

연구논문

레이저 추적 시스템을 위한 레이더 시스템 개발

성기평[†], 임형철, 최만수, 유성열

한국천문연구원

Development of Radar System for Laser Tracking System

Ki-Pyoung Sung[†], Hyung-Chul Lim, Man-Soo Choi, Sung-Yeol Yu

Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea



Received: January 8, 2024

Revised: January 16, 2024

Accepted: February 6, 2024

[†]Corresponding author :

Ki-Pyoung Sung

Tel : +82-42-865-2079

E-mail : kpsung@kasi.re.kr

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Ki-Pyoung Sung

<https://orcid.org/0000-0003-2639-4127>

Hyung-Chul Lim

<https://orcid.org/0000-0001-5266-1335>

Man-Soo Choi

<https://orcid.org/0000-0003-2019-3615>

Sung-Yeol Yu

<https://orcid.org/0000-0002-9571-1985>

요약

한국천문연구원이 개발한 인공위성 레이저 추적 시스템(satellite laser ranging, SLR)은 지상에서 극초단파 펄스 레이저를 발진하여 우주물체를 추적하는 관측 영역에서 레이저에 의해 비행체가 피폭되지 않도록 사전에 이를 탐지하고, 레이저 발진을 중지시키는 것을 목적으로 비행체 감시 레이더 시스템을 거창 SLR 시스템에 개발하였다. 개발한 비행체 감시 레이더 시스템은 고주파대역(X-band) 레이더로 SLR 시스템이 지향하는 방향에 라디오 주파수(radio frequency, RF) 펄스 신호를 송신하고 수신하는 RHS(radar hardware subsystem)와 SLR 운영시스템과 인터페이스를 유지하면서 RHS로부터 획득한 RF 펄스 신호를 바탕으로 비행체 검출 여부 판단 및 레이저 발진을 중지시키는 MCS(main control subsystem)로 구성하였다. 본 논문에서는 비행체 감시 레이더 시스템을 구성하는 RHS와 MCS 설계 내용을 기술하고, SLR 운영시스템과의 인터페이스 및 운용 시나리오를 제시한다. 개발된 비행체 감시 레이더 시스템은 항공기를 이용한 실증 시험을 통해 비행체 검출 및 레이저 중지 신호를 발생하는 것을 확인하여 검증하였다.

Abstract

Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) developed an satellite laser ranging (SLR) system for tracking space objects using ultra-pulsed lasers. For the safe operation of SLR system, aircraft surveillance radar system (ASRS) was developed to prevent human damage from high power laser transmitted from the SLR system. The ASRS consists of the radar hardware subsystem (RHS) and main control subsystem (MCS), in order to detect flying objects in the direction of laser propagation and then stop immediately the laser transmission. The RHS transmits the radio frequency (RF) pulse signals and receives the returned signals, while the MCS analyzes the characteristics of received signals and distinguishes the existence of flying objects. If the flying objects are determined to be existed, the MCS sends the command signal to the laser controller in SLR system to pause the laser firing. In this study, we address the interface and operational scenarios of ASRS, including the design of RHS and MCS. It was demonstrated in the aircraft experiments that the ASRS could detect an aircraft and then stop transmitting high power laser successfully.

핵심어 : 인공위성 레이저 추적시스템, 우주물체 추적 시스템, 비행체 감시 레이더

Keywords : satellite laser ranging, space object tracking system, aircraft surveillance radar

1. 서론

SLR(satellite laser ranging) 시스템은 우주물체를 대상으로 지상에서 레이저를 발진하여 지상으로부터 표적까지의 거리를 정밀하게 측정하는 시스템이다. 여기서, 우주물체는 인공위성과 우주쓰레기를 포함하며 지상에서 거리 데이터를 제공하는 시스템 중 SLR 시스템은 현존하는 가장 정밀한 거리 측정 데이터를 산출한다. 이 데이터는 국제기구 ILRS(International Laser Ranging Service)에 제공되어 측지학, 지구 과학, 우주물체 정밀궤도 결정 등 다양한 연구 데이터로 활용되고 있다[1-3].

SLR 시스템을 이용한 우주물체 추적은 지상에서 발진한 레이저에 의해 항공기 조종사의 일시적 또는 영구적인 시력 상실, 섬광 실명 등으로 인한 인명 사고로 이어질 수 있다[4,5]. 따라서, SLR 시스템은 레이저 발진 방향에 비행체 존재 유무를 감지하고 검출 시 자동으로 레이저 발진을 중지시킴으로써 레이저 발진 중 레이저에 의한 비행체 안전을 확보해야 한다. 여기서, 비행체는 항공기를 포함한 공중에 날아다니는 모든 물체를 말하며 패러글라이딩, 행글라이더, 스카이다이빙, 새떼 등 레이저에 의해 피해가 발생할 수 있는 모든 것을 의미한다.

