Dispatching Rule에 기반한 능동 위상 배열 다기능 레이더의 빔 스케줄링 기법

Beam Scheduling Algorithm of Multi-Function AESA Radar Based on Dispatching Rules

노 지 은 · 안 창 수 · 김 선 주

Ji-Eun Roh · Chang-Soo Ahn · Seon-Joo Kim

요 약

능동 위상 배열레이더(AESA radar: Active Electronically Scanned Array radar)는 전자적으로 빔을 조향함으로써 빔 조향 시간이 비약적으로 빨라져, 기존의 기계식 빔 조향 레이더에 비해 레이더에서 수행할 수 있는 다중 임무 처리 능력이 크게 향상되었다. 이러한 다중 임무 처리 능력을 최대화하면서 레이더의 전체 성능을 향상하기 위해, 레이더에 주어진 시간, 에너지, 처리 능력 등의 한정된 자원을 실시간으로 효율적으로 관리, 운용할 수 있는 레이더 자원 관리 기술의 중요성이 크게 대두되었다. 그 중 레이더 빔 스케줄링 기술은 레이더 자원 관리의 핵심적인 요소라 할 수 있다. 본 논문에서는 레이더 빔 스케줄링을 위한 다양한 dispatching rule을 비교 분석하고, 특히 빔의 처리 시간 지연 정도에 따라 SPF(Shortest Processing time First)와 ERF(Earliest Request time First)를 차등적으로 적용하여 빔의 우선 순위를 정하는 dispatching rule을 제안, 그 성능의 우월성을 입증하였다.

Abstract

AESA radar is able to instantaneously and adaptively position and control the beam, and such adaptive beam pointing of AESA radar enables to remarkably improve the multi-mission capability, compared with mechanically scanned array radar. AESA radar brings a new challenges, radar resource management(RRM), which is a technique efficiently allocating finite resources, such as energy and time to each task in an optimal and intelligent way. Especially radar beam scheduling is the most critical component for the success of RRM. In this paper, we proposed the several dispatching rules for radar beam scheduling, and compared the performance on the multi-function radar scenario. We also showed that the dispatching rule which differently applying SPF(Shortest Processing time First) and ERF(Earliest Request time First) according to beam processing latency is the most efficient.

Key words : AESA Radar, Radar Resource Management, Radar Beam Scheduling, Dispatching Rules

I. 머리말

3차원 다기능 레이더(MFR: Multi-Function Radar)는 실시간으로 다수의 표적을 탐지, 추적하여 거리 및 각도 정보를 제공하는 최신 레이더 시스템이다.

표적의 탐지로부터 추적까지를 실시간으로 처리하기 위해서는 빔 조향이 용이한 위상 배열 안테나 기술과 다양한 실시간 레이더 신호 처리 기술과 더불어, 레이더의 한정된 자원을 효과적으로 활용하여 레이더 전체 성능을 향상시키는 레이더 자원 관리

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20110830-094

· 교신저자 : 노지은(e-mail : jeroh@add.re.kr)

· 심사일자 : 2011년 10월 18일 · 수정완료일자 : 2011년 10월 20일

(RRM: Radar Resource Management) 기술의 중요성이 크게 대두되었다. 특히, 능동 위상 배열 레이더(AESA radar: Active Electronically Scanned Array radar)는 전자적으로 빔을 조향함으로써 빔 조향 시간이 비약적으로 빨라, 기존의 기계식 빔 조향 레이더에 비해 레이더에서 수행할 수 있는 다중 임무 처리 능력이 크게 향상되었다. 이러한 다중 임무 처리 능력을 극대화하기 위해서는 레이더에 주어진 시간, 에너지, 처리 능력 등의 한정된 자원을 실시간으로 효율적으로 관리, 운용할 수 있는 레이더 자원 관리 기술이 필요하다.

레이더의 한정된 자원을 효율적으로 사용하기 위해 적응적 파형 선택, 표적 위협도 분석을 통한 표적별 차등 처리, 적응적 추적 주기 기법 등이 연구되고 있으며, 그 중 레이더 빔 스케줄링 기술은 레이더 자원 관리의 핵심적인 요소라 할 수 있다. 레이더 빔 스케줄링은 레이더 임무들의 수행 시간과 순서를 임무의 우선 순위, 전술적 요구 조건 및 임무 처리 성능 지표에 입각하여 실시간으로 결정하는 기술이다.

본 논문에서는 이러한 레이더 빔 스케줄링을 위해 다양한 dispatching rule을 비교 분석하였고, 특히 빔의 처리 시간 지연 정도에 따라 SPF(Shortest Processing time First)와 ERF(Earliest Request time First)를 차등적으로 적용하여 빔의 우선 순위를 정하는 dispatching rule을 제안, 그 효용성을 입증하였다. 본 논문의 II장에서는 다기능 레이더 시스템을 위한 레이더 자원 관리 연구 중, 빔 스케줄링에 관련된 기존 연구에 대해 설명하고, III장에서는 실시간 시스템(real-time system)에서 적용되는 다양한 태스크 스케줄링 기법 중 레이더 빔 스케줄링에 적용 가능한 dispatching rule과 기존 연구에서 자주 언급되는 dispatching rule을 소개하였다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 그 결과를 분석하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 레이더 빔 스케줄링 기존 연구

레이더 빔 스케줄링은 우선 순위 할당, 스케줄링 방법의 유연성, 최적화 가능성에 따라 비적응형과 적응형 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있는데, 참고

문헌 [1]의 조사에 따르면, 비적응형 기법은 임무 우선 순위가 미리 정해져 있으며, 스케줄러는 이러한 우선 순위와 정해진 휴리스틱 규칙에 따라 자원 관리를 실행하게 된다. 적응형 기법의 경우 좀 더 복잡한 과정을 이용해 우선 순위를 결정하거나, 최적화된 해를 얻기 위하여 스케줄링 단계에서 다양한 기법들을 활용하는 것이 특징이다. 문헌에서 주로 언급되고 있는 비적응형 기법으로는 Butler형^[2]과 Orman형^[3]이 있다. 두 기법 모두 빔의 고정된 우선 순위가 정해져 있으며, 스케줄링은 시간축(time-line)을 따라 진행하면서 순차적인 처리 과정을 통해 결정하도록 되어 있다.

