임무의 늦어지는 정도가 커지면 표적의 위치에 대한 불확실성이 증가하고, 이에 따른 SNR(signal to noise ratio)의 크기가 감소한다. SNR 크기 감소는 탐지확률 감소와 탐지시의 측정치의 정확도 감소로 종합적인 추적 성능이 감소된다. 따라서 한 임무에 대한 스케줄러의 처리지연, 즉 늦어지는 정도에 따라 추적 임무 성능 변화가 결정된다. 본 연구에서는 임무 스케줄링에서 추적 성능 감소를 고려한 스케줄링 목적함수를 임무 처리

지연 정도에 따라 증가하도록 하고, 이를 최소화하는 목적으로 설정하였다. 각 임무의 완료되기를 원하는 처리한계시점을 마감시간으로 두고 이에 대한 지연 정도를 식 (1)과 같이 tardiness로 표현한다.

$$T_i = \max \{ 0, C_i - d_i \} \quad (1)$$

레이더의 할당된 임무들은 제각기 다른 처리 시간과 마감 시간을 가지고 있으며, 그 기능과 관련 표적의 중요도에 따라 각기 다른 우선순위(priority)를 가지고 있다[4]. 스케줄러의 성능을 평가하기 위해, 각 임무들의 처리 지연 정도를 나타내는 tardiness에 임무의 우선순위를 가중치로 곱한 weighted tardiness의 총합 TWT를 최소화하려는 목적 함수로 정의하였으며[4], 다음과 같이 표현할 수 있다.

Minimize

$$\sum_{i=1}^n w_i T_i \quad (2)$$

위 식 (1), (2)에서, 레이다가 처리해야 하는 임무의 개수  $n$  이 주어졌을 때,  $i$  번째 수행하는 임무의 마감시간을  $d_i$ , 우선순위를  $w_i$ 로 정의하며,  $C_i$ 는  $i$  번째 임무가 완료된 시간을 나타낸다.

## 2.2 휴리스틱 Dispatching 스케줄링 기법

### 2.2.1 스케줄링 복잡도

결정론적인(deterministic) 스케줄링 모델의 연구는 오랜 기간 많은 연구가 진행되어 왔으며, 다항시간(polynomial time)안에 효과적인 해를 찾을 수 있는 알고리즘을 찾기도 하였다[2]. 하지만 다항 시간 안의 효과적인 해를 찾을 수 있는 문제는 많은 제한 조건과 제한적인 환경에 해당하는 경우이며 대부분의 스케줄링 문제는 다항 시간 알고리즘(polynomial time algorithm)이 존재하지 않는다고 알려져 있다[2].

본 연구에서 목적함수로 설정한 total weighted tardiness 문제( $\sum w_j T_j$ )는 APX-hard임이 알려져 있으며[21], 이 문제를 풀기 위한 다양한 방법들이 제안되었으나[2,5,8], NP-hard인 문제의 최적해를 실시간으로 구하기 용이하지 않으며, 유용한 approximation algorithm 역시 존재하지 않는다고 알려져 있다[2,4]. 이는 실시간성을 고려한 레이다 시스템 스케줄링 문제에서 계산 처리 능력의 한계로, 실시간으로 최적해를 구하는 것은 용이 하지 않음을 의미한다. 따라서 본 연구

에서는 레이더 임무 스케줄링의 실시간 환경을 고려하여 짧은 시간 안에 적절한 성능의 해를 구하는데 효율적인 휴리스틱 기법을 통하여 스케줄링 문제에 접근하였다.

**2.2.2 Dispatching heuristic rules**

스케줄링 문제에 접근하는 휴리스틱 기법 중 레이더 임무 스케줄링과 같이 짧은 시간 안에 수많은 작업들을 처리 하는 문제에는 dispatching rule이 유리하다[2]. 일반적으로 알려진 total weighted tardiness 문제의 dispatching 휴리스틱 기법들로는 WEDD(Weighted Earliest Due Date), MS(Minimum Slack first), WSPT(Weighted Shortest Processing Time first)들이 있다. WEDD기법은 작업들의 처리한계시점을 기준으로 가장 짧은 시간을 가진 작업을 먼저 처리하는 스케줄링 기법이며, MS기법은 여유시간(slack time)을 식 (3) 과 같이 정의 하여 작업들의 여유시간이 가장 작은 작업부터 처리하는 기법이다[2,4].

$$S_i = \max\{0, D_i - P_i - t\} \text{ with } t = \sum_1^{i-1} P_{i-1} \quad (3)$$

WSPT기법은 작업들의 처리시간들에 따라 배열하는 방식으로 가장 작은 처리시간을 가진 작업부터 처리하는 기법이다[2].