이러한 문제를 방지하기 위해 전 세계 SLR 시스템에서는 비행체 안전을 확보하기 위한 다양한 방법을 사용한다. 국제기구 ILRS에 보고된 비행체 검출 방법은 광학 카메라 및 모니터를 통해 식별하는 방법, 자동종속감시시설 방송(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B) 수신 데이터를 통해 식별하는 방법, 항공 교통 관제(air traffic control, ATC) 수신 데이터를 통해 식별하는 방법, 적외선(infrared ray, IR) 카메라를 통한 식별 방법, 관측자의 육안으로 확인하는 방법 등이 있다[6]. 그 중 많은 SLR 시스템에서 활용하고 있는 비행체 검출 방법은 레이더 시스템을 이용하여 비행체의 안전을 확보하는 방법이다. 레이더는 다양한 센서로부터의 정보를 이용하여 생성한 레이저 차단 신호를 바탕으로 독립적으로 레이저 제어가 가능하고, 낮은 유지비용 및 지향 정밀도가 높다는 장점이 있어 SLR 시스템에서 많이 활용되고 있다[7,8].

본 논문에서는 거창 SLR 시스템의 비행체 감시 레이더 시스템 운용 개념 및 시스템 설계에 대해 기술하고, 항공기를 활용한 실증 실험으로 지향 방향의 비행체 검출신호 및 레이저 차단 신호를 확인하여 시스템을 검증하였다[9].

2. 거창 비행체 감시 레이더 시스템 개요

비행체 감시 레이더 시스템은 SLR 시스템의 레이저 빔 발진 방향에 비행체를 감시하고 검출하여 독립적으로 레이저 발진을 멈추는 용도로 이용된다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 RF(radio frequency) 신호 송출 및 수신 안테나 지향을 위한 RHS(radar hardware subsystem)와 RHS 신호를 바탕으로 비행체 검출 여부를 판단하고 레이저 차단 신호를 발생시키는 MCS(main control subsystem)로 구성된다. SLR 운영시스템은 레이저 빔 발진 방향에 비행체 감시를 위해 MCS로 현재 지향하고 있는 지향 위치(방위각 및 고도각)를 전송한다. MCS는 SLR 운영시스템과 인터페이스를 통해 전송받은 지향 위치를 RHS로 전송하고, RHS는 모션 제어를 통해 SLR 운영시스템이 지향하고 있는 위치를 실시간으로 동기화한다. MCS는 비행체 검출 신호 및 비행체 감시 레이더 시스템이 지향하고 있는 지향 위치 정보를 지속적으로 SLR 운영시스템으로 전송함과 동시에 레이저 빔의 지향 축을 따라 원추 모양의

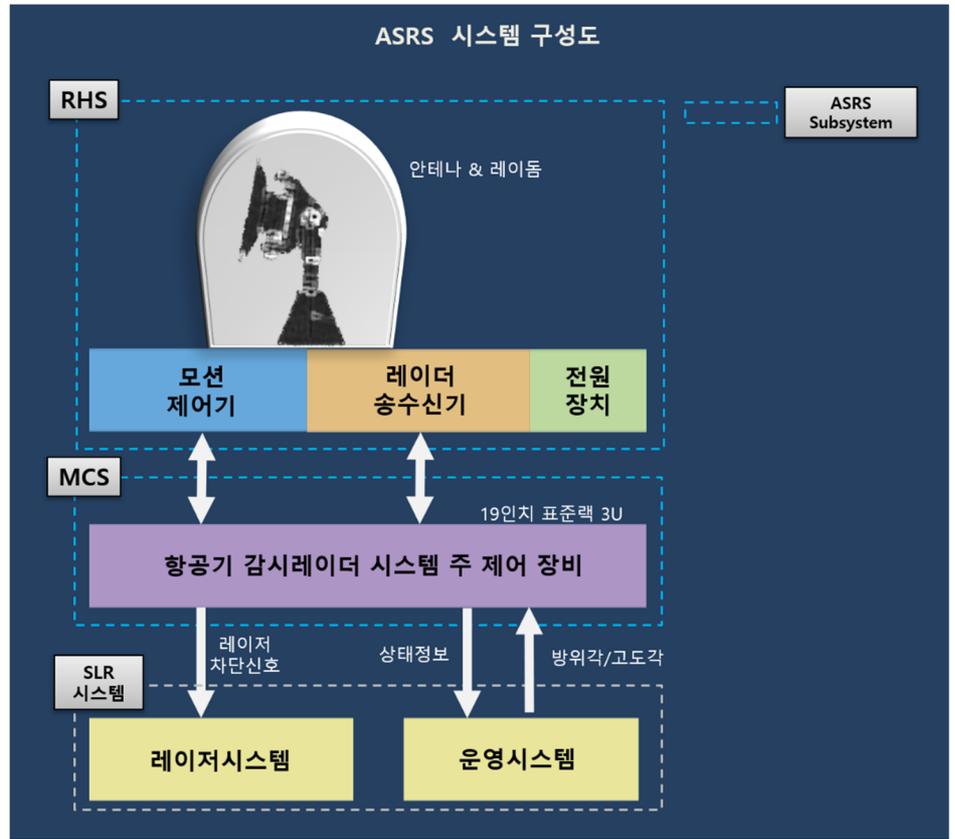


Fig. 1. System configuration of ASRS. RHS, radar hardware subsystem; MCS, main control subsystem; SLR, satellite laser ranging; ASRS, aircraft surveillance radar system.