Butler형은 요청된 임무들에 타임 밸런스를 배정하여 순차적으로 비교하도록 구성되어 있다. 타임 밸런스는 스케줄링마다 증가하는 값으로 임무에 대해 남은 한계 시간을 나타낸다. 즉, 음수라면 한계시각까지 남은 시간을 나타내고, 양수라면 이미 한계시각을 지나쳐 지연되고 있다는 의미이다. 만약 임무가 정확히 요청된 시간 안에 처리된다면 타임 밸런스는 0이 된다. 타임 밸런스와 주어진 임무 우선 순위에 따라 순차적인 처리 과정을 반복하게 되는데, 우선 순위에 입각하여 일차적으로 임무를 선택하고, 그중에 양인 타임 밸런스를 가지는 임무를 선택한 후 모든 타임 밸런스를 증가시켜 시간 축에서 양의 방향으로 이동하여 계속 스케줄링을 진행한다. 이 방법의 단점은 우선 순위가 높은 임무(추적)가 지속적으로 많이 요청되는 경우, 우선 순위가 낮은 임무(탐색)가 계속 뒤로 밀려서 수행되지 않을 수 있다는 것이다. 대신에 시간축 상에 빈 공간을 남겨 두지 않으므로, 한정된 시간 자원을 모두 사용한다는 이점이 있다.

Orman형은 일정 시간 간격으로 떨어진 두 개의 다른 임무의 결합(coupled-task)을 하나의 임무로 생각한다. 하나의 임무는 레이더 펄스를 보내는 시간, 대기 시간, 반송 펄스를 받는 시간으로 구성되고, 성능 개선을 위해 대기 시간을 활용할 수도 있다. 대기 시간의 길이는 레이더가 수행하는 임무의 특성과 표적의 거리, 탐색 영역, 송신 시간 등에 따라 좌우된다. Orman형 역시 Butler형과 마찬가지로 우선 순위가 높은 임무들에 의해 낮은 우선 순위를 가지는 임무의 처리가 지연될 수 있다. 이는 스케줄러가 고정

된 우선 순위를 사용하고 가장 높은 우선 순위를 가지는 임무를 항상 먼저 처리하는 특성 때문이다. 참고문헌 [4]는 Orman형 스케줄러를 사용하면 Butler의 결과에 비해서 임무처리 요청 시각 가까이에 임무들을 스케줄링할 수 있음을 지적하고 있지만, Orman형 스케줄러는 레이더의 가용 시간을 모두 사용하지 못한다는 큰 단점이 있다.

적응형 기법은 최적화 기법과 목표 함수 및 대상 자원의 종류에 따라 다양한 알고리즘들이 제안되었다. 소프트 컴퓨팅(ANN, Fuzzy)이나 전문가 시스템을 사용한 인공 지능 기반 알고리즘^{[5][6]}, 은닉 마르코프 모델(HMM)이나 마르코프 결정 모델(MDP) 구조 하에서 동적 프로그래밍을 통해 문제를 해결하는 방법^[7], QoS(Quality of Service)를 목적 함수로 두는 Q-RAM 알고리즘^{[8][10]} 등이 제안되었으며, 이러한 알고리즘은 빔 스케줄링 문제를 파형 최적화, 추적 주기 최적화 등과 결합되어 해결하고자 한다. 이러한 최적화에 기반한 적응형 기법은 학계에서는 활발히 연구 중이지만, 실제 레이더 시스템에 적용하여 실시간으로 운용되기에는 알고리즘의 복잡도나 신뢰성 측면에서 아직은 기술이 성숙되어 있지 않다고 볼 수 있다.

본 논문은 Butler형이나 Orman형처럼 dispatching rule을 이용한 비적응형 레이더 빔 스케줄링에 관한 것으로, 최적화된 성능을 보장하기는 힘들지만, 실시간성과 신뢰성이 보장되어 실제 운용 중인 레이더 시스템에 즉각 적용 가능한 레이더 빔 스케줄링 알고리즘을 제안하는 것을 목표로 하고 있다.

III. 빔 스케줄링을 위한 Dispatching Rule

3-1 실시간 시스템과 태스크 스케줄링

실시간 스케줄링 이론(Real Time Scheduling Theory)은 역사가 30년 이상이 된, 경영과학의 한 분야로 선형계획법, 동적계획법을 기반으로 하는 PERT/CPM과 더불어 복잡한 대규모 프로젝트를 최적으로 수행하기 위한 기법이다. 태스크의 가변성으로 인하여 태스크의 마감 시간을 위한 실시간 스케줄링의 연구가 많이 진행되고 있으며, 고정 우선 순위 스케줄링, 동적 우선 순위 스케줄링의 기본 스케줄링으

로부터 소프트 실시간 스케줄링, 피드백 스케줄링 등이 있다^[11]. 본 장에서는 실시간 스케줄링 이론에 대해 간단히 정리하고, 레이더 빔 스케줄링 문제를 실시간 스케줄링 이론의 관점에서 정의해 보고자 한다.

복잡한 실시간 시스템은 마감 시간(deadline)이라 불리는 시간 제약을 가지는 태스크들로 구성된다. 태스크가 마감 시간을 지키지 못했을 경우, 인명 피해나 경제적 손실 등의 재앙이 발생하는 경우 태스크가 경성(hard) 마감 시간을 가진다고 말한다. 마감 시간을 지키는 것이 요구되지만, 지키지 못했을 경우 커다란 피해가 발생하지 않고 계산 결과의 품질이 저하되는 경우 태스크가 연성(soft) 마감 시간을 가진다고 말한다.