이러한 기본적인 기법들을 기반으로 동일한 복수 처리장치(Identical parallel machine)에 적용한 기법으로는, 일정 ratio[5]를 기준으로 오름차순으로 작업을 처리하는 MRM(Motatg'e's ratio method)기법[5], Traffic Congestion Ratio[6]이라는 우선 순위를 사용하는 TPI(Traffic Priority Index)기법, neighbor search방법을 기반으로 EDD와 SPT기법을 이용한 WI(Wilkerson-Irwin)기법[5,7,8]들이 알려져 있다. 또한, WSPT와 MS 기법을 결합한 방법으로 식(4)에 표현된 인덱스(index) 함수

$$I_i(t) = \frac{w_i}{p_i} \exp\left(-\frac{\max(d_i - p_i - t, 0)}{K \bar{p}}\right) \quad (4)$$

를 사용한 ATC(Apparent Tardiness Cost ruels)[9,10]기법과 처리한계시점보다 늦어지는 작업과 늦지 않은 작업들로 분류하여 WEDD와 WSPT를 결합하여 사용하는 WMDD(Weighted Modified Due Date) 기법이 있으며 식(6)과 같이 표현할 수 있다[11].

$$\min [\max(d_i - t, p_i)/w_i] \quad (5)$$

**Table 1. Random variable for parameters**

Parameters	Uniform distribution
Processing time	Mean : 1 Domain : (0, 2]
Due time	$(0, \frac{N_t}{N_m} \cdot A]$ $A \in \{0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.25, 1.5\}$ $N_t$ : the number of tasks $N_m$ : the number of machine
Weighting value	(0, 1]

**2.3 휴리스틱 기법 시뮬레이션**

**2.3.1 시뮬레이션 환경**

휴리스틱 기법들의 임무환경에 따른 성능평가 지표인 TWT양상을 관찰하기 위해 레이더 임무 스케줄링에서 발생할 수 있는 일반적인 임무상황들을 임무 지연정도로 표현하고, MATLAB을 이용하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 레이더 임무 스케줄링 문제에서의 변수는 각 임무들의 처리시간, 마감 시간, 임무 우선순위에 따른 가중치로 나타낼 수 있다[4]. 본 연구의 시뮬레이션에서는 보통 레이더 시간 단위로 사용하는 ms 단위를 스케줄링의 비교·분석의 편리성을 위해 한 임무에 대한 처리시간 평균을 1로 고정하고, 이를 기준 지표로 하여 시간단위를 정규화(normalization)하였다. 시간 변수들은 랜덤 변수로 표현하였으며, 각 변수들의 표본은 균일분포를 따른다. 각 변수들에 대한 표본의 정의는 Table 1 에 나타내었으며, 처리한계시점의 최대값( $N_t/N_m$ =임무의 수/ 처리장치의 수)은 스케줄링의 처리장치(machine)수 증가효과를 고려하여 전체 임무의 여유로운 정도가 동일하도록 환경을 정의하고, 전체 임무에서의 늦어지는 정도를 백분율(A)로 표현하였다. 4개의 처리장치(machine) 운용에서 임무 처리 시 가장 빠른 시간 안에 이용 가능한 장치를 선택하는 방식으로 시뮬레이션을 시행하였다.

**2.3.2 시뮬레이션 결과**

시뮬레이션 결과는 Fig. 1, 2, 3 에 나타내었으며, X축은 처리한계시점 랜덤변수 표본의 최대값으로 스케줄링 환경에서 전체 임무의 늦어진 정도를 표현하며, 100% 이하는 처리한계시점의 분포와 처리시간 분포의 평균 보다 작아 전체적인 임무환경이 늦어진 경우를 의미한다.