빔 형태로 상공을 모니터링한다. 결국, RHS로부터 발사된 RF 송출 신호는 송수신기에 의해 반송파가 감지되고 MCS에 의해 비행체 유무를 통계적으로 처리한다. 이러한 신호 중 잘못된 반송 신호는 고정된 시간 범위내의 레인지 필터링과 진폭 차이에 의해 제거한다. 레인지 필터링은 유효 검출범위(0.2-40 km)에 따른 반송파의 왕복 시간에 따른 필터링을 의미하고, 진폭 차이는 반송파의 문턱 값 방식을 이용한 필터링을 의미한다. 이러한 필터링을 통해 반송파가 비행체로 식별되면 MCS는 레이저 차단 신호를 레이저 시스템으로 전송하여 레이저 빔 차단을 수행함으로써, 비행체로 레이저 빔이 발진될 가능성을 사전에 제거한다.

3. 비행체 감시 레이더 시스템 설계

3.1 비행체 감시 레이더 시스템 인터페이스 및 운용시나리오

SLR 운영시스템은 비행체 감시 레이더 시스템이 지향해야 하는 위치 정보와 그에 따른 실제 지향 위치 및 시스템 이상 유무 등을 종합하여 운용해야 한다. 우주물체를 추적하고 있는 위치와 비행체 감시 레이더 시스템이 지향하고 있는 위치가 1도 이상 차이가 발생하거나 시스템에 문제가 발생한 경우에 레이저 발진 또는 운영 중단을 수행하기 위한 인터페이스가 요구된다. 인터페이스를 통해 상호 공유되는 데이터는 크게 지향 위치를 동기화하기 위한 위치 데이터와 상태정보를 공유하기 위한 상태 데이터로 구분하였다. 이러한 인터페이스 구성은

상호 데이터 간 충돌방지 및 지향 위치 동기화를 위한 신속한 데이터 제공을 고려하여야 한다. 이를 위해 SLR 시스템과 MCS 사이에 위치 데이터 케이블과 상태 데이터 케이블로 각각 구성하여 상호 데이터에 대한 영향을 끼치지 않도록 구성하였고, 인터페이스의 간단한 구성 및 고속의 데이터를 제공하기 위해 시리얼 통신 방식으로 개발하였다. 비행체 감시 레이더 시스템의 위치 데이터 인터페이스는 RS-232 프로토콜을 바탕으로 매 50 ms 주기로 SLR 운영 시스템에 57600-8-N-1 설정으로 위치 데이터를 요청하고, 그에 대한 응답으로 방위각 위치 정보 16진수 값을 나타내는 3개의 아스키(ASCII) 문자, 고도각 위치 정보 16진수 값을 나타내는 3개의 아스키 문자, 운용시나리오에 따른 운영모드 정보 16진수 값을 나타내는 1개의 아스키 문자와 문자열의 종결을 의미하는 종료 식별자(carriage return, CR) 데이터로 구성하였다. 상태 데이터는 비행체 감시 레이더 시스템의 RHS와 MCS의 상태 정보를 별도의 요청 없이 115200-8-N-1 설정으로 SLR 운영시스템으로 주기적으로 전송한다. 상태 데이터는 단방향 통신으로 레이더의 지향 위치, 경사각, 운영 상태, RF 송출 여부, 송수신기 동작 상태, 내부 온도, 전류 및 전압 정보가 포함된다.

SLR 운영시스템과 비행체 감시 레이더 시스템은 마스터-슬레이브 관계를 바탕으로 비행체 감시 레이더 시스템의 운용시나리오를 설계해야 한다. 또한, 비행체 감시 레이더 시스템은 레이저 시스템을 자체적으로 제어할 수 있어야 하며, 마스터에 의해서도 제어될 수 있어야 한다. 이러한 마스터-슬레이브 관계에 따른 효율적 운영을 위해 비행체 감시 레이더 시스템은 Fig. 2와 같이 2개의 운용모드로 설계하였다.

운용모드는 준비모드와 동작모드로 구분되고, 인터페이스를 통해 SLR 운영시스템과의 데이터 전송 시점은 운용모드 중 준비모드로 진입했을 때 동작된다. 여기서, 준비모드는 시스템 초기화, 자가진단, 하드웨어 기능 시험이 정상적으로 동작되었을 때를 의미하며, 비행체 감시 레이더 시스템이 재 시작할 때 자동으로 수행한다. 동작모드는 수동 모드(manual mode), 대기 모드(slave-standby mode), 추적 모드(slave-transmit mode)로 구성된다. 수동 모드는 시스템 점검, 시스템 정렬 및 테스트를 위해 사용되는 기능으로 SLR 운영시스템으로부터 전송