주기적으로 활성화 되어 작업을 수행하는 태스크를 주기적(periodic) 태스크라고 하며, 산발적으로 활성화되는 태스크를 비주기(aperiodic) 태스크라고 한다. 일반적으로 주기 태스크들은 경성 마감 시간을 가지며, 비주기 태스크들은 비실 시간 태스크이거나 혹은 시간 제약을 가지더라도 연성 마감 시간을 가진다. 이러한 주기 태스크와 마감 시간이 없는 비주기 태스크가 시스템에 존재할 경우, 실시간 스케줄링의 목표는 주기 태스크들이 마감 시간을 충족시키는 것을 보장하면서, 비주기 태스크들이 빠른 응답 시간을 보이도록 하는 것이다^[12].

주기 태스크와 비주기 태스크의 스케줄링 알고리즘은 주기 태스크를 스케줄하는 알고리즘을 기준으로 고정 우선 순위와 동적 우선 순위로 나눌 수 있다. 주기 태스크를 스케줄할 때, 일반적으로 고정 우선 순위는 RM(Rate Monotonic)^[13] 알고리즘을 사용하고, 동적 우선 순위는 EDF(Earliest Deadline First)^[13] 알고리즘을 사용한다^[12].

또, 스케줄링 적용 시점에 따라 비선점형과 선점형으로 구분할 수 있다. 비선점형 스케줄링(non-preemptive scheduling)은 어떤 태스크가 자발적으로 중지될 때까지 계속 실행되도록 보장한다. 반면, 선점형 스케줄링(preemptive scheduling)은 어떤 태스크가 실행 중에 있어도 다른 태스크가 이를 중지하고 강제로 점유할 수 있는 방식이다.

3-2 레이더 빔 스케줄링의 문제 정의

그림 1. 일반적인 레이더 빔의 종류 및 처리 흐름도
Fig. 1. General radar beam types and processing flow.

다기능 레이더에서 운용되는 빔은 레이더 시스템마다 약간의 차이가 있겠지만, 일반적으로는 그림 1과 같은 빔의 종류를 가지고 운용된다.

레이더 빔 스케줄링은 하나의 빔이 방사되는 동안 다른 빔이 중지시키고 점유하는 것은 의미가 적절치 않으므로 비선점형 스케줄링이라 할 수 있다. 또한, 주기성을 갖는 빔, 긴급성을 갖는 빔, 비주기성을 갖는 빔 등이 복합적으로 존재하므로 주기적 태스크와 비주기적 태스크가 동시에 존재하는 실시간 시스템의 스케줄링 문제라고 볼 수 있다. 주기성을 갖는 빔들은 주기적으로 처리되도록 요구되며, 긴급성을 갖는 요구 시간들도 시간 제약이 있으므로 마감 시간이 있다고 볼 수 있다. 마감 시간이 늦어지면 탐지 확률, 추적 정확도가 저하되거나, 추적 중이던 표적이 소실될 수 있는데, 정확도 저하의 측면에서는 연성 실시간 시스템으로 볼 수 있지만, 추적 중이던 표적이 소실되면 실제 전장상황에서는 인명 피해나 경제적 손실이 있을 수 있으므로 경성 시스템으로도 볼 수 있을 것이다.

3-3 레이더 빔 스케줄링을 위한 Dispatching Rule들

Dispatching rule이란 일반적으로 시스템 상에서 처리되기를 기다리고 있는 모든 태스크에 대해 우선 순위를 결정할 수 있는 규칙을 의미한다. 하나의 태스크 처리가 완료된 후, dispatching rule은 대기하고 있는 태스크에 대한 우선 순위를 매겨, 가장 높은 우선 순위를 갖는 태스크를 선택, 처리하게 된다. 참고 문헌 [14]에서는 dispatching rule을 다음과 같이 정의하고 있다.

A Dispatching rule is a rule that priorities all the jobs awaiting for processing on a machine. Whenever a machine has been freed, a dispatching rule inspects the waiting jobs and selects the job with the highest priority.

이런 dispatching rule의 장점은 구현이 용이하고 빠르며, 비교적 짧은 시간 안에 좋은 해를 찾을 수 있고, 제한된 문제에 한해서는 최적임을 보장하기도 한다.

본 논문에서는 먼저 다양한 dispatching rule을 레이더 빔 스케줄링에 적용하기 위해, Base_Scheduler_Algorithm과 Base_Scheduler_Algorithm에 필요한 개념 및 변수들을 표 1과 같이 정의하였다.

빔의 우선 순위 레벨은 시스템마다 차이가 좀 있지만, 본 논문에서는 추적 유지, 플롯 확인, 정밀 추적, 추적 초기화, 탐색 순으로 우선 순위를 가정하였다. 탐색 레벨의 경우 참고문헌 [2]와 마찬가지로 모든 상위 우선 순위 레벨의 빔들이 스케줄링될 필요가 없을 때만 탐색 빔의 스케줄링이 일어난다. 또한, 지정된 레이더 점유율에 비해 추적 업무 등의 부하가 적어 frame time이 줄어드는 경우에도 대기 시간(idle time)없이 탐색 빔을 계속 처리하게 된다. 따라서 탐색 레벨의 빔들은 정해진 처리 요청 시각이 없는 것처럼 취급된다.

표 2는 본 논문에서 적용한 dispatching rule들 중 SV에 $r(\text{request time})$ 값을 포함하고 있는 rule들을 Base Scheduler Algorithm에 적용하기 위해 알고리즘 변수를 정리한 것이다.

EDF(Earliest Deadline First)는 동적 우선 순위 기반 스케줄링 방법 중에서 가장 널리 알려져 있는 것

표 1. 기본 스케줄링 알고리즘 및 변수 정의

Table 1. Base scheduler algorithm, parameters, and variables.

