

論文

전투기 탑재 AESA 레이더의 설계 및 검증을 위한 체계모의 환경 구축

김용덕*, 윤보람**, 주광민***

Development of System Simulation Environment
for Design and Verification of Fighter AESA RADAR

Yong-Duk Kim*, Boram Yoon** and Kwangmin Joo***

ABSTRACT

This paper proposes the model-based M&S environment of a fighter AESA radar at system level for the purpose of simulation and verification of the radar system operation. It is an extended and higher-level of M&S environment compared to the existing radar M&S at engineering level by including avionic interface between the airborne radar and its aircraft. The proposed M&S environment is mainly composed of two parts of models: (1) system operation model and (2) radar engineering model. System operation model defines system states and operational procedures of the radar system using UML(Unified Modeling Language). Radar engineering model describes radar signal and data processing methods in MATLAB/Simulink. The radar M&S can be employed to check radar operational states and execution procedures, and to verify its systematic operability. Furthermore, its radar engineering model can be used to analyze the system performance of the radar and its functional requirements. Consequently, the radar M&S environment proposed by this paper will contribute to cost saving of fighter AESA radar development and reduction of its development risk.

초록

본 논문은 전투기 탑재 AESA 레이더의 체계운용을 모의하고 검증하기 위한 모델 기반의 M&S 환경을 제안한다. 제안된 환경은 기존의 공학급 레이더 모델을 확장하여, 레이더와 전투기 간의 항전연동 및 운용개념을 포함한 체계모의 환경으로 구성된다. 체계모의 환경은 UML을 사용하여 체계수준의 동작상태 및 운용절차를 모의하고 분석하며, AESA 레이더의 신호·데이터 처리는 Matlab/Simulink를 이용한 공학급 모델로 구현한다. 제안된 모의 환경은 임무수행 절차에 따라 전투기 AESA 레이더의 동작 및 운용 절차를 확인하여 체계운용성을 검증할 수 있을 뿐 아니라, 공학급 AESA 레이더 운용모의를 통하여 레이더 성능에 대한 분석 및 기능요구도를 검증할 수 있다. 이를 통해 궁극적으로 전투기 AESA 레이더 개발 비용을 절약하고 개발 위험성을 낮출 수 있다.

Key Words : Fighter AESA Radar(전투기 AESA 레이더), M&S(모델링 및 시뮬레이션) Model Based Design(모델 기반 설계), UML(통합 모델링 언어)

I. 서 론

최근의 전투기 레이다는 적기를 탐지·추적하고 공대공 미사일 운용을 지원할 뿐만 아니라 지상 및 해상의 영상을 형성하고 표적을 추적하는 다양한 기능을 수행하고 있다.⁽¹⁾ 이에 따라, 전투기 레이다 기술도 과거의 MSA(Mechanical Scanned Array, 기계 주사식 배열) 레이다에서 최신의 AESA(Active Electrically Scanned Array, 능동형 전자주사식 위상배열) 레이다로 발전하고 있으며, 최근에는 국내 개발도 추진되고 있다. 국내 전투기 레이다 개발은 선진국으로부터 관련 기술 이전도 어려운 상황으로 개발의 기술적 난이도와 막대한 투입 예산을 고려할 때, M&S (Modeling and Simulation, 모델링 및 시뮬레이션)를 통해 설계를 수행하고 검증하는 것은 필수적이다. 전투기 레이다는 다기능 레이다 시스템으로서, 일반적으로 다음과 같은 제약 및 요구사항을 갖는다. 첫째, 레이다 시스템은 실시간 시스템으로 시스템 내의 메시지와 신호에 대한 반응 시간이 엄격히 제한되어야 한다. 둘째, 다중 임무를 처리하는 레이다 시스템은 동시에 많은 작업들을 수행하므로 이에 따른 스케줄링과 통신, 자원 관리가 필수적이다. 이들은 전체 시스템의 성능과 안전성, 신뢰성에 영향을 미친다. 셋째, 항공기에 탑재되는 레이다는 무게와 부피, 가용 전력 등이 상대적으로 크게 제한된다. 이에 따라 레이다 시스템의 연산 속도 및 메모리 용량이 제한된다. 마지막으로 레이다 시스템은 일반적으로 오랜 기간 운용하기 때문에 높은 신뢰성과 안전성이 요구된다.⁽²⁾

이와 같은 레이다 시스템의 제약 및 요구사항으로 인해 레이다 소프트웨어의 설계가 복잡해지기 때문에 최근에는 모델 기반의 소프트웨어 설계 기법(MBD: Model Based Design)이 도입되고 있다. 모델 기반 설계 기법은 모델을 시스템의 구성 요소와 이들 사이의 관계로 설계하기 때문에 다기능 전투기 레이다와 같이 복잡한 시스템을 설계하는데 적합하다. 지금까지 레이다 신호와 데이터 처리를 설계하고 검증하기 위해 Matlab/Simulink 등 모델 기반

도구를 사용하여 레이다 M&S를 수행한 많은 연구가 있었다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

하지만, 전투기 레이다는 독립된 레이다 단독 체계로서 존재하는 것이 아니며, 항전장비 중 하나로서 전투기 체계와 통합되어 조종사와 HOTAS(Hands On Throttle And Stick, 일체형 조종간), MFD (Multi Functional Display, 다기능 시현장치), HMD(Helmet Mounted Display, 헬멧 시현장치), 그리고 HUD(Head Up Display, 전방 상향 시현장치) 등을 통하여 연동되고 통제된다. 뿐만 아니라, 레이다가 동작하기 위해서는 MC (Mission Computer, 임무 컴퓨터), EWS(Electronic Warfare System, 전자전 체계) 및 미사일 등 다른 전투기 부체계와 연동될 수밖에 없다. 따라서 레이다 시스템의 운용을 설계하고 검증하기 위해서는 전투기 체계 수준에서 레이다와 항전연동을 포함한 M&S를 수행해야 한다.

본 논문은 전투기 체계 수준에서 AESA 레이다 운용을 모의하고 검증하기 위해, 기존의 공학급 레이다 모델을 확장한 항전연동을 포함한 전투기 레이다 체계모의 환경을 제안한다. 제안된 전투기 AESA 레이다 체계모의 환경은

- (3) Garmatyuk Dmitriy, "High-resolution radar system modeling with MATLAB/SIMULINK", Miami University (Oxford, Ohio) Department of Electrical & Computer Engineering, 2006, pp.12-19.
- (4) Chen Chung-Yi, "Modeling and Simulation of a Search Radar Receiver", NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 1996.
- (5) Choi KeungSik, et al., "UML-based Modeling and Simulation Method for Mission-Critical Real-Time Embedded System Development", IASTED Conference on Software Engineering, 2006.
- (6) Hilbertsson Jenny, et al., *Simulation and evaluation of an active electrically scanned array (aes) in simulink*, Chalmers university of technology, 2009.
- (7) Hao Wu, et al., "Modeling and simulation of a full coherent LFM pulse radar system based on Simulink", 2013 International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC), Vol. 1, 2013.
- (8) Vivek R., et al., "Simulation and performance prediction of an UWB radar for active protection system applications", 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016.

(1) Griffiths H. D., Christopher Baker, and David Adamy., *Stimson's introduction to airborne radar*, Scitech Pub Incorporated, 2014.

(2) Hai Li, "Model-Driven Development of Radar Control Software", 2016 8th IEEE International Conference on Signal processing, Vol 4, 2006.