Figure 1 Y축은 스케줄링 시뮬레이션들이 모

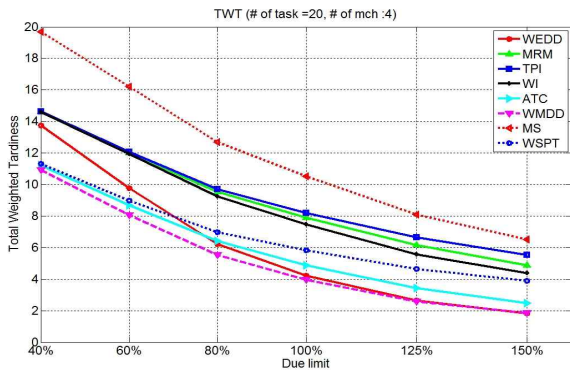


Fig. 1. Heuristic rules total weighted tardiness

든 임무를 마쳤을 때 TWT의 평균을 나타낸다. 처리 장치는 1,2,4개로 변화하였으며, 세 경우의 TWT결과가 비슷한 양상을 보여 4개인 경우를 대표로 나타내었다. X축의 왼쪽으로 갈수록 임무 처리시간에 비해서 처리한계시점이 좁게 분포되어 늦어지는 정도와 작업의 수가 커지는 상황으로 TWT가 높게 나타나는 현상을 보인다. 임무환경에 따른 각 기법들의 성능 차이를 비교해 볼 때, 대부분의 경우에서 WMDD, ATC가 우세한 경향을 보이며 처리한계시점이 80%이상의 여유로운 경우는 WEDD도 적절한 성능 지표를 가짐을 확인 할 수 있다. WMDD는 모든 상황에서 TWT를 최소화하고, ATC는 여유로운 상황보다 늦어지는 임무들이 많은 상황에서 효과적인 결과를 확인 할 수 있다.

Figure 2, 3 에서는 성능지표인 TWT면에서 적절한 결과를 보여준 WMDD, ATC, WEDD와 가장 비효율적인 기법인 MS를 비교하였다. 비교 방법으로는 기법들 중 가장 효과적인 기법에 대한 각 기법들의 늦어지는 비율로 효율성을 비교하였다. Fig. 2 에서는 처리 장치가 1개인 경우로, TWT면에서 가장 효과적인 기법인 WMDD와 비교하였을 때 ATC는 약 20%안의 비슷한 효율

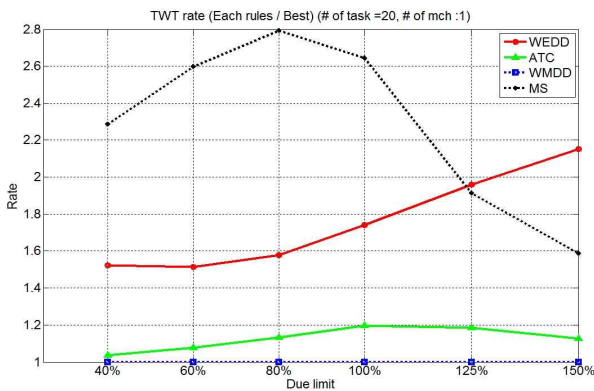


Fig. 2. Total weighted tardiness rate (mch : 1)

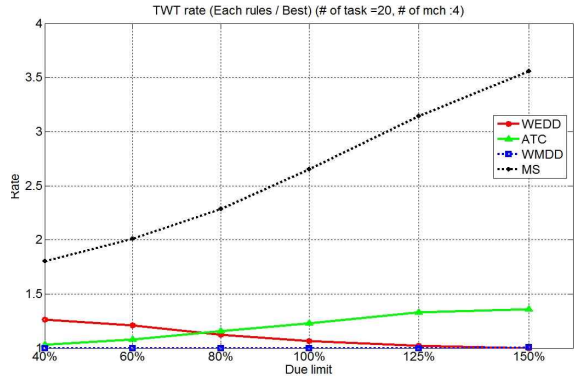


Fig. 3. Total weighted tardiness rate (mch : 4)

을 보임을 확인 할 수 있다. MS와 비교 시 임무 스케줄링 문제에서 비효율적인 기법을 선택 시 임무의 늦어지는 정도가 약 280%차이를 보임을 확인 할 수 있다. Fig 3은 4개의 처리 장치 환경에서의 결과로 동일하게 WMDD가 가장 효율적인 기법이며 다른 기법과는 약 40%안의 비슷한 성능을 보인다. 또한, 임무 처리한계시점이 여유로운 환경에서 비효율적인 기법과의 효율성 비교는 약 350%이상 차이를 보이며, 이는 복수의 처리 장치(레이더)를 사용 시 적절한 스케줄링 기법 선택이 중요함을 강조하는 결과이다.