Algorithm parameters and variables
<ul style="list-style-type: none"> - Beam Definition : Beam(r, p, d, p_i, pr) r: 요청 시간(request time), p: 처리 시간(processing time, i.e. dwell time), d: 마감 시간(deadline), p_i: 빔의 우선 순위 레벨(bean priority level) pr: 주기가 있을 경우 빔의 처리 주기 - Priority_level $p_i \in \{1(\text{track maintenance}), 2(\text{plot confirmation}), 3(\text{active track}), 4(\text{track initiation}), 5(\text{surveillance})\}$ //낮은 숫자가 높은 우선 순위를 가짐. - ct : current time (스케줄링이 이루어지는 시간. 즉, 다음에 처리할 빔을 결정하는 시간) - Scheduling Candidate Task Condition(SCTC) 각 우선 순위 레벨에서 대기하고 있는 빔들 중 스케줄링 후보에 넣을 기준 - $SCTC_Setp_i$ 우선 순위 p_i 레벨에서 SCTC 조건을 만족하는 빔들의 집합. - $SCTC_Set$ 각 우선 순위 레벨에서 하나씩 선택된 빔들의 집합. - SV(Scheduling Value) $SCTC_Setp_i$에서 하나의 빔을 선택하는 기준값. 그리고, $SCTC_Set$에서 최종 스케줄링할 빔을 결정하는 기준값. 즉, SV에 따라 $SCTC_Set$에서 하나의 빔이 선택되어 최종 스케줄링됨.
Base_Scheduler_Algorithm
Define Base_Scheduler_Algorithm variables. $SCTC_set = \{ \}$, $SCTC_Setp_i = \{ \}$ while highest priority level find $SCTC_Setp_i$ if current priority level is not Surveillance && $SCTC_Setp_i$ is not empty select one beam with smallest SV, and add the beam into $SCTC_Set$ end go down to the next priority level If $SCTC_set$ is not empty then schedule the beam with the smallest SV else schedule search beam in Surveillance level

으로 새로운 태스크가 도착할 때마다 현재 실행 중인 태스크들과 새로운 태스크들의 마감 시간을 서로 비교하여 새로운 태스크의 우선 순위를 결정한다. 이때 마감 시간이 빠를수록 더 높은 우선 순위를 갖는다. EDF는 동적 우선 순위 기반 선점형 스케줄링 방식 중에서는 최적의 스케줄링 방법이라고 알려져 있으며, EDF 기법에 의해서 스케줄 될 수 없는 태스크 집합은 다른 어떤 우선 순위 기반 스케줄링 방법을 사용하더라도 스케줄 될 수 없다^[12]. 본 논문에서는 EDF를 빔 스케줄링 알고리즘에 적용하기 위해 두 가지 버전을 제안하였는데, EDF_ver 1은 지연된 빔 중에서 마감 시간이 가장 빠른 빔을 먼저 처리하는 방법이며, EDF_ver 2는 지연된 빔뿐만 아니라, 요청

시간이 아직 이른 빔들 중에서도 시간 제약을 두어 스케줄링에 포함하도록 하는 방법이다. 이때 얼마나 이른 빔까지 스케줄링 범위에 포함할 것인지를 α 로 결정할 수 있도록 하였다.

ERF(Earliest Release Time First)는 흔히 알고 있는 FCFS(First Come First Served)와 동일한 것으로 태스크가 요청된 시간이 이른 것을 먼저 처리하는 방법이다. 이 규칙은 태스크간의 지연 시간을 균등하게 즉, 태스크의 대기 시간에 대한 분산을 최소화 하는 특징이 있다. 본 논문에서는 지연된 빔들 중 요청된 시간이 가장 빠른 것을 먼저 처리하도록 하였다.

HRDF는 RM(Rate Monotonic)의 개념을 도입한 것으로 지연된 시간을 주기로 나눈 값으로 우선 순위

표 2. EDF, ERF, HRDF 기반 레이더 빔 스케줄링 알고리즘 변수 정의

Table 2. Definition of scheduler's variables based on EDF, ERF, and HRDF.

명칭 및 설명	알고리즘 변수
EDF(Earliest Deadline First) : 마감 시간이 빠른 태스크에게 높은 우선 순위를 부여	$\cdot d = r + p$ $\cdot \text{SCTC}: d < ct + \alpha$ $\cdot \text{SV} = d$ $\cdot \text{EDF_ver 1} : \alpha = 0$ $\cdot \text{EDF_ver 2} : \alpha > 0$
ERF(Earliest Request time First) : 요청 시간이 이른 태스크에게 높은 우선 순위를 부여	$\cdot \text{SCTC}: r < ct$ $\cdot \text{SV} = r$
HRDF(High Relative Delay First) : 지연된 것들 중 처리 주기가 짧은 태스크에게 높은 우선 순위를 부여	$\cdot \text{SCTC}: r < ct$ $\cdot \text{SV} = (ct - r) / pr$

를 정하며, 주기가 짧을수록 높은 우선 순위가 부여된다.

RM(Rate Monotonic)이란 고정우선 순위 기반 스케줄링에 가장 널리 사용되고 있는 방법으로 주기가 짧은 태스크에 높은 우선 순위를 할당하는 방법이다. RM은 고정 우선 순위 기반 선점형 스케줄링 방식하에서 타당한(feasible) 스케줄이 존재하는 태스크 집합은 RM에 의해서 항상 스케줄이 가능하며, 동시에 RM에 의해서 스케줄이 가능하지 못한 태스크의 집합은 어떠한 고정 우선 순위 기반 선점형 스케줄링 방법을 사용한다고 해도 타당한 스케줄을 찾을 수 없음을 의미한다^[13].

표 3은 처리 시간에 기반한 dispatching rule인 SPF (Shortest Processing Time First)를 빔 스케줄링에 적용하기 위한 것으로, 총 4가지의 버전의 알고리즘을 제안하였다. SPF_ver 1은 지연된 빔 중에서 처리 시간이 가장 짧은 빔을 먼저 처리하는 방법이며, SPF_ver 2는 지연된 빔뿐만 아니라, 요청 시간이 아직 이른 빔들 중에서도 시간 제약을 두어 스케줄링에 포함하도록 하는 방법이다. EDF와 마찬가지로, 이때 얼마나 이른 빔까지 스케줄링 범위에 포함할 것인지를 α 로 결정할 수 있도록 하였다. SPF_ver 1과 SPF_ver 2는 표 2에서 정의한 dispatching rule과 마찬가지로 Base_Scheduler Algorithm에 동일하게 적용된다. 표 2의 ERF, HRDF, EDF 기반 빔 스케줄링 알고리즘에서는 빔의 요청 시간 r 이 서로 다른 형태로 SV값

표 3. SPF 기반 빔 스케줄링 알고리즘 정의

Table 3. Definition of SPF based beam scheduler.

