

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.10.1012

다중표적 비행시험을 위한 비행 자료처리 시스템 설계

정경호*, 오세진*, 방희진*, 이용재*, 김홍범*

Design of Flight Data Processing System for Multiple Target Flight Test

Kyoung-Ho Chong*, Se-Jin Oh*, Hee-Jin Bang*, Yong-Jae Lee* and Heung-Bum Kim*

ABSTRACT

In this paper, The flight data processing system was designed for multiple target flight test. For flight data processing, multiple target grouping, data fusion processing, and data slaving processing were performed and, as a data fusion filter, centralized, and federated Kalman filters were designed. A centralized kalman filter was modified in order to improve the vehicle's low altitude measurement using radar's SNR and estimation process. From the testing of multiple target missile, it confirmed flight trajectory measurement was improved in low altitude area and the beginning stage of vehicle.

초 록

본 논문에서는 다중표적 비행시험을 위한 비행 자료처리 시스템이 설계되었다. 비행자료 처리를 위해 표적그룹 처리, 자료융합 처리 및 자료연동 처리가 수행 되었으며, 자료융합 필터로서 집중형 칼만필터와 연합형 칼만필터를 설계하였다. 특히 집중형 필터에 레이더의 SNR과 추정기법을 적용하여 비행체의 저고도 계측을 개선하였다. 개발된 시스템을 다중표적 비행시험에 적용한 결과, 저고도 및 초기구간에서 개선된 비행궤적을 확인할 수 있었다.

Key Words : Multiple Target(다중 표적), Flight Data Processing System(비행 자료처리 시스템), Data Fusion(자료융합), Data Slaving(자료연동)

1. 서 론

유도 또는 무유도 비행체의 최종 성능을 확인하기 위해서는 계측 센서를 이용하여 시험 비행체의 정확한 비행 정보를 획득해야 한다. 비행 정보의 획득은 계측센서가 비행체를 추적하면서 얻어지는데, 사용되는 계측센서로는 원격측정장치 (Telemetry), 계측 레이더(Measurement Radar), 영상추적장치

(EOTS)등이 있다. 이러한 계측 센서들은 단일 또는 다중으로 이용되고 있으며, 센서마다 각각 다른 형태의 통신방식과 출력을 갖고 있어 이를 하나로 통일하여 처리하고 정확한 정보로 제공하는 실시간 비행 자료처리 기술이 요구된다.

국방과학연구소 종합시험단에서는 1990년대 초 VxWorks기반 비행 자료수신 시스템(Flight Data Receiving System ; FDRS)을 개발한 이래 지속적인 성능개선과 안정화를 통하여 현재까지 다양한 유도무기의 시험평가에 적용하여 왔다. FDRS의 기본 기능은 계측장비의 수신, 좌표변환, 자료저장 및 재현 등의 기능을 포함하고 있으며

† 2010년 6월 23일 접수 ~ 2010년 9월 8일 심사완료

* 정희원, 국방과학연구소 종합시험단 1부

교신저자, E-mail : khchong@add.re.kr

충남 태안군 태안우체국 사서함 1호

자료처리를 통해 얻어진 비행궤적 정보는 비상폭파(ED)판단, 가시화 등에 사용된다.

그러나, 최근 들어 유도무기의 시험평가에 있어서 과거 단일 표적이 아닌 다중 표적에 대한 시험평가가 요구 되었으며 이를 위한 자료처리 기술의 개선이 필요하게 되었다[1,2]. 다중표적 자료처리를 위한 기술은 표적별로 그룹을 형성하고 각 그룹간 자료융합(Data Fusion)과 자료연동(Data Slaving)을 수행하여 표적별 정확한 비행 정보를 제공하는 것이다.

자료융합은 다양한 계측 센서로부터 자료를 융합하여 보다 확실한 정보를 얻고자 하는 기술이다[3,4]. 시험장에서 수행하고 있는 자료 융합 기법의 기본 개념은 비행시험 통제원들에게 비행체에 대한 정확한 정보를 제공하고, 여러 계측 장비와 정보를 공유하여 비행체의 추적에 용이한 정보로 사용하는 것이다[7~9]. 다중표적에 적용되는 자료융합 기법은 각 표적에 대한 계측 그룹을 형성하고 계측 그룹마다 융합 필터링을 수행하여 하나의 정확한 정보를 생성하는 것을 말한다.