레이더 환경에서의 스케줄링 변수들은 실시간으로 변하는 시나리오와 기능에 따라 다양하게 표현이 가능하며, 위의 스케줄링 결과의 한 부분을 나타낼 것이다. 따라서 레이더 환경에서의 스케줄링 적용은 변수들의 특성을 고려하여 각 기법들을 적절하게 사용하여야하며, 레이더 모드에서의 시뮬레이션과 분석이 필요하다.

### 2.4 다기능 레이더 시뮬레이션

이 절에서는 단수 및 복수의 다기능 레이더 시스템에 대한 임무 스케줄링 성능을 비교·분석하기 위한 레이더 시뮬레이션에 대해 설명한다. 시뮬레이션에는 레이더의 표적 탐지와 측정치 생성 모델을 포함하고 있으며, 탐지에서 추적까지의 레이더 임무를 구현하였다. 시나리오 생성을 위해 표적을 생성하고, 추적 필터를 통해 표적의 상태를 추정하였다.

#### 2.4.1 시뮬레이션 정의

본 연구에서 사용하는 복수의 다기능 레이더 시스템 임무 스케줄링 시뮬레이터의 구조를 아래 Fig. 4에 순환도로 나타내었다. 시뮬레이션이 시작되면, 미리 설정된 시뮬레이션 파라미터들이 입력된다. 시뮬레이션 파라미터는 표적의 궤적 정보, 동시 운용 빔의 개수, 레이더 기능별 기준 SNR(Signal to Noise Ratio)과 해당 거리, false

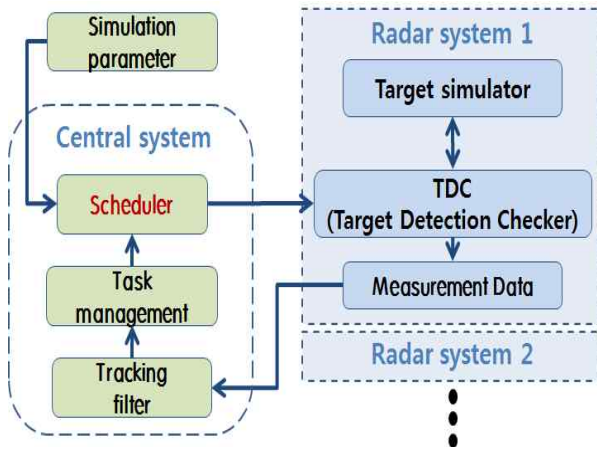


Fig. 4. Radar simulation structure

alarm probability, dwell time, 빔 폭, 거리 분해능, PRF를 포함한다. 파라미터가 입력되면 레이더의 운용을 위해 탐색 빔들로 이루어진 임무 집합이 생성된다. 레이더 좌표계의 방향 코사인인 UV 평면에서 사각형으로 이루어진 영역 안에 빔 간격이 빔 폭의 0.7배인 삼각형 빔 배열이 생성되고, 각 빔 방향마다 한 개의 탐색임무가 생성된다. 복수 레이더 시스템구성은 하나의 레이더 단위에서 레이더 데이터 처리기능을 수행하며 데이터를 이용한 임무 처리는 중앙시스템(central system)에서 처리를 한다. 하나의 레이더에서 하나의 임무가 실행되고 있는 상황에서는, 해당 레이더를 제외한 다른 레이더는 수행하고 있던 임무를 마치고 새로운 임무를 수행할 수 있도록 준비된다. 레이더 시스템에서 하나의 임무가 실행되면 빔의 위치와 빔 파라미터 및 표적의 위치에 따라 신호강도와 탐지확률을 계산하고 난수를 생성하여 탐지 여부를 결정한다. 표적이 탐지되면 측정치를 생성하고 이 정보를 추적 필터에 입력한다. Task management에서는 임무의 성공여부와 정해진 레이더 기능 전환 규칙에 따라 현재 임무를 삭제하거나 갱신하고 필요한 다음 임무를 생성하게 된다. 이렇게 변경된 임무 집합은 다시 다중 빔 스케줄러에 반영되고, 다음 실행하게 될 빔과 임무를 선택하게 된다.