<p>SPF (Shortest Processing time First): 처리 시간이 짧은 태스크에게 높은 우선 순위를 부여</p> <p>1) SPF_ver 1 & SPF_ver 2 $\text{SCTC}: r < ct + \alpha$ $\text{SV} = p$ $\cdot \text{SPF_ver 1} : \alpha = 0$ $\cdot \text{SPF_ver 2} : \alpha > 0$</p> <p>2) SPF_ver 3 $\text{latency_limit} = 00\text{ms}$ $\text{SCTC1}: r < ct + \alpha$ $\text{SCTC2}: ct - r > \text{latency_limit}$ $\text{SV1} = p, \text{SV2} = r$ $\text{SCTC1_Setp_i} = \{ \}$ //SCTC1을 만족하는 빔의 집합 $\text{SCTC2_Setp_i} = \{ \}$ //SCTC2를 만족하는 빔의 집합 $\text{SCTC_Seturgent} = \{ \}, \text{SCTC_Set} = \{ \}$ while highest priority level find $\text{SCTC1_Setp_i}, \text{SCTC2_Setp_i}$ if current priority level is not Surveillance && SCTC2_Setp_i is not empty then select the beam with smallest SV1 from SCTC2_setp_i, and add the beam into $\text{SCTC_Seturgent} \rightarrow (1)$ else if current priority level is not Surveillance && SCTC1_Setp_i is not empty then select the beam with the smallest SV1 from SCTC1_Setp_i, and add the beam into SCTC_Set end go down to the next priority level. if SCTC_seturgent is not empty then schedule beam with the smallest SV1 $\rightarrow (2)$ else if SCTC_set is not empty then schedule beam with the smallest SV1 else schedule search beam</p> <p>3) SPF_ver 4 SPF_ver 3의 (1), (2)를 다음과 같이 수정 (1') select the beam with smallest SV2 from SCTC2_setp_i, and add the beam into SCTC_Seturgent (2') if SCTC_seturgent is not empty then schedule beam with the smallest SV2</p>

에 포함, 스케줄링 결정에 관여하지만, SPF_ver 1과 SPF_ver 2는 처리 시간이 짧지 않아서 지연되는 빔들이 처리될 기회가 없어 계속적으로 지연될 수 있는 문제점이 있을 수 있다. 따라서 이를 개선하기 위해 SPF_ver 3과 SPF_ver 4를 제안하였다. SPF_ver 3은 지연될 수 있는 한계를 두어 한계 시간 이상 지연된 것들이 존재하지 않는 경우는 기존의 방법처럼 처리 시간이 가장 짧은 것을 높은 우선 순위로 두고, 한계 시간 이상 지연된 것들이 여러개 존재하는 경우, 그것들 중 가장 처리 시간이 짧은 것을 높은 우선 순위로 둔다. SPF_ver 4는 SPF_ver 3에서 한계 시

표 4. Butler형 스케줄링 알고리즘^[2]Table 4. Butler's dispatching rule^[2].

BDR (Butler's dispatching rule) ^[2]
- SCTC: $r < ct$ (i.e. $\text{timebalance} > 0$) - $SV = r$ while highest priority level find SCTC_Setp_i if current priority level is not Surveillance && SCTC_Setp_i is not empty <u>then</u> schedule the beam with smallest SV. exit. go down to the next priority level If current priority level is Surveillance, <u>then</u> schedule search beam

표 5. 시뮬레이션을 위한 탐색 영역과 관련 인자들

Table 5. Parameters of search regions for simulation.

Region	Azimuth	Elevation	Avg. dwell time (ms)	Occupancy
1	$\pm 45^\circ$	$0 \sim 20^\circ$	1.42 broadside:1	20 %
2	$\pm 45^\circ$	$20^\circ \sim 50^\circ$	3.304 broadside:2	80 %

Region	# of beams	Frame time(s)	Function time(s)	Look interval(ms)
1	283	2.010s	0.402	7.102
2	329	1.359s	1.087	4.130

간 이상 지연된 것들이 여러 개 존재하는 경우, 그 중 요청 시간이 가장 이른 것을 먼저 처리하고자 하는 방법이다. 즉, SPF_ver 4는 한계 지연 시간을 넘긴 빔들에 대해서는 ERF를 적용하고, 한계 지연 시간을 넘지 않은 빔들에 대해서는 SPF를 적용하는 개념으로 볼 수 있다.

표 4는 참고문헌 [2]에서 제안한 Butler형 빔 스케줄링 알고리즘을 본 논문에서 정의한 알고리즘 변수 값을 이용해 재표현한 것(이후 BDR로 칭함)으로, 본 논문에서 제안한 다양한 스케줄링 알고리즘과 성능을 비교하기 위해 기술하였다. BDR 알고리즘은 ERF와 유사한 개념이라고 볼 수 있는데, 동일한 우선 순위를 갖는 빔들 중 지연된 빔에 대해 ERF가 적용되며, 높은 우선 순위의 빔들 중 지연된 빔들이 다 처리되기 전에는 낮은 우선 순위의 빔들이 처리될 수 없다. 즉, 우선 순위가 높은 빔들 순으로, 지연된 빔에 대해 ERF가 적용된다.

IV. 시뮬레이션

4-1 시뮬레이션 환경

3-3절에서 설명한 dispatching rule을 비교 분석하기 위해 참고문헌 [2]의 5장에서 사용된 것과 동일한 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 레이더 임무는 두 개의 탐색 영역으로 이루어진 공간을 탐색하다가 표적이 발견되면, 순차적으로 플롯 확인, 추적 초기화, 정밀 추적을 수행하는 것이다. 탐색 영역의 구분에 대한 정보들은 표 5와 같다.