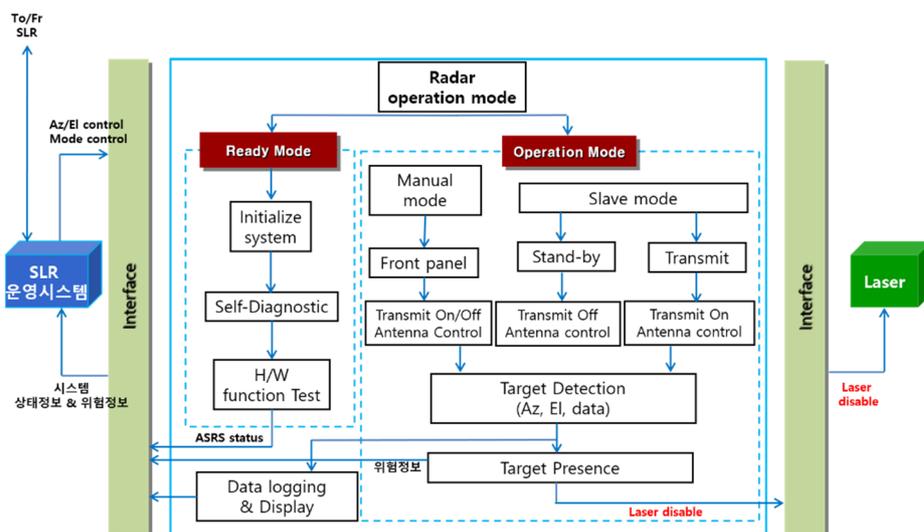


Fig. 2. Operational scenarios of ASRS. SLR, satellite laser ranging; ASRS, aircraft surveillance radar system.

되는 지향 위치 정보 및 제어 명령을 무시한다. 대기 모드는 지향 위치 정보에 따라 지향 방향을 동기화하지만, RF 펄스 신호를 송출하지 않는 모드로 우주물체 추적 전 사용되는 모드이다. 마지막으로 추적모드는 대기 모드와 동일하게 지향 위치를 동기화하고, RF 펄스 신호를 송출하는 모드로 우주물체 추적 때 사용되는 모드이다. 추적모드에서 비행체를 검출했을 때는 SLR 운영시스템을 거치지 않고 별도로 구성된 트리거(trigger) 신호를 바탕으로 레이저 발진을 멈추게 된다.

3.2 RHS(Radar Hardware Subsystem) 설계

RHS은 비행체 감시 레이더 하드웨어로 구성된 서브시스템으로, MCS로부터 지향 위치를 수신 받아 안테나를 레이저 빔 방향으로 지향하고, RF 펄스 신호를 송수신하여 MCS로 송신하는 서브시스템이다. Fig. 3과 같이 RHS는 크게 안테나 및 레이돔, 모션 제어기, 레이더 송수신기, 레이더 제어 보드(radar control board, RCB)로 구성된다.

안테나는 레이저 빔이 지향하는 특정 방향에만 모니터링하기 때문에 높은 안테나 효율성과 고지향성 특징을 갖는 파라볼라 반사판 안테나 형태로 레이저 발진 방향을 중심으로 피폭 위험 영역에 RF 펄스 신호를 집속시키는 용도로 사용되며, 레이돔은 이를 외부 환경으로부터 보호하는 용도로 사용된다.

모션 제어기는 방위각 및 고도각 2축 구조로 서보 모터(servo motor)를 이용하여 모션을 제어한다. SLR 시스템과 지향위치를 동기화하여 비행체를 모니터링하기 위해서는 고려해야 할 점이 있다. 첫 번째는 지향 방향에 비행체를 지속적으로 모니터링할 수 있도록 보장해야 한다. 모션 제어기는 각종 센서 및 컨트롤러, 보드 등 다양한 부품으로 구성되는데 이를 제어