2.4.2 표적 탐지 및 표적 생성

레이더에서 표적 탐지 모델은 표적과의 거리, 레이더 이득 및 손실 요소 등을 포함하여 평균 SNR를 계산하고, 표적 RCS(Radar Cross Section) 혹은 반송 신호 강도의 통계적 특성에 따라 표적 탐지 확률을 구하는 것을 포함한다. SNR은 element pattern과 array factor 및 빔 폭의 변화를 고려하여 아래의 식으로 나타낼 수 있

다[3,12,13].

$$SNR \equiv S_0 \sigma \frac{R_0^4}{R^4} \left( \frac{\theta_{0,bw}}{\theta_{bw}} \right)^4 (\cos^{1+\alpha} \psi)^2 e^{-8 \ln 2 (\Delta \phi_{uv} / \theta_{bw})^2} \quad (6)$$

여기서  $\theta_{0,bw}$ 는 송수신 이득을 결정하는 기준 빔 폭이며,  $\theta_{bw}$ 는 UV평면에서의 빔 폭,  $S_0$ 는 기준거리  $R_0$ 에서  $\psi=0, \Delta \phi_{uv}=0$ 일 때의 SNR이다.  $\sigma$ 는 표적의 평균 RCS이다. 레이더로부터 얻어지는 표적의 측정치는 레이더 좌표계의 방향 코사인인  $U, V$ 와 표적과의 거리  $R$  및 거리 방향의 속도  $\dot{R}$ 이다.  $\alpha$ 는 scan 각도에 따른 손실계수,  $\psi$ 는 빔 scan각도,  $\Delta \phi_{uv}$ 는 표적과 빔 중심간의 각도상의 이격이며, 측정의 잡음은 additive white gaussian noise로 하였다. 각각의 잡음 분산은 다음과 같이 설정하였다.

(noise variance of  $U, V$ )

$$\sigma_{U,V} \approx \frac{\theta_{bw}}{k_M \sqrt{2SNR}}$$

(noise variance of  $R$ )

$$\sigma_R \approx \frac{\Delta R}{\sqrt{2SNR}} \quad (7)$$

(noise variance of  $\dot{R}$ )

$$\sigma_{\dot{R}} \approx \frac{\lambda f_{PRF}}{2 \sqrt{2SNR}}$$

여기서  $k_M$ 은 monopulse pattern difference slope,  $\Delta R$ 은 거리 분해능,  $\lambda$ 는 레이더 주파수,  $f_{PRF}$ 는 look의 PRF(Pulse Repetition Frequency)이다.

임무 스케줄링 성능 비교·분석에 사용되는 시나리오 생성을 위해 표적의 궤적을 다음과 같이 생성하였다. 표적은 항공기로 가정하고 거리에 따른 임무 환경을 고려하여, 기본적으로 생성될 당시의 초기 속도로 레이더 주위 일정 거리를 이동하도록 하였다. 레이더는 지상에 고정된 것으로 가정한다. 좌표계는 레이더의 위치를 원점으로 하는 관성좌표계에서 지표면 전방을 x축, x축에 대해 왼쪽으로 90°회전한 축을 y축, 지표 수직 아래를 향하는 축을 z축으로 정하였다. 표적의 초기 위치, 속도 및 RCS는 Table 2에 주어진 범위에서 uniform distribution을 가지는 난수에 의해 생성되며, 수평 속도는 크기를 생성한 이후 360° 전방위에서 추가적인 난수를 통해 방향을 결정한다. 수직 속도(z축)는 별도로 생성한다.

Table 2. Target parameters

초기 위치 범위	X	30~100km
	Y	$\theta = \pm 30^\circ$
	Z	2~20km
초기수평속도 범위		150~650m/s
초기수직속도 범위		-30~50m/s
RCS 범위		0.5~1.5m <sup>2</sup>

표적의 상태 추정을 위한 필터로는 직교좌표계에서 거리, 거리 방향의 속도를 측정치로 확장형 칼만 필터(EKF:Extended Kalman Filter)를 사용하였다.