UML(Unified Modeling Language, 통합 모델링 언어)을 사용하여 체계수준의 레이더의 동작상태 및 운용절차를 모의하고 분석한다. 각각의 동작 상태에서 레이더의 신호처리 및 데이터처리는 Matlab/Simulink를 이용하여 공학급 수준의 모델을 구현하였으며, AESA 레이더 설계를 수행하고 결과를 분석하였다. 제안된 체계모의 환경은 임무 수행 절차에 따라 AESA 레이더의 동작상태와 운용절차를 종합적으로 검토하여 체계 설계의 이상, 오류 및 누락 사항 등을 확인하여, 체계운용성을 검증할 수 있다. 뿐만 아니라, AESA 레이더 성능에 대한 분석 및 기능요구도에 대한 검증을 공학급 레이더 모의를 통하여 수행할 수 있어 이를 통해 궁극적으로 항공기 레이더 시스템의 개발 비용을 절약하고 개발 위험성을 낮출 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 일반적인 전투기 탑재 AESA 레이더의 운용모드에 대해 소개하고, 본 논문에서 제안한 전투기 AESA 레이더 체계모의 환경의 구성과 기능에 대해 설명한다. 3장에서는 체계수준의 모의를 위한 UML을 활용한 전투기 레이더 체계모의 환경에 대해 기술한다. 4장에서는 AESA 레이더의 신호처리 및 데이터처리를 위한 공학급 레이더 모델 설계에 대해 설명하고, 5장에서는 제안된 체계모의 환경을 이용한 체계운용 검증 사례를 보인다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론 및 추후연구 내용을 기술하였다.

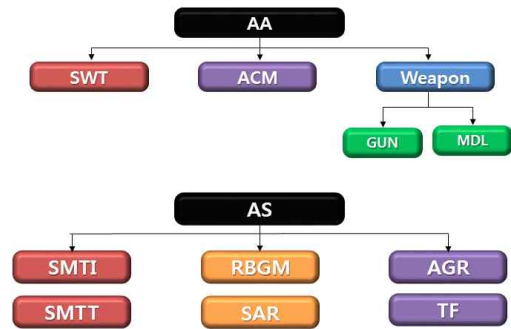
II. 전투기 탑재 AESA 레이더 체계모의 환경

2.1 체계모의 환경 구성

전투기 레이더 체계 모의 환경을 구성하기 위해서는 먼저 전투기 레이더의 운용 모드에 대한 분석이 필요하다. 최근의 전투기 AESA 레이더는 빔을 전자적으로 조사하기 때문에 기존의 기계식 레이더에 비해 빔을 신속하게 조향할 수 있다. AESA 레이더의 향상된 빔 기민성으로 인해 레이더는 다양한 임무를 수행할 수 있어, 조종사가 복잡하고 급변하는 전장 환경을 빠르게 파악할 수 있도록 돕는다. 일반적으로 전투기 레이더의 운용 모드는 대공 표적을 탐지·추적하고 교전 상황을 지원하기 위한 ‘공대공 모드’와 지면과 해상의 영상을 형성하고 표적을 추적하는 ‘공대지/해 모드’로 나눌 수 있다. 또한, 공대지/해 임무 수행 중

대공 상황인식을 동시에 수행하기 위한 ‘동시 운용 모드’로 최근 운용되고 있다.

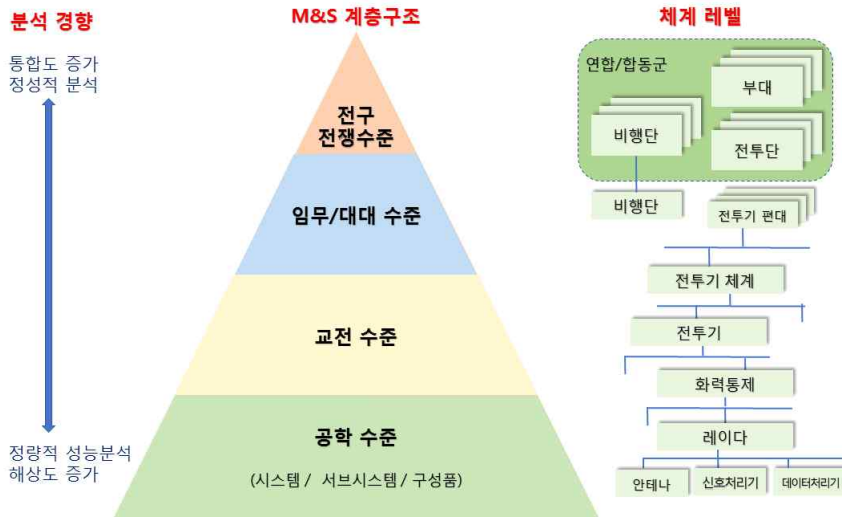
공대공(AA: Air to Air) 모드에는 전방의 적기를 탐색하고 추적하는 SWT(Search While Track, 탐지 중 추적) 모드와 근접 교전을 지원하는 ACM(Air Combat Maneuvering, 근접 전투 기동) 모드 등이 있으며, 이외의 기층 또는 공대공 미사일을 지원하기 위한 무장 지원 기능이 있을 수 있다. 공대지/해(AS: Air to Surface) 모드에는 각각 저해상/고해상도의 지면·해상 영상을 생성하기 위한 RBGM(Real Beam Ground Mapping, 실제 빔 지상지도) 모드와 SAR(Synthetic Aperture Radar, 합성 개구면 레이더) 모드가 있으며, 이동 표적을 탐지·추적하기 위한 SMTI/T(Surface Moving Target Indication/Track, 지표면 이동표적 탐지/추적) 모드가 있다. 여기에 저고도 침투 임무를 지원하기 위한 지형추종(Terrain Following) 모드와 무유도 무장의 투하를 지원하기 위한 AGR(Air to Ground Ranging, 공대지 거리측정) 모드가 추가적일 수 있다. 그림 1은 일반적인 항공기 레이더의 공대공 및 공대지/해 임무를 나타낸다.



<그림 1> 일반적인 전투기 AESA 레이더 운용모드

위와 같은 다양한 전투기 레이더의 운용 모드 모의를 위하여, 본 논문에서는 항공기 레이더 체계레벨과 M&S 계층도와의 관계를 정의하였다. 그림 2는 전투기 AESA 레이더 운용모드를 위한 M&S 계층도와 전투기 레이더의 체계/부체계 구성품 간의 관계를 나타낸다.

계층도 최하단의 공학급 모델은 전투기 레이더와 구성품 모델로서 탐지거리, 추적정확도 등과 같은 기능 및 성능 요구도를 분석하며, 상위 레벨의 모델 구성을 위한 기반으로 사용된다. 바로 위 계층인 교전급 모델은 전투기



<그림 2> 전투기 탑재 AESA 레이더의 체계 M&S 계층도



<그림 3> 전투기 AESA 레이더의 체계모의 환경 구성

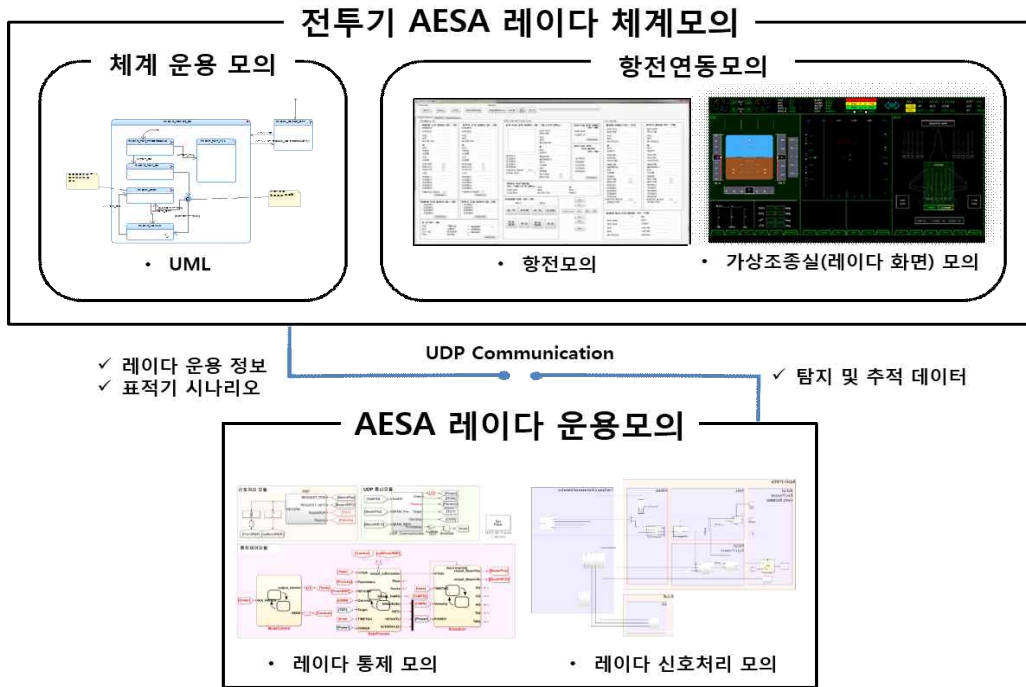
레이더가 전투기의 부체계로서 연동된 것을 모의하며 항공기 레이더의 체계 운용성과 효과도를 분석한다.