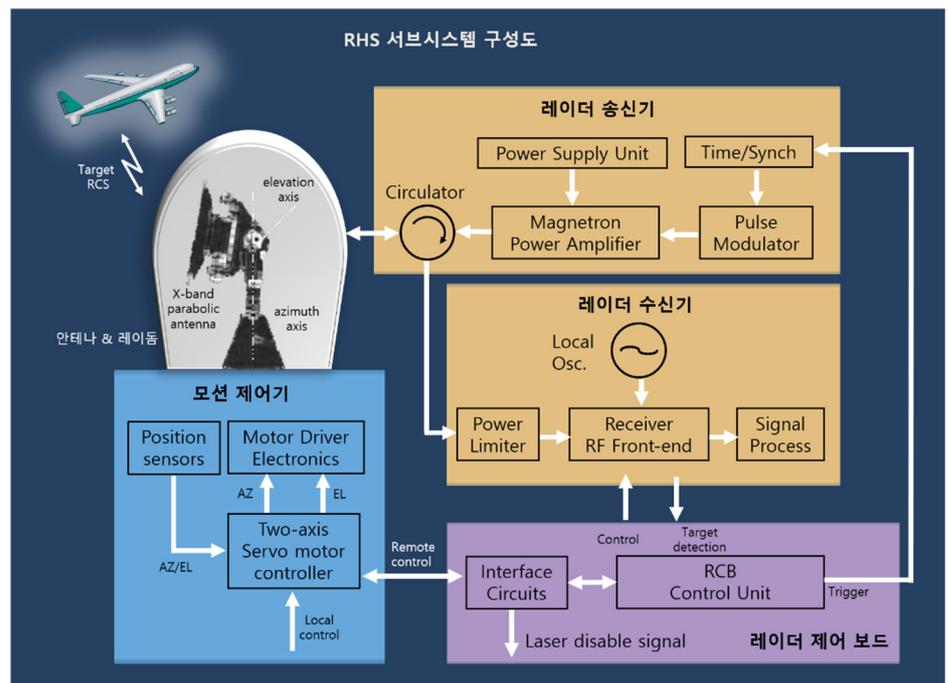


Fig. 3. System configuration of RHS. RHS, radar hardware subsystem; RCB, radar control board.

하기 위한 케이블이 반복적인 회전에 의해 시스템에 영향을 끼쳐서는 안 된다. 두 번째는 지향 위치를 제한하여 시스템을 보호해야 한다. 고도측의 경우 0도 이하로 내려가게 되면 비행체 감시 레이더 시스템의 구조물과 충돌이 우려되기 때문에 운용에 제한을 두어 설계해야 한다. 이러한 부분들을 고려하여 방위측은 회전에 의한 데이터 케이블 손상 방지 및 연속적인 비행체 검출을 위해 슬립링(slipring)을 적용하여 무한회전이 가능하도록 하였고, 고도측은 충돌 방지를 위해 -5에 리밋(limit) 스위치를 설치하여 이 범위를 넘지 않도록 설계하였다.

레이더 송수신기 모듈은 중심 주파수 9.41 GHz, 송신 출력 4 kW, 펄스 폭 1 μ s를 갖는 송신부와 수신 대역폭 3 MHz, 잡음지수 3 dB를 갖는 일본 무선(JRC)사의 해양 레이더 모듈을 도입하였다. 레이더 송수신기 및 모션제어기를 제어하고 MCS와의 제어신호를 처리할 수 있는 RCB는 별도로 설계하였다. RCB는 RHS의 기능 제어 및 감시 기능과 MCS와의 인터페이스를 유지하는 통신 모듈을 구성된다. RCB는 주로 레이더 송수신기 모듈로 송신하기 위한 레이더 trigger 신호 생성, 수신부에서는 Video 신호출력으로 아날로그 전압 형태를 구성하여 실시간 모니터링 용도로 사용되며, 모션제어기로부터 방위각 및 고도각 모터 제어 신호, limit 신호, 브레이크 전원, RF 모니터 신호를 확인한다. 또한, RHS와 MCS 인터페이스 역할을 수행하기 위한 RS-232, RS-422, RS-485 프로토콜을 지원한다.

3.3 MCS(Main Control Subsystem) 설계

MCS는 SLR 운영시스템과 RSH 간의 인터페이스 및 제어 신호 생성을 수행하며, RHS로부터 수신된 RF 펄스 신호를 분석하여 비행체 검출 여부를 판단하고, 레이저 차단 신호를 생성하여 레이저 시스템으로 전달하는 서브시스템이다. SLR 운영시스템으로부터 수신한 지향 위치와 RHS로부터 수신한 안테나의 지향 위치를 이용하여 잔차(residual)를 계산하고, 상호 간의 지향 위치가 문턱(threshold)을 벗어나면 레이저 차단신호를 발생하는 것이 주요 기능이다.

Fig. 4에 MCS 구성도를 나타내고 있으며, MCS는 SLR 운영시스템 인터페이스를 이용하여 현재 지향 위치를 전달받고, 서보 모터를 제어하기 위한 지향위치 정보를 RHS로 전달한다. 동시에 현재 RSH가 지향하고 있는 위치와 지향해야 하는 위치를 실시간 비교하고, 레이더 송수신기로부터 획득한 RF 신호로 비행체 검출을 판단하도록 설계하였다. 여기서, 가장 고려해야 할 부분은 문턱 값을 어떠한 방식으로 결정할 것인가에 대한 문제이다. 문턱 값을 정하는 방식은 크게 두 가지로 구분되며, 고정 문턱 값과 가변 문턱 값을 이용하는 방식이다. 고정 문턱 값은 검출 신호를 고정된 값으로 비행체 검출 여부를 판단하는 방식이며, 가변 문턱 값은 비행체 거리에 따른 신호의 감쇄까지 고려하여 비행체 검출 여부를 판단하는 방식이다. 고정 문턱 값은 가변 문턱 값 방식 대비 비교적 계산 및 구현이 간단한 장점이 있으나 고정된 문턱 값을 결정하기가 어렵고 오 경보율이 높아지는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 보완하고자 하는 방식이 가변 문턱 값을 이용한 비행체 검출 방식이다[10].