#### 2.4.3 복수 레이더 시스템 환경 정의

본 연구에서는 여러 대의 위상배열 레이더로 구성된 시스템과 단일 위상배열 레이더 시스템의 운용에 있어, 주어진 배열 요소 혹은 T/R 모듈 자원이 동일하다는 가정을 하였다. 따라서 단일 레이더로 구성된 시스템을 기준으로, 운용하는 레이더의 개수가 증가할수록 각 레이더에 분할할 수 있는 배열 요소의 개수는 감소하고, 동일한 안테나 배열 방식을 사용할 때 안테나 개구부의 크기 역시 감소하게 된다. 이 때, 레이더별 안테나 크기 감소에 의한 빔 폭 증가를 반영하여, 단위 면적당의 SNR을 감소시켜서 운용 할 수도 있고, 단위 면적당 SNR을 유지하기 위하여 dwell time을 증가시킬 수도 있다. 본 연구에서는 SNR을 고정시키고 dwell time을 변화 시킨 운용 방식으로 시뮬레이션 환경을 선정하였다(Table 3).

예를 들어 1개의 레이더에 사용할 수 있는 배열 요소를 나누어 2개의 레이더를 구성하면, 각 레이더의 개구부 면적은 1/2로 감소하고 형성되는 빔의 폭은 2배로 증가한다. 이는 송수신 빔의 총 이득을 1/4로 감소시키므로 같은 거리에 있는 동일 표적에 대해 단일 레이더와 같은 SNR를 가지기 위해서 4배의 dwell time이 필요하게 된다(Table 3). 마찬가지로 4대의 레이더를 사용하는 경우 각 레이더의 개구부 면적은 1/4, 송수신 이득은 1/16로 감소하여서 동일 수준의 SNR을 위해서는 단일 레이더에 비해 16배의 dwell time이 필요하다.

Table 3. Radar simulation parameters

# of radar	1	2	4
SNR	$S_0$	$S_0$	$S_0$
Dwell time	$T_0$	$T_0 \times 4$	$T_0 \times 16$

#### 2.4.4 시뮬레이션 결과

표적 탐지환경에서 관측치, 표적 탐지 확률은 난수로 표현되며 이는 동일 표적 시나리오에서의 결과치 변화에 영향을 준다. 따라서 위에 기술한 시뮬레이션 환경을 바탕으로 동일 표적 시나리오에 대해 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하고, 스케줄링 기법들 결과를 비교·분석하였다. 임무 환경에 따른 스케줄링 기법들을 비교하기 위해 표적의 개수를 10, 30, 50개로 변화를 주어 동일 시간동안 레이더가 처리하는 임무의 밀도에 변화를 주었다. 각 표적의 개수를 고정시키고 레이더로부터의 거리를 30, 50, 70, 100km로 설정하여 임무 밀도와 표적의 거리에 따른 임무 환경에서의 스케줄링 기법을 비교해보았다. 위의 조건들로 단일 레이더(1개)를 운용할 때와 복수의 레이더(4개)를 운용할 때에 대한 레이더 임무의 늦어지는 정도를 판단하기 위해 TWT를 결과로 나타내었다.

Table 4, 5는 시뮬레이션의 결과로 거리와 표적의 개수에 따른 각 기법들에 대한 TWT를 표현한 것이다. 시뮬레이션에서 시간 단위는 수ms 단위로 구성하였으며, 결과는 소수점 3자리까지 표현했다. 기법들로는 일반적으로 레이더 스케줄링 기법으로 활용되는 WEDD와 2.3절의 결과에서 가장 효율적인 ATC와 WMDD만 비교 하여 효과적인 레이더 스케줄링 기법을 확인하고자 하였다. Table. 4는 단일 레이더를 운용하였을 때 레이더의 표적 추적에서 임무의 늦어지는 정도(TWT)를 표현한 것으로 전체적인 경향성에서는 ATC와 WMDD가 기본적인 기법인 WEDD보다 임무의 지연정도가 작음을 확인 할 수 있다. 같은 거리에서 표적 수 증가하거나, 같은 표적 수에서 거리가 짧아지는 경우 TWT는 증가함을 확인할 수 있다. 이는 표적의 거리가 짧아질수록 레이더에서 처리하는 임무의 빈도가 높아지고 표적의 개수가 늘어남에 따라 짧은 시간 안에 처리해야 하는 임무 개수가 증가하기 때문이다. 또한, 표적의 거리가 멀리 있는 경우 3가지 기법이 비슷한 경향을 보이지만 거리가 가까울수록 스케줄링 기법 차이에 의한 효과가 커짐을 확인할 수 있다. 30km 거리의 시뮬레이션 결과에서 표적이 10개 인 환경에서는 WEDD기법 사용보다 ATC, WMDD를 사용 시 약 46%이상의 TWT를 줄이는 효과를 확인할 수 있으며, 50개일 때는 78% 이상의 효과를 확인할 수 있다. 임무처리의 밀도가 높아질수록 적절한 스케줄러를 사용하여 임무의 적절한 배치로 처리한계 시점 안에 임무들 처리해야 하는 중요성을 나타낸다.