2.2 체계모의 환경 구현

본 논문에서 제안된 전투기 AESA 레이더 체계모의의 구성은 그림 3과 같으며, 전투기 레이더 체계모의와 AESA 레이더 운용모의로 이루어진다. 전투기 레이더 체계모의는 레이더의 동작상태와 운용모드를 모의하는 체계운용모의와 각종 항전장치와 연동되어 AESA 레이더 동작에 필요한 정보를 교환하고 정보를 시연하는

항전연동모의로 구성된다. AESA 레이더 운용모의는 신호처리모의와 통제모의로 이루어진다. 신호처리모의는 안테나로부터 방사된 빔이 표적, 대기, 클러터 등으로 모델링된 전파환경을 거쳐 다시 안테나로 수신되는 전파환경과 안테나, 송수신, 신호처리 과정을 모의한다. 통제모의는 신호처리 결과를 바탕으로 표적 탐지·추적 및 빔, 파형 선택 등 AESA 레이더 제어를 수행한다.

본 논문에서는 이를 구현하기 위하여 전투기 체계수준의 레이더 모델은 UML을 사용하여 모델링하였으며, 하단의 공학급 AESA 레이더



<그림 4> 구축된 전투기 AESA 레이더 체계모의 환경

운용모델은 Matlab/Simulink를 사용하여 성능 분석이 가능하도록 계층화하여 구현하였다. 그림 4는 본 논문에서 구현된 전투기 레이더 체계모의 환경을 보여준다. UML을 기반으로 한 모의 기법은 규모가 크고 복잡한 소프트웨어를 구성하고 통합할 때 근래에 주로 사용되고 있다. 특히 레이더 시스템 개발에서 각 구성품의 관계를 모델링하고 운용개념 및 절차를 검증하기 위한 이벤트 기반의 입력이 가능하기 때문에 유용하다. 하지만, 레이더 모의 부분의 데이터 처리 및 신호처리 알고리즘 같은 복잡한 수학적 구현은 UML을 통해 구현하기에 한계점이 많다. 따라서 AESA 레이더 운용모의부는 모드천이, 표적연관·추적, 빔 스케줄링, 신호처리 알고리즘을 포함하는 다양한 수식 함수를 처리하기에 유용한 Simulink 모델을 이용하여 구현하였다.

본 논문에서 구현된 전투기 레이더 체계모의 환경의 각 구성요소는 다음과 같다.

• 전투기 레이더 체계운용 모의

UML을 사용해 전투기 레이더의 구성요소를 LRU 단위의 컴포넌트로 구성하고 각각의 하위부품 컴포넌트는 클래스 다이어그램으로 구현한다. 부품 단위의 동작 설계는 스테이트머신 다이어그램으로 상태 천이를 모사한다. 체계 모의

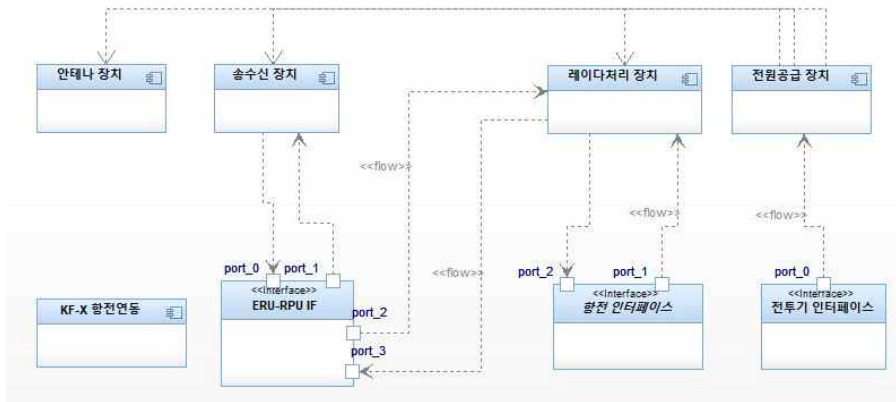
환경에서 레이더 동작 순서, 레이더 BIT(Built In Test) 모의 수행, 레이더 운용모드 제어의 역할을 수행한다. 레이더 운용에 대한 정보를 항전연동모의로 전송하고 MFD 등 조종사 명령 정보를 수신한다.

• 전투기 레이더 항전연동 모의

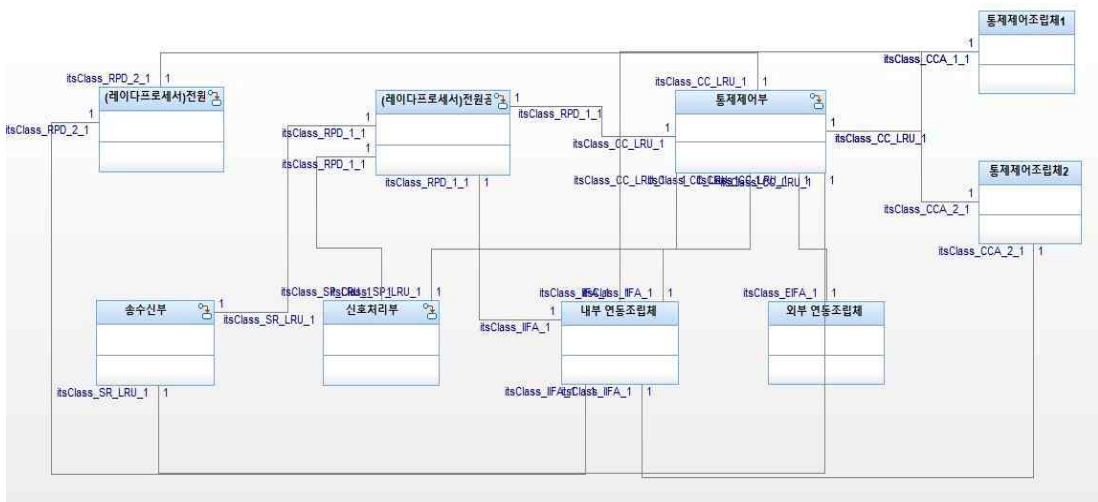
F-35 형상의 MFD 패널을 모사하여 제작하였으며 전원인가, 운용모드 조작, 탐색 범위 설정 등을 수행하여 조종사 명령을 체계운용모의로 실시간 전송한다. 또한, 운용 중에 체계운용모의에서 수신한 표적의 탐지 및 추적 정보를 MFD 화면에 전시한다. AESA 레이더 모델과는 UDP 통신을 통해 표적 정보, 레이더 정보를 교환한다.

• AESA 레이더 통제모의

통제모의부는 체계운용모의부와 UDP 통신을 통해 시나리오, 레이더 운용정보를 전달 받아서 모드천이, 빔 스케줄링과 같은 데이터처리 알고리즘을 수행하고 신호처리모의부에 송신 파형 정보를 전달한다. 신호처리모의부에서 생성된 표적 정보를 수신하여 표적 연관 및 추적 데이터 처리 과정을 거쳐 체계운용 모의부로 탐지·추적 정보를 송신한다.



<그림 5> 전투기 레이더 체계 컴포넌트 다이어그램



<그림 6> 전투기 레이더 체계 클래스 다이어그램

• AESA 레이더 신호처리모의

신호처리 모의는 통제모의에서 송신할 파형 정보를 입력받고 수신될 모의 신호를 생성한다. 수신 신호를 바탕으로 펄스 압축, 도플러 처리, CFAR(Constant False Alarm Rate) 등의 신호처리 알고리즘을 수행한 후 드웰에 대한 표적 정보(plot)를 통제 모의부로 다시 전달한다.