표적의 출현과 탐지 및 추적은 다음과 같이 가정하였다. 전체 50초의 시뮬레이션 시간에 대해 무작위로 80개의 고정된 표적을 시뮬레이션 시간의 초기 30초의 시간 내에 생성하고, 표적이 공간상에 최초 출현한 이후에 탐색 빔의 방향에 표적이 위치하면 플롯 확인과 추적 초기화 및 정밀 추적을 수행하도록 하였다. 탐지에서 플롯 확인까지의 시간 제약은 0.1초, 추적 초기화는 0.1초 주기로 10회, 정밀 추적을 위한 추적 갱신 주기는 0.3초로 설정하였다.

앞서 언급한 것처럼, 탐색 레벨의 경우 모든 상위 우선 순위 레벨의 빔들이 스케줄링 될 필요가 없을 때만 탐색 빔의 스케줄링이 일어나며, 시뮬레이션 시간동안 대기 시간이 없도록 탐색 빔이 처리되므로, 탐색 레벨의 빔들은 정해진 처리 요청 시각이 없는 것처럼 취급된다.

빔의 dwell time은 빔 조향 각도에 따른 SNR 손실을 보상하여 표적 탐지 성능이 유지될 수 있어야 한다. 레이더 빔 조향 각도에 ψ 에 대한 감쇠된 신호대 잡음비 S/N_ψ 는 다음과 같다^[2].

$$S/N_\psi = S/N_o \cos^3 \psi$$

이에 따라 빔 조향 각도에 따른 dwell time은 위식의 역에 비례해서 증가해야 한다. 레이더의 각 탐색 영역에 대해서 function time $t_{function}$, frame time t_{frame} , look interval Δt_{look} 은 탐색 영역의 레이더 시간 요구 점유율 occ_d , 총 빔의 개수 N_{beam} , 레이더 정면에서의 dwell time $t_{d,0}$ 에 따라 아래와 같은 식으로 주어진다.

$$t_{function} = t_{d,0} N_{beam}$$

(a) ERF 적용시 빔 처리 시간 지연도
(a) Beam processing latency in ERF

(b) BDR 적용시 빔 처리 시간 지연도
(b) Beam processing latency in BDR

(c) HRDF 적용시 빔 처리 시간 지연도
(c) Beam processing latency in HRDF

(d) EDF_ver 1 적용시 빔 처리 시간 지연도
(d) Beam processing latency in EDF_ver1

그림 2. BDR, ERF, HRDF, EDF_ver 1을 적용한 빔 스케줄링 결과에 따른 빔 처리 지연도

Fig. 2. Beam processing latency according to applying BDR, ERF, HRDF, EDF_ver 1 based scheduler algorithm.

$$t_{\text{frame}} = t_{\text{function}} / \text{occ}_d$$

$$\Delta t_{\text{look}} = t_{\text{frame}} / N_{\text{beam}}$$

4.2 빔 스케줄링 성능 분석

서로 다른 dispatching rule을 적용한 스케줄링 결과에 대한 성능 평가를 위해 본 논문에서는 먼저 빔 처리 시간 지연도의 히스토그램을 분석하였다. 그림 2는 BDR, ERF, HRDF, EDF_ver 1의 적용 결과에 따른 빔 처리 시간 지연도 히스토그램을 보여준다. x 축은 빔의 요청된 시간 대비 실제 스케줄링된 시간이 얼마나 지연되었는지의 시간을 나타내고, y축은 해당 시간만큼 지연되어 처리된 빔의 개수를 나타낸

다. BDR, ERF, HRDF, EDF_ver 1은 공통적으로 모든 빔들이 요청된 시간 이후에 처리됨을 알 수 있으며, 시간 지연도가 약간의 차이가 있긴 하지만 4~6 ms 사이에 지연된 빔들이 가장 많이 존재하며, 그 경향은 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 ERF, EDF 등이 실제 다른 응용 분야의 실시간 시스템에서는 machine의 개수, job의 성격, 선점형 여부 등에 따라 확연하게 다른 성능을 나타내지만, 레이더 빔 스케줄링 관점에서는 그 효과가 크게 다르지 않음을 시사한다.

그림 3은 EDF_ver 1과 EDF_ver 2를 적용했을 때의 처리 시간 지연도를 비교해서 보여준다. EDF_ver 2의 결과는 α 값을 주기의 1 %로 두었을 때의 결과

그림 3. EDF_ver 1과 EDF_ver 2 적용시 빔 처리 지연도
Fig. 3. Beam processing latency according to EDF_ver 1 and EDF_ver 2 based scheduler algorithm.

로, 요청된 시간에서 최대 주기의 1 %의 시간만큼 앞당겨서 처리하는 것을 허락한 경우이다. EDF_ver 1의 결과와 비교했을 때, 미리 처리하는 빔들이 있는 만큼 전반적으로 시간 지연도가 많이 줄었을 뿐만 아니라, 시간 지연없이 제때 처리되는 빔의 개수가 EDF_ver 1에서는 212개였지만, EDF_ver 2에서는 737개로 그 수가 크게 증가하였다. 레이더의 dwell time이 길고, 짧은 시간 안에 많은 수의 추적 임무들이 요청되는 과부하 상태에서는 빔들의 지연시간이 레이더의 전체 성능을 크게 저하할 수 있는데, 요청

된 시간보다 일찍 처리되는 빔을 허락함으로써 비슷한 시간에 요청되는 빔들간의 충돌을 해소할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 상황에 따라 α 값을 조정하여 스케줄링의 전반적인 시간 지연도를 제어할 수 있다는 장점이 있어, 실제 레이더에 적용시 융통성 있는 알고리즘의 적용이 가능하다.