MCS에서 가변 문턱 값 적용하는 방식을 구현하기 위해 감도 시간 제어(sensitivity time control, STC)와 일정 오경보율(constant false alarm rate, CFAR) 알고리즘을 적용하여 구현하였다. STC 알고리즘은 송신 빔 검출 후 가까운 거리에서는 높은 문턱 값을 사용하고, 이를 계단 형태로 점점 낮추어 먼 거리에서는 낮은 문턱 값을 사용하는 방식이며, CFAR 알고리즘은 배경 잡음으로부터 오 경보율을 일정하게 유지하는 방식이다. 배경 잡음 레벨보다 큰 신호를 무조건 검출 신호라고 판단하면 잡음 신호를 비행체 검출 신호로 오인하여 오경보가 발생

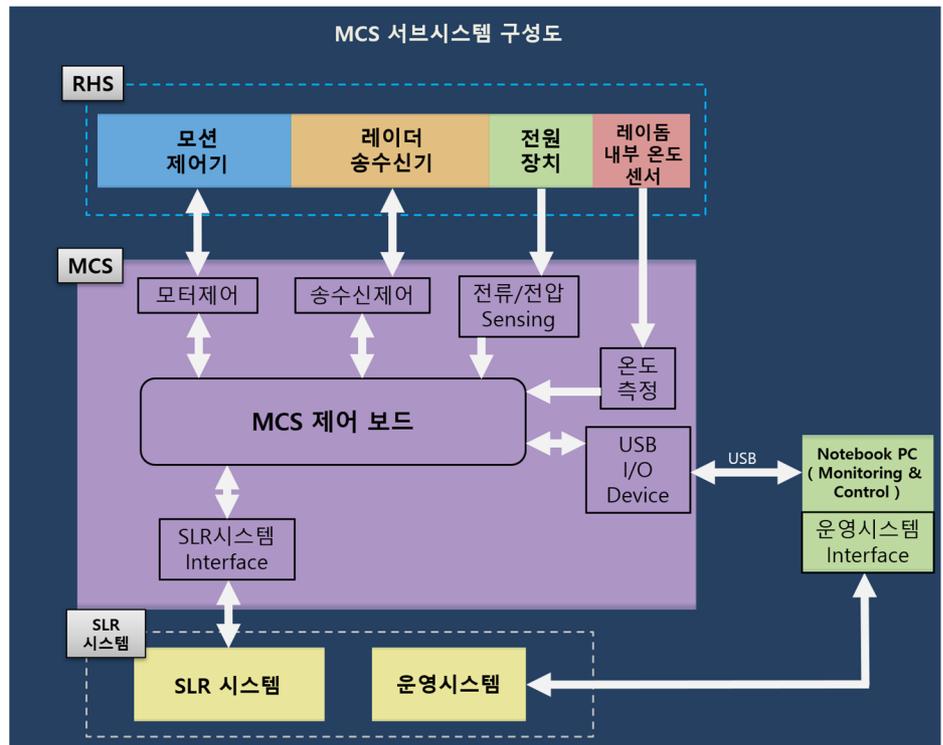


Fig. 4. System configuration of MCS. MCS, main control subsystem; RHS, radar hardware subsystem; SLR, satellite laser ranging.

하게 된다. 따라서, 신호 영역을 일정하게 셀(cell)로 구분하여 검출하고자 하는 셀 영역의 주변 잡음 세기를 파악하고, 이 신호의 세기를 잡음의 통계치로 사용하여 실제 검출하고자 하는 셀의 값에 사용하는 방식이다. 이러한 검출방식을 적용한 회로도에는 Fig. 5와 같다. 그림에서 보듯이, 인가된 비디오 신호를 일정 레벨로 증폭하여 FPGA(field programmable gate array)를 거쳐 전용 마이크로 컨트롤러(micro controller unit, MCU)에서 기준 신호 세기와 비교함으로써 비행체의 존재 여부를 검출한다. 기준 신호는 교류(alternating current, AC) 검출기의 MCU에서 발생시키며, MCU의 계산 결과를 이용하여 주파수(main bang)와 비행체 검출신호를 추출하여 local controller에 전달된다. Local controller에서는 레이저 차단 신호를 생성하고 SLR 레이저 시스템으로 신호를 전달하여 독립적으로 SLR 시스템의 레이저 발진을 멈추도록 설계하였다.

4. 비행체 감시 레이더 시스템 검증

비행체 감시 레이더 시스템의 기능 시험 및 검증은 모의 실험 및 시험 검증으로 수행하였다. 모의 실험은 RHS와 MCS 기능 및 성능 검증을 각각 수행하였다. RHS는 주파수 대역, 송신 출력, 방위각 및 고도각 지향 기능을 독립적으로 제어하여 스펙트럼 분석기, 지향 데이터로 확인하였다. MCS는 SLR 운영시스템과 RHS 간의 상호 인터페이스 및 레이저 차단 신호 생성 여부를 확인하였다.