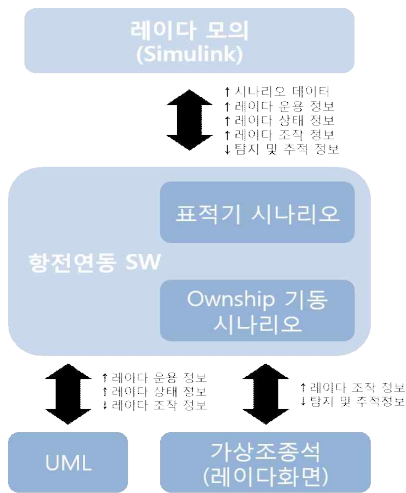
III. 전투기 AESA 레이더 체계모의

3.1 체계운용모의

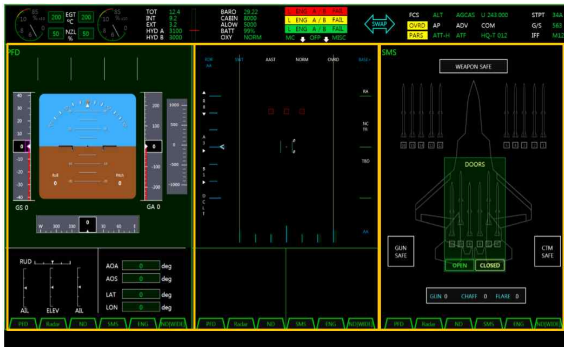
체계운용모의에서는 전투기 레이더 체계운용 설계 내용을 UML로 모델링하고 이를 시나리오 기반의 모의 환경 하에서 모의함으로써 설계 내용의 이상, 오류 및 누락 사항을 검증한다.

그림 5는 전투기 레이더 체계의 컴포넌트 다이어그램이다. 레이더와 항전체계의 연동 구조를 반영하여 레이더처리장치, 전원공급장치, 송수신장치, 안테나장치, 항전인터페이스 및 기타 인터페이스 컴포넌트로 구성된다. 이를 바탕으로 각 구성품의 연결 관계를 고려하여 클래스 다이어그램을 그림 6과 같이 구현하였다.

이후, 컴포넌트의 하위부품단위의 동작 논리 설계를 스테이트머신 다이어그램으로 설계하여 상태 천이 이벤트를 정의하고 천이 조건은 추후 코드 생성을 고려하여 c++ 언어로 표현하였다. 그림 7은 레이더처리장치가 Power ON/OFF 상태인 경우를 스테이트머신 다이어그램으로 설계한 내용이다. 스테이트머신 다이어그램의 기본 상태는 OFF 상태이며 evPowerOn 이벤트가 발생 시, Power_ON 상태로 천이된다. Power_ON



<그림 9> 항전연동 소프트웨어의 기능



<그림 10> 가상조종석의 레이더 MFD 화면

3.2 항전연동모의

항전연동모의는 항전연동 소프트웨어와 가상조종석으로 구성된다. 항전연동 소프트웨어는 그림 9와 같이 구성되며 표적기와 전투기의 기동시나리오 및 조종사 입력 신호와 같은 레이더 체계모의의 데이터를 Simulink로 구현된 AESA 레이더 모의부와 연동시킨다. 또한, AESA 레이더 모의부의 탐지 및 추적 데이터를 수신하여 가상조종석의 레이더 화면에 전송한다.

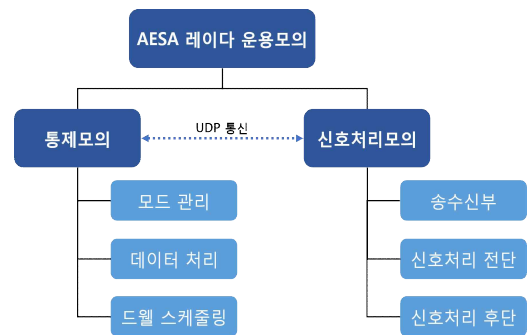
가상조종석은 사용자가 레이더를 조작할 수 있는 화면과 레이더에서 탐지한 정보를 시연하는 역할을 한다. 그림 10은 MFD 화면의 구성을 나타내며 전투기 정보 및 레이더 관련 정보를 시연해준다. 전투기의 위도, 경도, 고도 및 속도 등 항공기의 기동에 관한 정보와 탐지 및 추적 중인 표적 정보를 나타낸다. 또한 동작 중인 레이더의 작동상태, 레이더의 운용모드의 변경, 거리, 방위각, 고각 등 운용파라미터 변경, 레이더 기능 선택 등이 MFD상에서 가능하다.

여기서 변경된 레이더 운용관련 정보는 체계운용모의로 전달되어 작동 중인 레이더 동작 상태에 반영된다.

IV. AESA 레이더 운용모의

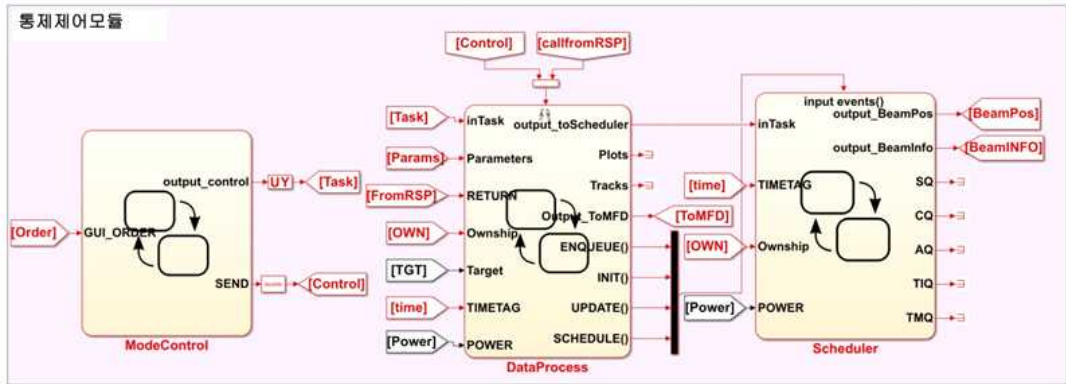
전투기 AESA 레이더는 일반적으로 안테나, 송수신기, 신호 및 데이터 처리장치, 전원 등으로 구성되며, 기능적으로는 크게 전파를 송수신하고 처리하는 신호처리부분과 레이더를 통제하고 제어하는 통제제어부분으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 AESA 레이더 모의를 위해 레이더를 기능적으로 신호모의부와 통제모의부로 나누어 모델링한다. 신호모의부에서는 파형을 선택하여 전파를 송신하며 모의 표적에 반사되어 수신된 레이더 신호를 모사한다. 또한, 수신된 전파를 신호처리하여 표적 정보를 추출한다. 통제모의에서는 레이더의 동작을 전체적으로 통제·제어하고, 신호처리부의 결과를 이용하여 표적을 연관, 추적 및 관리하는 역할을 수행한다.

그림 11은 AESA 레이더 운용모의의 기능구성도이다. 레이더 운용모의는 Simulink와 Stateflow를 이용하여 구현한다. 레이더를 하드웨어 또는 기능 모델로 추상화할 수 있는 시스템의 구성 요소는 Simulink를 활용하였다. 레이더의



<그림 11> AESA 레이더 운용모의 기능구성도

상태, 이벤트, 시간 조건 및 외부 입력 신호에 대한 순차식 의사 결정 논리를 모델링하기 위해서 Stateflow를 활용하였다. Simulink와 Stateflow를 활용한 모델 기반의 시뮬레이션은 제한된 자원 하에서 높은 신뢰성이 요구되고 복잡한 환경 변수를 고려해야 하는 전투기 AESA 레이더 설계에서 시스템의 중요 특성 및 결함을 발견하는데 효과적이다.