표 3의 SPF 기반 스케줄링 알고리즘을 적용한 결과는 BDR, ERF, HRDF, EDF와는 좀 다른 특징을 보인다. BDR, ERF, HRDF, EDF_ver 1이 비슷한 결과를 보이므로 대표적으로 BDR과 SPF_ver 1을 비교한 결과를 그림 4에서 도시하였다. SPF_ver 1의 결과는 BDR과는 달리 0~3 ms 시간 구간에 지연된 빔들이 집중되어 있어서 전반적으로 빔들의 처리 시간 지연도가 작으며, 즉 상대적으로 빔 요청 시간에 가까이에 임무들을 스케줄링 할 수 있다는 특징이 있다. 시간 지연 없이 제때 처리되는 빔의 개수가 BDR에서는 210개이지만, SPF_ver 1에서는 796개로 그 수가 크게 증가하였다. 하지만 BDR에 비해 상대적으로 훨씬 긴 시간 지연도를 갖는 빔들도 극소수이지만 존재하며, SPF_ver 1에서 최대 59 ms의 시간 지연 후에 처리되는 빔이 존재한다. 이는 3-3절에서 설명한 바와 같이, BDR, ERF, HRDF, EDF에서는 빔의 요청 시간이 서로 다른 형태로 스케줄링 결정에 관여하지만, SPF는 처리 시간이 짧지 않아서 지연되는 빔들

(a) BDR과 SPF_ver 1의 비교 결과
(a) Latency comparison of BDR and SPF_ver 1

(b) 그림 (a)의 앞부분 확대
(b) An enlarged figure of (a)

그림 4. BDR과 SPF_ver 1 적용시 빔 처리 지연도

Fig. 4. Comparison of beam processing latency according to BDR and SPF_ver 1 based scheduler.

(a) SPF_ver 1과 SPF_ver 2의 비교
(a) Comparison result of SPF_ver 1 and SPF_ver 2

(b) 그림 (a)의 앞부분 확대
(b) An enlarged figure of (a)

그림 5. SPF_ver 1과 SPF_ver 2 적용시 빔 처리 지연도
Fig. 5. Comparison result of SPF_ver 1 and SPF_ver 2.

(a) SPF_ver 3 적용시 빔 처리 시간 지연도
(a) Beam processing latency in SPF_ver 3

(b) SPF_ver 4 적용시 빔 처리 시간 지연도
(b) Beam processing latency in SPF_ver 4

그림 6. SPF_ver 3과 SPF_ver 4 적용시 빔 처리 지연도
Fig. 6. Comparison result of SPF_ver 3 and SPF_ver 4.

이 처리될 기회가 없어 계속적으로 지연될 수 있기 때문이다.

그림 5는 SPF_ver 1과 SPF_ver 2를 적용했을 때의 처리 시간 지연도를 비교해서 보여준다. SPF_ver 2의 결과는 α 값을 주기의 0.1 %로 두었을 때의 결과로, 요청된 시간에서 최대 주기의 0.1 %의 시간만큼 앞당겨서 처리하는 것을 허락한 경우이다. EDF_ver 1과 EDF_ver 2의 비교 결과와 유사한 경향을 보이는데, 시간 지연없이 제때 처리되는 빔의 개수가 SPF_ver 1에서는 796개였지만, SPF_ver 2에서는 1,460개

로 그 수가 크게 증가하였고, EDF와 마찬가지로 상황에 따라 α 값을 조정하여 스케줄링의 전반적인 시간 지연도를 제어할 수 있다.

그림 6은 $\alpha=0$, 지연 한계 시간(표 3의 latency_limit)을 14 ms로 두었을 때 SPF_ver 3과 SPF_ver 4에 대한 시간 지연도 결과를 보여준다. SPF_ver 1에서 최대로 지연되어 처리된 빔이 요청된 시간 대비 약 59 ms 이후에 처리되었다는 것을 고려할 때, SPF_ver 3에서는 최대 시간 지연 수준이 약 37 ms 수준으로 줄어들었다. 특히 SPF_ver 4는 최대 시간 지연 17

그림 7. 알고리즘 별 전체시간 지연도

Fig. 7. Comparison of beam processing latency according to applying BRD, HRDF, ERF, EDF_ver 1, and SPF ver 4 based beam scheduler.

(a) 정밀 추적 주기=0.3 s일 때 frame time 변화
(a) Frame time variation according to track update rate=0.3s

(b) 정밀 추적 주기=0.3 s일 때 점유율 변화
(b) Occupancy variation according to track update rate=0.3s

(c) 정밀 추적 주기=1 s일 때 frame time 변화
(c) Frame time variation according to track update rate=1s

(d) 정밀 추적 주기=1 s일 때 점유율 변화
(d) Occupancy variation according to track update rate=1s

그림 8. SPF_ver 4 알고리즘 적용시 정밀 추적 주기 변화에 따른 frame time과 점유율 변화

Fig. 8. Frame time and occupancy variation according to track update rate change on SPF_ver 4 scheduler.

표 6. 알고리즘 별 시뮬레이션 시간 동안 스케줄링 한 빔의 평균 개수

Table 6. The average number of processed beams during simulation time according to each algorithm.

BDR	HRDF	ERF	EDF_ver 1	SPF_ver 4
20,604	20,605	20,603	20,614	20,636

ms 이하로 크게 줄어들었으며, 이는 BDR, ERF, HRDF, EDF와 비슷한 수준이다.

그림 7은 알고리즘별 전체 시간 지연도를 비교하기 쉽게 하나의 그림에서 표현한 것으로, 기존의 BDR과 직접적인 비교를 위해 EDF와 SPF 기반 스케줄링에서 $\alpha=0$ 으로 두어 요청 시간보다 일찍 처리하

는 빔이 없도록 하였다. 그 결과, 앞서 설명한대로 SPF_ver 4가 전반적인 처리 시간 지연도 측면에서 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

스케줄링 알고리즘의 성능 분석을 위해 처리된 빔의 개수도 중요한 성능 분석 요소 중의 하나이다. 표 6은 알고리즘별 50초의 시뮬레이션 시간 동안 반복 실험을 통해 처리된 빔의 평균 개수를 구한 것으로 다른 알고리즘에 비해 SPF_ver 4가 20~30개 이상의 빔을 주어진 시간동안 더 많이 처리했음을 알 수 있다. 주어진 시간에 더 많은 빔을 처리할 수 있다는 것은, 레이더가 주어진 시간 안에 더 많은 임무를 처리할 수 있다는 뜻이며, 이는 레이더의 자원을 효율적으로 활용하기 위한 레이더 자원 관리 기술의 궁극적인 목표이기도 하다.