모듈 통합시험은 모의 SLR 운영시스템을 별도로 개발하여 비행체 감시 레이더 시스템의 운용모드에 따른 운용 및 각 모듈의 상태 정보를 확인하여 검증하였으며, 시스템 시험 검증은

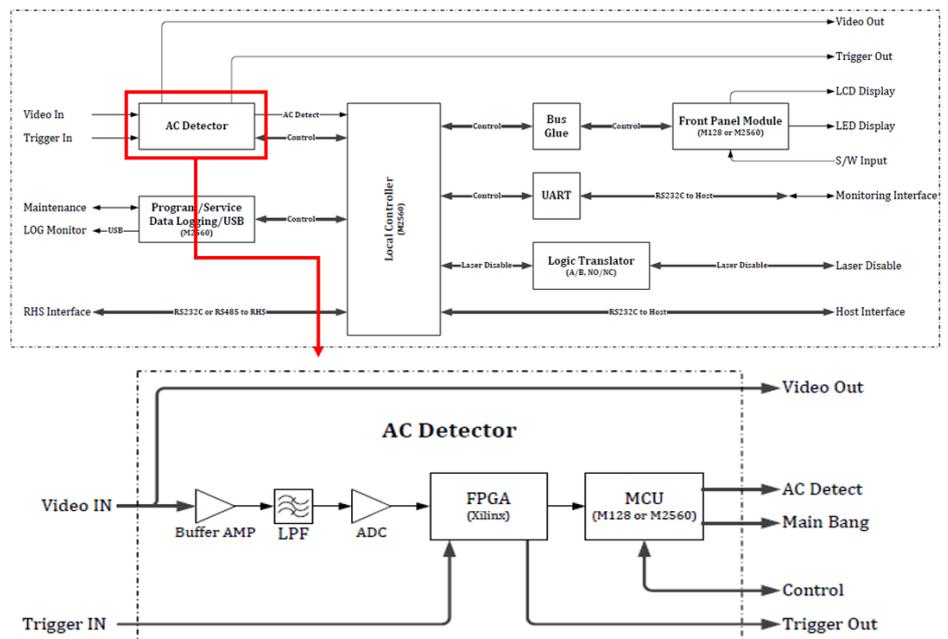


Fig. 5. Aircraft detection diagram. RHS, radar hardware subsystem; LPF, low pass filter, ADC, analog to digital converter; AMP, amplifier.

실제 항공기를 이용하여 Fig. 6과 같은 방법으로 수행하였다. 사전에 항공기 조종사와 특정 지향 위치를 공유하여 항공기가 그 위치를 선행 비행하도록 하였다. 지상에서는 모니터를 통해 안테나가 지향하고 있는 방향을 표시하고, 표시된 지향 방향에 항공기가 지나갔을 때 Fig. 7과 같이 모니터를 통한 비행체 영상과 오실로스코프를 통한 항공기 수신 검출 신호 및 레이저 차단 신호가 생성되는 것을 확인하였다. 비행체의 경우 비행체 검출 레이더의 검출 반경을 지나가는 속도가 각기 다르기에 속도가 느린 H-60 헬리콥터와 속도가 빠른 F-15K 전투기를 활용하여 각 3회씩 반복적으로 비행체 검출 테스트를 수행하여 비행체 감시 레이더 시스템의 기능 및 성능을 최종적으로 검증하였다.

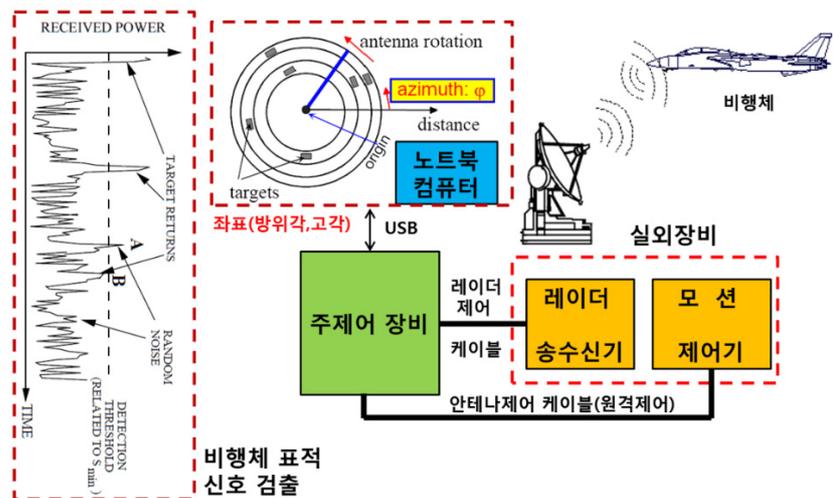


Fig. 6. Aircraft detection method.



Fig. 7. Aircraft detection verification.