<그림 12> AESA 레이더 통제모의 Simulink 구현

4.1 통제모의

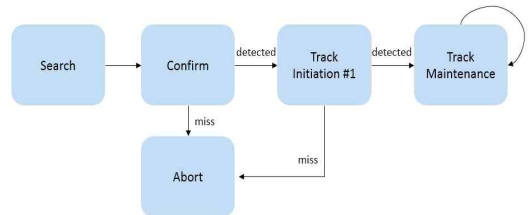
4.1.1 통제모의 기능 및 구성

통제모의는 그림 12와 같이 모드관리 모델, 데이터처리 모델, 드웰 스케줄링 모델로 구성되어있다. 먼저, 모드관리 모델은 외부명령을 수신하여 전원 인가, 운용모드 선택, 탐색영역 설정, 기능 변경을 포함하는 레이더 전반의 제어를 담당한다. 데이터처리 모델은 모드관리 모델의 명령을 수신하여 레이더의 탐색영역을 설정하고 신호모의부의 데이터를 수신하여 표적 연관, 표적 추적을 수행한다. 또한, 송신해야할 빔에 대한 정보를 생성하여 드웰 스케줄링 모델에 전달한다. 드웰 스케줄링 모델은 탐색빔(Search beam) 큐, 확인빔(Confirm beam) 큐, 추적 정보 획득빔(Track initiation beam) 큐, 추적유지(Track maintenance beam) 큐로 구성되며, 각 빔에 따라 큐에 설정된 시간 주기로 큐의 값을 추출해서 그 값에 해당되는 빔을 방사하라는 명령을 신호처리모의부의 송수신모델로 보낸다.

신호처리모의부로부터 해당 빔의 신호처리 결과 데이터를 수신한다. 수신한 데이터는 데이터 연관을 위해 좌표계 변환을 하고 추적 연관과 plot 연관을 수행한다. 일정한 주기로 운용모드마다 가지는 큐 데이터가 생성되고 임무 우선순위에 맞게 모드 천이를 실시한다. 모드 천이 후 송신 파형이 결정되면 다시 빔 송신 요청을 하며 이와 같은 과정이 반복된다.

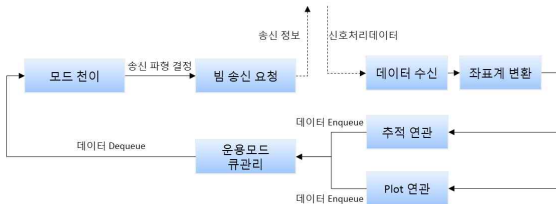
4.1.2 모드관리 모델

모드관리는 모드와 이에 따른 빔 운용 절차를 관리하며 그림 14와 같다. 공대공 운용모드 중 SWT모드가 수행되면 먼저, 탐지가 수행되고 전방에 탐지영역에 표적에 대한 탐지 빔을



<그림 14> 공대공 모드에서 운용절차

방사한다. 지속적인 탐지 중 표적이 감지되면 일정 시간 후 표적의 거리 정보를 획득하기 위한 확정 빔을 표적 예측 위치로 방사한다. 이 때 표적이 발견되지 않으며, 그 표적에 대한 정보는 삭제한다. 확정 빔을 통해 표적의 존재가 확실해지면 추적을 개시하기 위한 추적정보획득 빔 및 추적유지 빔을 연속적으로 방사하여 표적이 발견되면 추적을 개시한다.

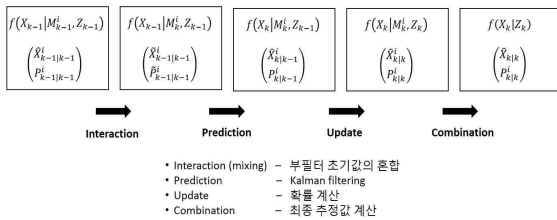


<그림 13> AESA 레이더 통제모의 기능흐름도

그림 13은 통제모의부의 기능 흐름도이다. 먼저, 통제모의부는 탐색 빔, 확인 빔, 추적개시 빔 및 추적유지 빔의 송신 요청을 한 후에

4.1.3 데이터처리 모델

데이터 처리는 수신된 데이터를 기존에 관리되고 있는 표적데이터와 연관시키고 표적을 추적하고 관리하는 기능을 수행한다. 레이더 데이터 처리를 위한 데이터 연관 기법으로 NN(Nearest Neighbor) 방법은 적은 연산량과 충분한 성능으로 많이 사용되고 있다.(9) 이것은 측정값과 예측 값 사이의 NDS(Normalized Distance Square) 값이 최소가 되는 plot을 찾아서 추정 값을 연관 시키는 방법이다. 측정값이 들어오게 되면 추적 리스트 데이터에서 예측 값 사이의 거리를 구하고 항공기의 최대 이동 가능 거리와 비교한다. 최대 이동 거리 내에 존재하는 표적 데이터 중에서 측정값과 거리가 가장 가까운 표적 데이터를 선정하고 연관에 사용한다.



<그림 15> IMM 필터의 추정 과정

추적 알고리즘으로는 표적의 다양한 기동을 고려하기 위하여 IMM(Interacting Multiple Model Filter) 기법을 구현했다. IMM은 다양한 기동 모델을 가정하고 각각의 모델마다 확률을 계산하여 가중치 합으로 표적의 위치를 추정하는 기법이다. 그림 15는 IMM의 표적 추적 과정을 나타낸다. IMM은 그림 15와 같이 Interaction, Prediction, Update 및 Combination, 4단계로 구성되며 각 단계의 확률밀도함수는 Bayes' Rule을 통해 계산된다.(10)

4.1.4 드웰 스케줄링 모델

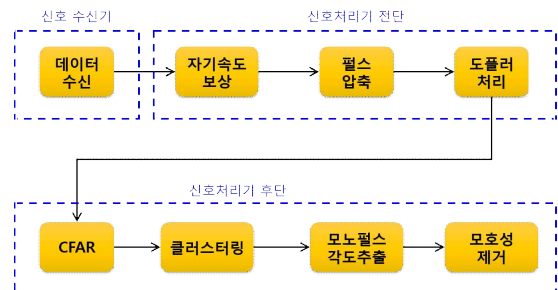
드웰 스케줄링 모델은 빔 방사가 요청되면 해당 빔의 임무에 맞게 우선순위를 부여하고

<표 1> 임무에 따른 빔 방사 우선순위

Dwell	Priority
Track Maintenance	1
Track Initialization	2
Confirm	3
Search	4

스케줄링하는 역할을 한다. 스케줄링 기법으로는 두 가지 개념이 적용되었는데 먼저 요청된 빔을 먼저 처리하는 ERF(Early Request First)와 높은 우선순위를 갖는 빔을 먼저 처리하는 HPF(High Priority First)가 있다. 빔의 종류에 따른 우선순위는 표 1과 같이 설정하였으며, 이 순서에 따라 HPF 기법에 따라 빔이 방사된다. 우선순위 선정 후, 각각의 빔 종류별로 ERF 기법을 사용하여 먼저 요청된 빔이 먼저 처리되도록 FIFO(First In First Out) 형태로 구현하였다.

4.2 신호처리모의



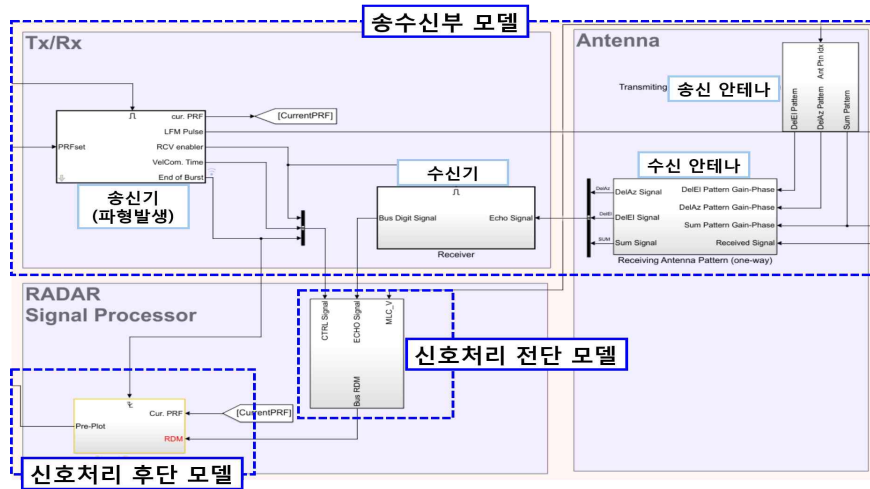
<그림 16> AESA 레이더 신호처리모의 기능흐름도

AESA 레이더 신호처리모의부는 송수신부 모델과 신호처리부 모델로 이루어져 있다.(11) 송수신부 모델에서는 일정한 시간 간격으로 레이더 펄스를 생성하고 레이더 신호가 송신, 전파 및 수신 과정을 거치며 겪는 신호의 변화를 모델링한다. 신호처리부 모델에서는 레이더 시스템 각 구성 요소의 처리 주기에 따라 안테나에서 수신된 신호를 가공하여 신호 처리하는 과정을 모델링한다. 신호처리 모델은 신호처리 전단 모델과 신호처리 후단 모델로 이루어져있다. 그림 16은 파이프라인으로 구성된 신호처리 모델의 전체 개요이다.