자료연동은 계측 장비의 추적정보를 자료처리 시스템을 통하여 획득한 후 다시 계측장비에 재추적 정보를 제공하는 것으로서, 이를 통하여 저고도 구간이나 비행초기구간의 추적능력을 개선할 수 있다. 또한, 계측장비가 원거리에 위치한 경우 계측장비의 계측영역이 벗어날 때 효과적으로 활용될 수 있어 시험장간 합동시험을 가능하게 한다. 이러한 개념의 자료처리 기술은 선진 외국 시험장에서도 수행하고 있으며 미래 시험기술인 모델링/시뮬레이션 기반 합동시험 기술로 발전해 나가고 있다[2].

본 논문에서는 다중표적 비행시험을 위해 설계된 비행 자료처리 시스템의 구성과 이를 위한 자료융합 및 자료연동 기법을 소개하고 적용한 결과에 대해 서술하였다.

II. 시스템 설계

2.1 시스템 구성

비행자료 처리 시스템은 일반적인 실시간 자료 처리 시스템에 기반하여 설계되어 있다(Fig. 1). 비행자료 처리 시스템은 비행자료 수신부, 비행자료 변환부, 비행자료 종합관리부로 구성되어 있다. 비행자료 수신부는 계측레이더, 원격측정장치(TLM)등으로부터 계측자료를 수신하며 자료를 해석(Parsing)하는 역할을 한다. 비행자료 수신부에 사용되는 OS는 Windriver사의 VxWorks를

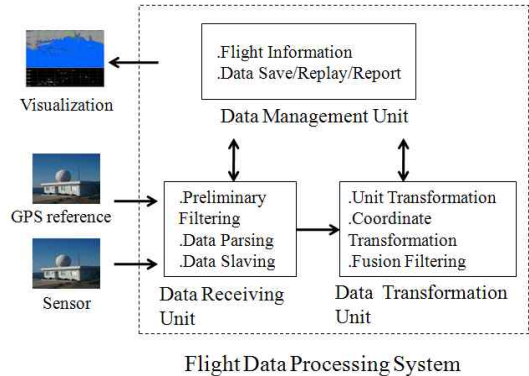


Fig. 1. Configuration of Flight Data Processing System

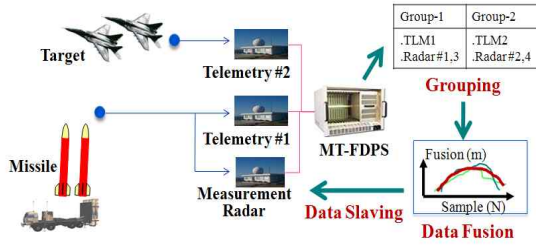
사용하며 비행계측자료를 실시간으로 처리한다. 비행자료 수신은 GPS시각을 기준으로 각 계측장비에 도착한 자료를 우선순위가 높은 순서대로 처리하는 선점형 스케줄링 방식(Priority-based Preemptive Scheduling)을 사용한다. 즉, 비행자료처리의 정확성이 높은 순서대로 설정하면 다른 계측센서의 자료가 동일시간에 입력되더라도 우선순위가 높은 자료를 먼저 처리하게 된다. 이러한 처리방식은 비동기 자료처리에 대한 신뢰성을 높여준다.

비행자료 변환부는 수신 자료들의 정보를 통일하는 단위변환과 좌표변환을 수행하며, 자료 필터링 처리를 통한 융합 또는 추정자료를 생성한다. 기존 FDRS에서는 한반도의 7-변수를 적용한 Bessel1814좌표 체계를 이용하였으나, 비행항법 정보로 GPS를 사용하는 등 점점 WGS-84좌표 체계를 사용하는 추세에 있어, 신규 시스템에서는 WGS-84좌표 체계를 적용하였다. 좌표체계가 정해지면 레이더-발사장간 좌표변환을 수행하는데 레이더의 극좌표를 지리좌표(위경고)로 변환하거나 또는 발사장 중심 좌표 등으로 변환한다.