Table 4. TWT result (# of radar = 1)

# of Target		10	30	50
Range	Rule			
30km	WEDD	9.762	27.336	46.431
	ATC	5.255	8.171	9.814
	WMDD	5.204	8.304	9.946
50km	WEDD	10.277	30.904	51.490
	ATC	7.328	10.951	12.355
	WMDD	7.247	11.063	12.548
70km	WEDD	12.287	36.406	58.790
	ATC	9.040	13.740	15.428
	WMDD	9.142	13.849	15.330
100km	WEDD	2.910	7.995	13.731
	ATC	2.738	7.477	11.814
	WMDD	2.767	7.498	11.665

Table 5. TWT result (# of radar = 4)

# of Target		10	30	50
Range	Rule			
30km	WEDD	40.445	132.661	227.202
	ATC	29.966	39.040	37.935
	WMDD	30.343	38.563	38.274
50km	WEDD	43.198	136.657	231.841
	ATC	33.650	40.119	41.042
	WMDD	32.925	40.335	40.312
70km	WEDD	49.454	142.282	232.334
	ATC	41.431	45.794	40.583
	WMDD	42.052	45.858	40.632
100km	WEDD	14.067	30.919	45.335
	ATC	15.431	33.558	48.006
	WMDD	15.091	34.214	48.917

Table 5는 4개의 레이더를 운용하였을 때 추적 임무의 늦어지는 정도를 스케줄링 기법에 따라 결과로 나타낸 것이다. Table 4와 동일한 경향성을 보이며 늦어지는 정도를 나타내는 TWT 수치가 단일레이더보다 높음을 확인 할 수 있다. 이는 Table 3에 표현된 시뮬레이션 파라미터 정의에 따른 결과로, 4개의 레이더를 사용할 경우 한 대의 레이더를 운용할 때와 동일한 수준의 SNR을 얻기 위해서 dwell time을 16배 증가시키는 보수적인 가정을 하여, 이를 함수로 하는 TWT에 dwell time 증가가 반영되었기 때문이다.

### III. 결 론

본 논문은 복수의 다기능 레이더의 임무 스케줄링을 위한 목적함수로 TWT를 정의하고, 시뮬레이션을 통해 스케줄링 기법들을 비교·분석하였다. 스케줄러의 실시간성을 고려하여 휴리스틱 기법들로 레이더 임무 스케줄링에 접근하였다. 복수 병렬처리장치 스케줄링의 일반적인 임무환경을 모사한 시뮬레이션을 통해 휴리스틱 기법들을 비교·분석하였다. 또한, 다기능 레이더 임무 스케줄링을 비교·분석하기 위한 시뮬레이션에는 표적 탐지와 측정치 생성 모델을 포함하고, 탐지에서 추적까지의 레이더 임무를 구현하였다. 또한, 단일 레이더의 성능을 기준으로 복수의 레이더 운용에 대한 파라미터들을 설정하였다. 이는 레이더 운용의 경제성을 고려하여 단일 레이더의 성능을 복수의 레이더로 분할하여 동일 시간대에 여러 개의 빔을 사용할 수 있도록 정의한 것이다. 레이더의 표적들은 항공기로 정의하고, 거리와 항공기 표적 수에 대한 스케줄링의 성능을 비교하였다. 레이더 시뮬레이션 결과로는 WEDD와 효율적인 성능을 보인 ATC, WMDD를 성능평가 지표(TWT)를 기준으로 비교하였다. 시뮬레이션의 결과를 통해 단일·복수 레이더 운용방식에서 임무 처리밀도에 관계없이 우수한 성능을 보인 스케줄링 기법을 확인 할 수 있다.

본 논문을 통해 단일 레이더와 복수 레이더에서의 임무 스케줄링 시뮬레이션 환경이 구축 되었으며, 복수 레이더 운용에서의 다양한 연구 결과를 도출 할 수 있을 것이라 기대한다.