(9) Mark A. Rechards, *Principles of Modern Radar: Basic Principles*, SciTech Publish Inc., 2010.

(10) Blom Henk AP, et al., "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients", IEEE Trans. Automatic Control, vol.33 no.8, 2009, pp 780~783.

(11) Skolnik Merrill, et al., *Radar handbook* Electronics electrical engineering McGraw-Hill Education, 2008.



<그림 17> AESA 레이다 신호처리모의 Simulink 구현

신호처리기 전단에서는 표적 탐지를 위한 신호의 전처리가 이루어진다. 수신기로부터 전달받은 신호는 하나의 펄스 단위 별로 펄스 압축이 이루어지고, 펄스 압축이 이루어진 후 CPI(Coherent Processing Interval) 동안 펄스 압축된 신호들을 모아 도플러 처리를 수행하여 2차원 거리-도플러 맵을 생성한다. 신호처리기 전단에서 생성된 2차원 거리-도플러 맵은 신호처리기 후단으로 전달되어 표적 탐지를 위한 처리를 거치게 된다. CFAR(Constant False Alarm Rate) 검출기를 통해 표적으로부터 기인한 데이터를 필터링하고, 이에 대해 hit clustering 및 모노펄스 각도 추출을 수행하여 표적의 거리와 속도에 대해 모호성을 가지고 있는 pre-plot 정보를 생성한다.

그림 17은 Simulink로 구현된 AESA 레이다의 신호처리모의부이다. 신호처리 모델은 통제모의부와는 달리 파이프라인 구조를 갖는다. 통제모의부로부터 레이다 빔 방사 명령과 이에 대한 세부 정보가 전달되면 파형 발생부에서 송신 신호와 이에 따라 송수신부 및 신호처리부를 제어하는 신호를 생성한다. 파형 발생부에서 생성된 신호는 송신 안테나 모델과 레이다 방정식 기반으로 모델링 된 신호전파 모델을 거치고, 수신 안테나 모델을 지나 다시 수신기 모델로 입력된다. 수신기 모델에서 출력된 신호는 레이다 신호처리부 모델로 입력되어 일련의 신호처리 과정을 거치게 된다.

4.2.1 송수신부 모델

송수신부에서는 레이다에서 빔이 방사되고, 표적에 반사되어 이를 수신하는 과정을 모델링한다. 송수신부 모델에서는 레이다 시스템 기능에 따라 레이다 파형 발생부, 안테나부, 수신부를 모델링한다. 또한 레이다 빔이 방사되고 표적에 반사되어 돌아오는 신호의 전파 과정을 모델링한다.

레이다 송수신부 모델은 파형 발생부와 수신부로 구성되어있다. 파형 발생부에서는 안테나를 통해 방사되는 LFM(Linear Frequency Modulation) 펄스 신호와 안테나의 송수신 상태에 따라 레이다 수신부 및 신호처리부를 제어하기 위한 제어 신호를 생성한다. 레이다 통제모의부는 레이다의 운용 모드 및 기능에 따라 레이다의 송신 파형을 다르게 사용하므로, 파형 발생부는 통제모의부가 정한 레이다 송신 파형 정보를 수신하여 아날로그 송신 파형을 만든다.

안테나부에서는 통제모의부가 명령한 안테나 조향 방향에 따라 안테나 빔 패턴을 적용하여 송신 및 수신 신호의 이득 및 위상에 대한 안테나 효과를 모델링한다. 본 논문에서 구현된 모델의 안테나 패턴은 LUT(Look-Up Table)의 형태로 구성되어있다.

수신부 모델에서는 파형 발생부에서 생성된 수신부 제어 신호에 따라 표적으로부터 반사된 신호를 수신한다. 수신기 모델에서는 표적으로부터 반사되어 돌아온 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. 표적에서 반사된 신호를 제외한

대부분의 신호는 레이다 수신기에서 잡음으로 간주하여 모델링하였다. 본 논문에서는 수신기의 잡음 모델링 시, Noise Figure, 수신기 이득 및 각종 시스템 잡음 손실 요소들을 고려하였다.

마지막으로 신호 전파 모델은 레이다 방정식에 기반을 두고 구성한다. 안테나에서 빔이 방사되고 표적에 반사되어 수신 안테나로 돌아오는 모든 경로 상에서 신호제기의 이득 및 손실 요인과 위상의 변화 요인을 모델링하였다.(12)

4.2.2 신호처리 전단 모델

신호처리 전단 모델에서는 수신기로부터 전달된 신호에서 표적 정보를 추출하기 위한 전처리를 수행한다. 수신된 신호는 먼저 플랫폼의 움직임으로 인한 수신 신호의 도플러 효과를 보상하기 위해 자기 속도 보상을 수행한다. 이 후, 수신 신호의 SNR(Signal to Noise Ratio)을 개선하고, 반사 신호의 거리 지연을 확인하기 위해 펄스 압축을 수행한다. LFM(Linear Frequency Modulation) 펄스에 대한 압축은 정합 필터를 통해 계산되며 다음의 수식과 같다.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r(k)S^*(n-k)$$

여기서, N 은 수신 신호 샘플의 개수이고, $r(k)$ 는 수신 신호, S^* 는 기준 LFM 펄스의 켈레복소 신호로 펄스 압축은 수신 신호와 송신 파형의 상관 연산으로 수행한다.(13)

펄스 압축이 이루어진 후, 표적 탐지를 위해 도플러 처리를 수행한다. 표적 탐지를 직접적으로 수행하기 위해 CPI동안 수집된 신호를 2차원의 fast-time/slow-time 매트릭스로 구성한다. 그 후, 각각의 거리 빈(range bin)마다 스펙트럼 분석을 수행할 수 있도록 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 range-doppler map을 생성한다.

4.2.2 신호처리 후단 모델

신호처리 후단 모델에서는 표적정보를 추출하는 기능으로 구성되어 있다. 신호처리기

전단에서 전달된 2차원의 range-doppler map에서 직접적으로 표적 정보를 추출한다.

(1) CFAR(Constant False Alarm Rate)

CFAR 검출기는 Neyman-Pearson 판별법에 기반을 두고 표적을 탐지한다. Neyman-Pearson 판별법에서는 오경보율이 일정 값을 넘지 않는 범위 내에서 탐지 확률을 최대화 하는 문턱값을 정하고, 이 문턱값을 기준으로 표적의 존재 여부를 판단한다. Neyman-Pearson 판별법을 적용하기 위해서는 레이다의 열잡음 확률 분포를 알고 있어야한다. 그러나 열잡음 확률 분포의 종류는 알 수 있지만 확률 분포의 평균이나 표준편차와 같은 파라미터는 알 수 없으므로, 문턱값을 계산하기 위해서는 레이다의 잡음 수준을 측정해야 한다. 본 논문에서는 제곱 검파기(Square Law Detector)를 활용한 CA(Cell Averaging)-CFAR를 모델링하였다.(14)

(2) 클러스터링 및 모노펄스 각도 추출

클러스터링은 CFAR 처리 결과로 생성된 hit map에서 인접한 셀들은 하나의 표적에서 반사된 것이라는 가정을 바탕으로 한다. 인접한 셀들을 하나의 군집으로 묶고, 그 중에서 최대 출력을 갖는 요소를 그 군집의 대푯값으로 설정하여 해당 군집의 pre-plot을 추출한다. 모노펄스 각도 추출은 합 채널과 차 채널의 신호 세기의 비를 이용하여 pre-plot의 방위 방향 오차와 고각 방향 오차를 산출하는 과정이다.