그림 8은 SPF_ver 4 알고리즘을 적용하였을 때 frame time의 변화와 각 빔들의 점유율을 보여주는 것으로 frame time과 빔들의 점유율은 다른 알고리즘에서도 거의 동일하게 나타난다. 약 30초를 기점으로 80개의 표적이 다 출현하는 시나리오였으므로, 약 35초 이전에 플롯 확인과 추적 초기화의 빔들은 다 처리되며, 이후는 80개의 표적에 대해 정밀 추적과 남은 시간에 대해 탐지 빔이 처리된다. 현재의 시나리오에서는 추적과 탐지가 6:4의 비율로 처리되고 있다. 또한, 많은 수의 표적이 한꺼번에 출현하여 추적에 들어감에 따라 frame time이 계속 증가하다가 35초를 기준으로 Region 1에서는 약 5초, Region 2에서는 약 3초 정도로 frame time이 유지됨을 알 수 있다. Frame time과 빔별 점유율은 정밀 추적 주기와 밀접한 관련이 있다. 그림 8의 (c), (d)는 추적 주기를 1초로 가정했을 때의 frame time과 점유율을 보여주는 것으로, 추적 주기를 짧게 할수록 처리해야 할 추적 빔의 개수가 크게 증가하여 frame time도 증가하고 추적 빔의 점유율 상승으로 인해 탐지 빔의 점유율이 하락하게 된다. 그림 8의 (a), (c)에서 파란색, 빨간색 직선은 추적 없이 탐지만 할 때의 초기 frame time을 나타낸다.

V. 맺음말

본 논문에서는 레이더 자원 관리의 핵심 요소라고 할 수 있는 레이더 빔 스케줄링을 위해 다양한

dispatching rule을 제안하고, 이를 기존의 방법론과 비교 분석해 보았다. 특히, 빔의 처리 시간 지연 정도에 따라 SPF와 ERF를 차등적으로 적용하여 빔의 우선 순위를 정하는 dispatching rule을 제안, 처리 시간 지연도 및 주어진 시간에서 스케줄링된 빔의 개수 측면에서 그 효용성을 입증하였다. 또한, EDF 기반 스케줄링 알고리즘과 SPF 기반 스케줄링 알고리즘에서 요청 시간이 아직 이른 빔들 중에서도 시간 제약을 두어 스케줄링에 포함하도록 하는 방법을 제안하였는데, 이는 요청된 시간보다 일찍 처리되는 빔을 허락함으로써 비슷한 시간에 요청되는 빔들간의 충돌을 해소하여 전반적으로 시간 지연도를 줄일 수 있는 효과가 있다. 향후 연구로는, 추적 필터를 연동하여 표적의 추적 정확도의 측면에서 스케줄링 알고리즘을 보완하고, 다양한 성능 지수를 통해 보다 정교한 성능 평가를 수행할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] Ding Zhen, "A survey of radar resource management algorithms", *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE*, pp. 1559-1564, 2008.
- [2] J. M. Butler, *Multi-Function Radar Tracking and Control*, University College London. Ph.D. Thesis, 1998.
- [3] A. J. Orman, C. N. Potts, A. K. Shahani, and A. R. Moore, "Scheduling for a multifunction array radar system", *European Journal of Operational Research*, no. 90, pp. 13-25, 1996.
- [4] S. L. C. Miranda, C. J. Baker, K. Woodbridge, and H. D. Griffiths, "Phased array radar resource management: A comparison of scheduling algorithms", in *Proc. IEEE Radar Conf.*, pp. 79-84, 2004.
- [5] W. Komorniczak, J. Pietrasinski, "Selected problems of MFR resources management", *The 3rd International Conference on Information Fusion*, vol. 2, pp. 3-8 Jul. 2000.
- [6] S. L. C. Miranda, K. Baker, K. Woddbridge, and H. D. Griffiths, "Fuzzy logic approach for prioritisation of radar tasks and sectors of surveillance in multifunction radar", *IET Radar Sonar Navigation*,

- vol. 1, no. 2, pp. 131-141, 2007.
- [7] V. Krishnamurthy, R. J. Evans, "Hidden Markov model multiarm bandits: A methodology for beam scheduling in multitarget tracking", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 12, pp. 2893-2908, 2001.
- [8] S. Ghosh, R. Rajkumar, J. Hansen, and J. Lehoczy, "Integrated QoS aware resource management and scheduling with multiresource constraints", *Real Time System*, vol. 33, pp. 7-46, 2006.
- [9] S. Gopalakrishnan, C. S. Shih, P. Ganti, M. Caccamo, and L. Sha, "Radar dwell scheduling with temporal distance and energy constraints", *International Radar Conference*, 2004.
- [10] K. Harada, T. Ushio, and Y. Nakamoto, "Adaptive resource allocation control for fair QoS management", *IEEE Transactions on Computers*, vol. 56, no. 3, pp. 344-357, 2007.
- [11] Lui Sha et al., "Real time scheduling theory: A historical perspectives", *Real-Time Systems*, vol. 28, pp. 101-155, 2004.
- [12] 김의현, 박학봉, 박문주, 박민규, 조유근, 조성제, "잉여 여유 시간을 이용한 연성 비주기 태스크들의 효율적인 스케줄링", *정보과학회논문지: 시스템 및 이론*, 36(1), pp. 9-20, 2009년.
- [13] C. L. Liu, J. W. Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment", *Journal of the ACM*, vol. 20, no. 1, pp. 46-61, 1973.
- [14] M. L. Pinedo, *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems, Third Edition*, Springer, ISBN: 978-0-387-78934-7, 2008.

노 지 은

통제 알고리즘 등

2002년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
2006년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
2006년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호 처리,

김 선 주

1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계, 항공기 레이더

안 창 수

시스템 설계

2005년 2월: 고려대학교 전파통신공학과 (공학석사)
2005년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신 모듈 설계, 항공기 레이더 운용 모드 설계, 능동 위상 배열 레이더 시