### 후 기

본 연구는 삼성 탈레스와 한국연구재단의 연구 지원을 받아 수행되었습니다. (과제 번호: 삼성 탈레스 STC-C-12-010, 한국연구재단 NRF-2013008693)

### References

- 1) Ding, Z., "A survey of radar resource management algorithms," in Proc. *Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering* 2008, pp. 1559~1564.
- 2) Pinedo, M. L., "Scheduling : Theory, Algorithms, and Systems," Springer, 2012.
- 3) Park, J. W., Jang, D. S., Choi, H. L.,



- Tahk, M. J., Roh, J. E. and Kim, S. J., "Integrated Simulator of Airborne Multi-function Radar Resource Manager and Environment Model," *KSAS Journal*, Vol. 41, No.7, 2013, pp. 577~587.
- 4) Jeong, S. J., Jang, D. S., Choi, H. L. and Roh, J. E., "Statistical Analysis of Task Scheduling Rules for Airborne Radar," *KSAS Conference 2012.11*, pp. 300~306.
- 5) Yalaoui, F., Chu, C., "Parallel machine scheduling to minimize total tardiness," *International journal of production economics*, 2002, pp. 265~279.
- 6) Biskup, D., Herrmann, J., "Scheduling identical parallel machines to minimize total tardiness," *International journal of production economics*, 2008, pp. 134~142.
- 7) Nyirenda, J. C., "Relationship between the modified due date rule and the heuristic of Wilkerson and Irwin," *Operation Research Society of South Africa*, Vol. 17, No. 1/2, pp. 101~111
- 8) Alidaee, B., Rosa, D., "Scheduling parallel machines to minimize total weighted and unweighted tardiness," *Computers operations of research*, No. 8, 1997, pp. 775~788.
- 9) Shun, L., Hideki, H., Run, S., Hitoi, T., and Tadashi, O., "Radar Network System to Observe & Analyze Tokyo Bay Vessel Traffic," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 19, No. 11, 2004, pp. 3~11.
- 10) Chisham, G., Lester, M., Milan, S. E., et al. "A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): Scientific achievements, new techniques and future directions," *Surveys in geophysics*, Vol. 28, No. 1, 2007, pp. 33~109.
- 11) Baker, K. R., Kanet, J. J., "Job shop scheduling with modified due dates," *Journal of operations management*, 1983, pp. 11~22.
- 12) Butler, J. M., "Tracking and control in multi-function radar" Ph.D. dissertation, University College London, 1998.
- 13) Skolnik, M., "Radar handbook," McGraw-Hill, 2008.
- 14) Jang, D. S. and Choi, H.L., "A task scheduling algorithm for airborne multi-function AESA radars based on time-window chaining," *KSAS Spring conference*, Apr. 2011.
- 15) Izquierdo-Fuente. A. and Casar-Corredera. J. R. , "Optimal radar pulse scheduling using a neural network," in *Proc. IEEE Int Neural Networks IEEE World Congress Computational Intelligence. Conf.*, 1994, vol. 7, pp. 4588~4591.
- 16) Severson, T. and Paley, D. A., "Distributed Optimization for Radar Mission Coordination," *In Proc. American Control Conf.*, 2012, pp. 5102 - 5107.
- 17) Scala. B. L. and Moran. B., "Optimal target tracking with restless bandits," *Digital Signal Processing*, 2006, Vol. 16, No. 5, pp. 479 ~ 487.
- 18) Ghosh. S., Raj RajkumarR., Hansen. J., and Lehoczky. J., "Integrated qos-aware resource management and scheduling with multi-resource constraints," *Real-Time Systems*, 2006, Vol. 33, No. 1-3, pp. 7~46.
- 19) Harada. F., Ushio.T., and Nakamoto. Y., "Adaptive resource allocation control for fair QoS management," *IEEE Transactions on computers*, 2007, Vol. 56, No. 3, pp. 344~357.
- 20) Shin, H.-J., Hong, S.-M. and Hong, D.-H. "Adaptive-update-rate target tracking for phased-array radar," *IEEE Proceedings -Radar, Sonar and Navigation*, 1995, Vol. 142, No. 3, pp. 137~143.
- 21) Lenstra. J. K., Kan. A. H. G. R., Brucker. P., "Complexity of machine scheduling problems," *Annals of Discrete Mathematics 1*, 1977, pp. 343~362.
- 22) Adrian. O., "M3R AESA technology for extended air defence," *IEEE Aerospace and Electronic System Magazine*, 2010, Vol. 25, No. 8, pp. 11~16.