(3) 모호성 제거

레이다에서 동일한 펄스를 여러 번 반복해서 보내면, 표적에 반사되어 수신된 펄스 신호가 몇 번째 펄스로부터 반사된 것인지 알 수 없다. 표적의 거리를 알 수 없기 때문이다. 따라서 레이다로 측정된 표적의 거리는 아래의 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{tgt} = pR_{ambiguous} + R_{apparent}$$

$$R_{ambiguous} = \frac{c}{PRF}$$

표적과 레이다 간의 거리 R_{tgt} 는 송신 펄스의 PRF(Pulse Repetition Frequency)와 빛의 속도

(12) Mahafza Bassem R., et al., "MATLAB simulations for radar systems design", Chapman and Hall/CRC, 2003.

(13) Palmer Robert D., *FUNDAMENTALS OF RADAR SIGNAL PROCESSING*, Bulletin of the American Meteorological Society, 2008.

(14) Venter C. J., et al., "Implementation of the CA-CFAR algorithm for pulsed-Doppler radar on a GPU architecture", 2011 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies(AEECT), 2011.

<표 2> 모의 시나리오 수행 절차

절차	실행 항목	확인 사항
1	Power ON ↔ Power OFF	GUI 화면, Simulink 화면
2	PBIT 절차 진행 점검 / 고장 모의	GUI 화면 (PBIT OK, NO RAD)
3	항공기 이륙 후 운용 상태 모의	WOW OFF event 진입
4	레이다 운용모드 전환	공대공 ↔ 공대지/해
		SWT ↔ ACM
		SMTI ↔ DBS/SAR
5	공대공 교전 시나리오 시연	GUI 화면 Simulink 동작

c 에 의해 결정되는 모호 거리 $R_{ambiguous}$ 가 정수 p 만큼 반복된 거리와 신호처리에 의해 측정된 명확한 거리 $R_{apparent}$ 의 합으로 표현한 것이다. 이와 마찬가지로 표적의 속도 V_{tgt} 은 송신 펄스의 PRF와 빛의 속도 c , 중심 주파수 f_c 에 의해 결정되는 모호 속도 $V_{ambiguous}$ 가 정수 q 배만큼의 속도와 신호처리에 의해 측정된 명확한 속도 $V_{apparent}$ 의 합으로 아래 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{tgt} = qV_{ambiguous} + V_{apparent}$$

$$V_{ambiguous} = \frac{cPRF}{2f_c}$$

하나의 PRF가 가지는 표적의 거리와 속도 측정에 대한 모호성은 여러 종류의 PRF를 사용하여 해소할 수 있다. 다양한 PRF의 조합을 통해서 거리와 속도의 모호성에 대한 수식을 만족하는 거리와 속도를 추정하는 것이다. 이 때, 필요한 것은 표적의 거리와 속도에 대한 위의 두 수식에서 모호성을 갖는 거리와 속도가 반복되는 횟수를 나타내는 p 와 q 를 이용하여 표적의 거리와 속도에 대한 후보를 만드는 것이다. 이 때, 정수인 p 와 q 의 범위를 정하는데, 운용 전략에 따라 표적에 대한 최대 탐지 거리 R_{max} 및 표적의 최소 속도 V_{min} , 최고 속도 V_{max} 에 의해 아래 수식과 같이 결정할 수 있다.

$$pR_{ambiguous} \leq R_{max}$$

$$V_{min} \leq qV_{ambiguous} \leq V_{max}$$

위 수식에 의해 결정된 p 와 q 의 조합에 따라 해당 PRF에서 표적의 거리와 속도 후보군이 결정된다. 여러 PRF에서 생성된 표적의 거리와 속도 후보군을 모두 모아, 이들 간에 유사성을 판단하여 최적의 표적 거리와 속도를 도출하게 된다. 이 때, 후보군들을 비교하고 이들 간의 유사성을 판단하여 신뢰성 높은 해를 도출하기까지 많은 경우의 수가 발생하기 때문에 이 방법을

최적화 시키는 게 중요하다. 본 논문에서는 CRT(Chinese remainder theorem) 알고리즘을 모델링하였다.⁽¹⁵⁾

V. 체계운용 모의 검증 사례

이번 장은 본 논문에서 구현한 전투기 AESA 레이더 체계모의 환경을 이용하여 설계된 레이더를 검증한 결과를 정리하였다. 모의 결과를 통하여, AESA 레이더 신호처리 및 표적추적 알고리즘이 반영된 전투기 탑재 레이더의 체계운용 절차 및 공대공 모드운용 절차를 확인할 수 있었다.

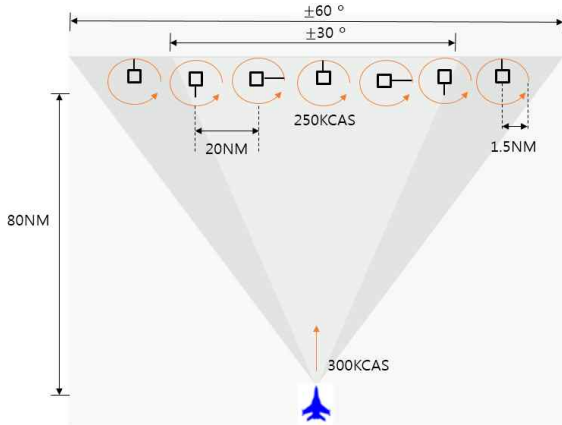
5.1 체계운용 모의 시나리오

전투기 탑재 AESA 레이더의 체계운용 절차를 검증하고 레이더 탐지 성능을 확인하기 위하여 일반적인 공대공 레이더 운용 절차를 설정하였다. 먼저, 조종사가 조종석에 착석한 후 레이더 전원을 인가하여 자체점검(BIT) 절차를 수행한다. 전투기가 이륙한 후 적기와 조우하면 운용모드를 조작하여 적기를 탐지/추적하며 공대공 교전을 수행한다.

표 2는 체계운용 검증 시나리오의 절차이다. 전원인가절차는 가상조종석 MFD 상에서 Power ON/OFF 입력에 따른 레이더의 전원인가 여부를 확인한다. 자체점검 수행은 PBIT 절차를 레이더 내부적으로 수행하며 결과를 레이더 화면에 표시한다. PBIT이 완료되고 아직 레이더가 동작 상태로 진입하기 전에는 NO RAD라고 화면에

(15) Kronauge Matthias, et al., "Radar target detection and Doppler ambiguity resolution", 2010 11th International. IEEE Radar Symposium (IRS), 2010.

도시된다. 이후, 항공기가 이륙하면 (WOW OFF 이벤트 발생) 레이다는 동작 상태로 진입하며, 레이다 운용화면이 MFD에 도시된다. 이륙 후에는 공대공-공대지/해 모드들을 전환하며 운용모드의 전환이 운용 개념에 맞게 이뤄지는지 확인한다. 마지막으로 가상 적기와 의 공대공 교전 시나리오를 수행한다.

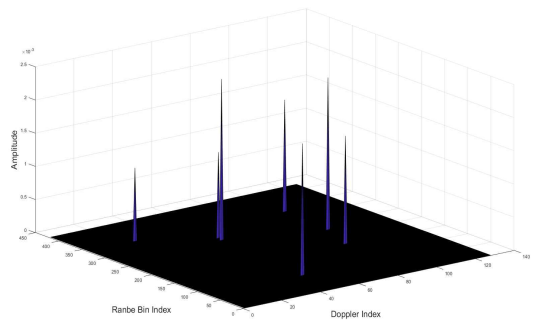


<그림 18> 공대공 교전 시나리오 상황 모사도

공대공 교전 시나리오는 그림 18과 같다. 적기 7대가 20NM 간격으로 전투기의 진북 방향으로 80NM 거리에 위치한다. 적기는 1.5NM 반경으로 250KCAS로 회전하며, 전투기는 300KCAS로 표적을 향해 접근한다. 레이다는 공대공 SWT모드의 Azimuth $\pm 30^\circ$, 2 bar 설정으로 탐색 및 추적을 수행한다.