5. 결론

거창 SLR 시스템을 위한 비행체 감시 레이더 시스템은 SLR 시스템의 레이저 지향 방향의 비행체를 검출하여 레이저 발진 차단을 통해 비행체의 안전을 확보하기 위해 개발되었다. 비행체 감시 레이더 시스템은 실외장비인 RHS와 실내장비인 MCS로 구분하여 설계하였으며, 운용 시나리오에 따라 운용되도록 개발하였다. RHS는 SLR 시스템의 지향 방향과 동기화되어 RF 펄스 신호를 송신하고 반사된 신호를 집속하여 MCS로 전송하는 역할을 수행한다. MCS는 RF 펄스 신호를 바탕으로 비행체 검출 여부를 판단하며, 이때 사용된 검출 방법은 가변 문턱 값 방식을 이용하여 개발하였다. 최종적으로 개발된 레이더의 비행체 검출 검증을 위해 속도가 다른 비행체 2기의 비행 경로에 안테나를 지향하고 RF 펄스 신호를 송신하여 최종적으로 반사된 수신 검출 신호와 동시에 레이저 차단 신호가 발생하는 것을 확인하였다. 비행체 감시 레이더 시스템 개발로 인해 거창 SLR 시스템이 안정적이고 지속적인 운용을 지원함과 동시에 레이저로부터 관측 상공의 비행체 안전을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국천문연구원 주요사업 “우주물체감시 관측인프라 통합운영” 과제로 수행된 연구 결과입니다.

References

1. Sung KP, Choi EJ, Lim HC, Jung CG, Kim IY et al., Development of operation software for high repetition rate satellite laser ranging, J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 44, 1103-1111 (2016). <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.12.1103>
2. Oh H, Park E, Lim HC, Lee SR, Choi JD, et al., Orbit determination of high-Earth-orbit satellites by satellite laser ranging, J. Astron. Space Sci. 34, 271-279 (2017). <https://doi.org/10.5140/JASS.2017.34.4.271>

3. International Laser Ranging Service, Map of stations (2023) [Internet], viewed 2023 Nov 3, available from: <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/science/scienceContributions/index.html>
4. Hudson SJ, Eye injuries from laser exposure: a review, *Aviat. Space Environ. Med.* 69, 519-524 (1998).
5. Lally DR, Duker JS, Foveal injury from a red laser pointer, *JAMA Ophthal.* 132, 297 (2014). <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2014.34>
6. International Laser Ranging Service, Map of stations (2023) [Internet], viewed 2023 Nov 3, available from: https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/stations/active/SEJL_station_info.html?log
7. McGarry JF, Hoffman ED, Degnan JJ, Cheek JW, Clarke CB, et al., NASA's satellite laser ranging systems for the twenty-first century, *J. Geod.* 93, 2249-2262 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1191-6>
8. Blanchet G, Haag H, Hennegrave L, Assemat F, Vial S, et al., Laser ranging for effective and accurate tracking of space debris in low earth orbits, *Proceedings of the 6th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Germany, 22-25 Apr 2013.
9. Lim HC, Sung KP, Yu SY, Choi M, Park E, et al., Satellite laser ranging system at Geochang station, *J. Astron. Space Sci.* 35, 253-261 (2018). <https://doi.org/10.5140/JASS.2018.35.4.253>
10. Kim HS, Lee SW, Nam KG, A study on the voxel coloring using multi-variable thresholding, *J. Inf. Commun. Converg. Eng.* 9, 1102-1110 (2005).

Author Information

성기평 kpsung@kasi.re.kr



충남대학교에서 석사학위 취득 후 2018년부터 한국천문연구원에서 우주위험감시센터에서 근무하고 있다. 세종 및 거창 인공위성 레이저 시스템 개발 업무를 수행하였으며, 현재에는 우주물체 레이저 추적 시스템, 우주 광통신 및 국방 관련 연구를 수행하고 있다.

최만수 mansoo@kasi.re.kr



충남대학교 전자공학과에서 제어 및 항법 전공으로 박사학위를 취득하였으며, 2008년부터 한국천문연구원에서 위성항법시스템 운영 및 활용과 관련된 연구를 수행하였고, 현재는 우주위험감시센터에서 인공위성 레이저 추적시스템 및 우주 국방관련 연구를 수행하고 있다.

임형철 hclim@kasi.re.kr



KAIST 항공우주공학과에서 위성제어 전공으로 박사학위를 취득하였다. 1996년부터 (주)현대전자 위성사업단에서 근무한 이후, 2000년부터는 한국천문연구원에 재직 중이다. 2009년부터 1년간 NASA/GSFC에서 visiting scientist로 근무하였고, 2015년부터 2020년까지 과학기술연합대학원대학교에 교수로 지냈으며, 현재 서태평양 레이저추적 네트워크(WPLTN) 기구의 의장을 맡고 있다. 레이저에 기반한 우주물체 추적, 광통신 및 우주탐사 관련 연구를 수행하고 있다

유성열 syyu@kasi.re.kr



2018년부터 한국천문연구원에서 인공위성 레이저 시스템의 광학 시스템 관련 업무를 수행하고 있으며, 현재는 거창 인공위성 레이저 관측소와 세종 인공위성 레이저 관측소의 광학 시스템 운영 및 연구 업무를 수행하고 있다.