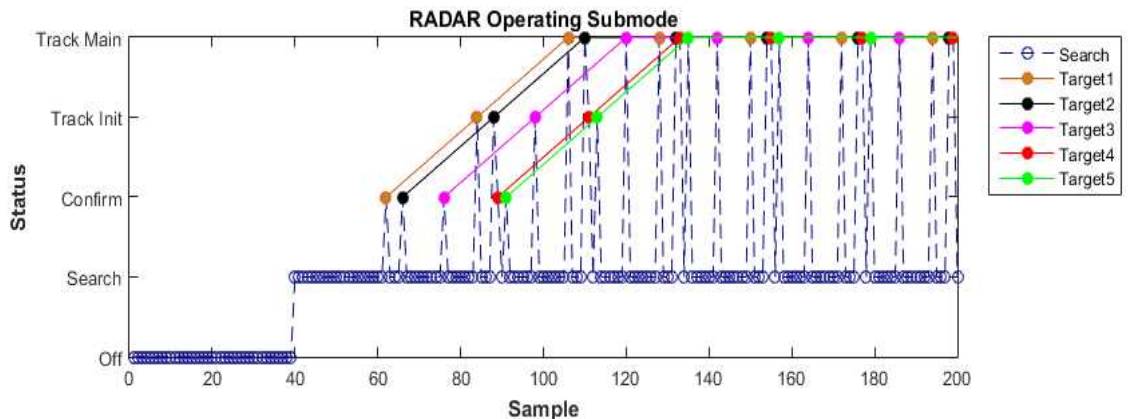
5.2 체계운용 모의 결과

그림 19는 교전 시나리오 상에서 표적 관리 상태를 도시한 것이다. 동작 상태에 진입 후, 전투기 레이다는 전방을 향해 탐지(search) 빔을 방사하기 시작한다. 탐지범위 안에 표적들이 탐지되면 자동추적 모드에 진입하게 되고 주기적으로 추적을 수행한다. 따라서 표적들이 탐색되는 순서대로 탐지, 확인, 추적개시를 거쳐 추적이 수행되는 것을 확인할 수 있다.

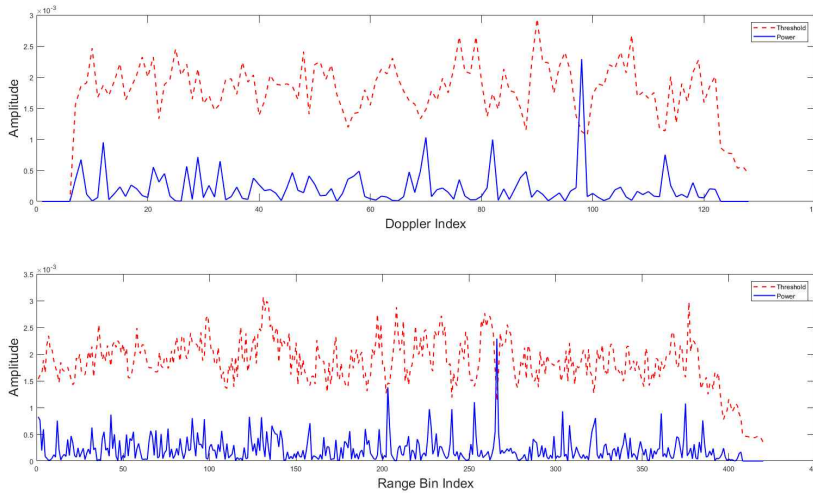


<그림 20> CFAR 처리 결과 추출된 hit 셀

그림 20은 일련의 신호처리 과정 중 CFAR 처리 결과, hit로 추출된 셀을 나타낸다. 그림 21는 hit로 추출된 셀 중 예시로 하나의 셀에 대해 자세히 살펴본 결과이다. CFAR 처리 시 문턱값으로 사용된 잡음 수준에 대한 추정값과 CFAR에 입력된 신호 세기를 도플러 방향과 거리 방향에 대해 표현하였다. AESA 레이다 운용모의를 통하여, 탐지거리, 추적성능 등의 레이다의 기능 및 성능이 반영된 체계운용 모의를 수행할 수 있었다.



<그림 19> 전투기 AESA 레이다 통제모의의 표적관리(SWT모드, $\pm 30^\circ$, 2bar)



<그림 21> 전투기 AESA 레이더 신호처리모의의 도플러 방향과 거리 방향에 대한 CFAR 잡음 추정값 및 입력 신호의 세기

VI. 결론 및 추후 연구

참고문헌

본 연구에서는 전투기 탑재 AESA 레이더의 체계수준의 레이더 운용을 모의하고 검증하기 위해, 기존의 공학급 레이더 모의를 확장하여 항전연동을 포함한 AESA 레이더의 체계모의 환경을 제안하였다. 제안된 전투기 AESA 레이더의 체계모의 환경은 모델 기반의 설계 기법을 적용하여 레이더 체계수준의 동작 상태 및 운용 절차는 UML을 사용하여 모델링하였고, 공학급 레이더 모델은 Simulink를 기반으로 구현하였다. 모의 환경을 이용한 체계운용 검증 사례를 통하여, AESA 레이더의 신호처리 및 표적추적 알고리즘이 반영된 전투기 레이더의 체계운용 절차 및 공대공 모드운용 절차를 확인할 수 있었다.

추후, 구현된 체계모의 환경을 기반으로 공대지/해 모드를 추가하여 전체 레이더 운용모드를 완성할 계획이다. 이를 바탕으로, 개발 중인 전투기 탑재 레이더의 공대공, 공대지/해, 동시운용모드의 체계운용성과 목표성능을 비행시험 사전에 분석하고 검토할 계획이다. 체계모의 환경은 레이더 개발의 위험성을 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 레이더를 이용한 군 전술 개발 및 훈련장비로 활용될 것으로 기대된다.

[1] Griffiths H. D., Christopher Baker, and David Adamy., *Stimson's introduction to airborne radar*, Scitech Pub Incorporated, 2014.

[2] Hai Li, "Model-Driven Development of Radar Control Software", 2016 8th IEEE International Conference on Signal processing, Vol 4, 2006.

[3] Garmatyuk Dmitriy, "High-resolution radar system modeling with MATLAB/SIMULINK", Miami University (Oxford, Ohio) Department of Electrical & Computer Engineering, 2006, pp.12-19.

[4] Chen Chung-Yi, "Modeling and Simulation of a Search Radar Receiver", NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 1996.

[5] Choi KeungSik, Jung SungChul, Kim HyunJung, Bae doo-Hwan and Lee DongHun, "UML-based Modeling and Simulation Method for Mission-Critical Real-Time Embedded System Development", IASTED Conference on Software Engineering, 2006.

[6] Hilbertsson Jenny and Josefina Magnusson, *Simulation and evaluation of an active electrically scanned array (aesa) in simulink*, Chalmers university of technology, 2009.

- [7] Hao Wu and Zhao Hong-zhong, "Modeling and simulation of a full coherent LFM pulse radar system based on Simulink", 2013 International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC), Vol. 1, 2013.
- [8] Vivek R., S.Piramasubramanian, M. Ganesh Madhan and J.Roopchand, "Simulation and performance prediction of an UWB radar for active protection system applications", 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016.
- [9] Mark A. Recharads, *Principles of Modern Radar: Basic Principles*, SciTech Publish Inc., 2010.
- [10] Blom Henk AP and Yaakov Bar-Shalom, "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients", IEEE Trans. Automatic Control, vol.33 no.8, 2009, pp 780~783.
- [11] Skolnik Merrill and L. B. Wetzel, *Radar handbook*, Electronics electrical engineering. McGraw-Hill Education, 2008.
- [12] Mahafza Bassem R. and Atef Elsherbeni, "MATLAB simulations for radar systems design", Chapman and Hall/CRC, 2003.
- [13] Palmer Robert D., *FUNDAMENTALS OF RADAR SIGNAL PROCESSING*, Bulletin of the American Meteorological Society, 2008.
- [14] Venter C. J., H. Grobler, and K. A. AlMalki, "Implementation of the CA-CFAR algorithm for pulsed-Doppler radar on a GPU architecture", 2011 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies(AEECT), 2011.
- [15] Kronauge Matthias, Christoph Schroeder, and Hermann Rohling, "Radar target detection and Doppler ambiguity resolution", 2010 11th International. IEEE Radar Symposium (IRS), 2010.