비행자료 종합관리부는 시험정보(발사점, 탄착점, 안전구역 등)를 설정 및 관리 하고 자료의 저장, 재현, 리포팅 등의 기능을 수행하며, 비행통제 시스템에 비상폭파(ED)판단, 가시화를 위한 비행정보를 제공한다.

2.2 다중표적 자료처리

다중표적 자료처리는 각 표적에 대한 계측 센서들의 정보를 그룹으로 형성하고 각 그룹에 대해 융합 필터링을 수행하여 하나의 정확한 정보를 얻어내는 과정을 말한다. 또한 이러한 정보는 계측센서들에게 피드백으로 전달하여 추적의 정확도를 향상시



* MT-FDPS : Multiple Target Flight Data Processing System

Fig. 2. An Example of MT-FDPS for Multiple Target Surface-to-Air Missile Flight Test

키는 연동자료로 사용된다. 이와 같은 역할을 수행하기 위해 다중표적 비행자료 처리 시스템(Multiple Target-Flight Data Processing System; MT-FDPS)이 설계되었다. Fig. 2는 MT-FDPS의 대공 유도무기 체계 적용 예를 나타낸다.

Fig. 2의 적용 예를 살펴보면 표적기(Target)와 유도탄(Missile)에 대한 각각의 그룹이 설정되고 각 그룹에는 3개의 계측센서가 할당된다. 그룹설정이 끝나면 전처리 필터링, 자료변환, 자료융합, 자료연동을 수행한다. 전처리 필터링에서는 자료를 수집하고 자료 처리를 위해 동일한 주기로 자료를 변환한다. 각 그룹의 계측센서는 MT-FDPS에서 제공한 GPS기준시각 정보와 위치정보를 MT-FDPS에 송신하며, 수신된 비동기 자료는 실시간 OS를 통해 처리된다. 자료변환 과정에서는 동일한 단위로 통일하고 WGS-84 또는 Bessel1814 좌표계를 기준으로 위도/경도/고도 값으로 변환한다.

자료융합은 각 센서의 정보를 하나의 정보로 융합하며, 유도탄의 동적 특성을 반영하고 실시간 처리가 가능한 칼만 필터가 사용된다. 자료연동은 융합된 자료를 계측장비에 제공하여 추적능력을 향상시킨다. Fig. 3은 다중표적 자료처리의 흐름도를 나타낸다.

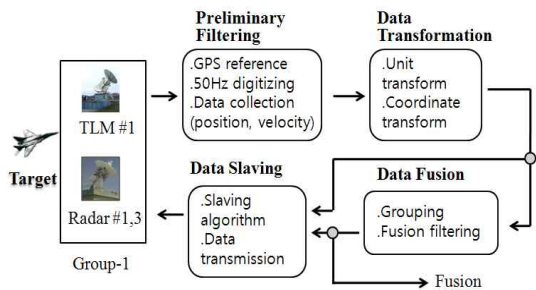


Fig. 3. Flow of Multiple Target Data Processing

2.3 자료융합 기법

다중표적 자료처리에 있어 자료융합 기법은 다수의 표적으로부터 하나의 정확한 정보를 얻기 위해 필요한 기술이다. 무유도 또는 유도탄 비행시험에 적용되는 자료융합 정보는 주로 위치나 속도에 해당하며 이를 위한 융합 알고리즘은 위치 융합(Position Fusion) 방법이 주로 사용된다. 위치 융합 방법에는 각 센서들로부터 결합성을 찾는 파라미터 결합기법(Parametric Association)과 추정 기법(Estimation Technique)이 있는데 유도무기 시험과 같이 연속된 시간상에서 순차적인 이산자료를 처리하는 데에는 추정 기법(위치 추정)이 널리 사용된다[3,4].

비행시험을 수행하기 위한 자료 융합 프로세스 모델은 Fig. 4의 일반적인 자료융합 프로세스 모델에 기반을 두고 있으며 각각의 프로세스 모델에는 센서, 전처리 필터링, 단계-1 프로세싱, 단계-2 프로세싱, 단계-3 프로세싱, DB관리 시스템 등으로 이루어져 있다.

비행시험을 위한 자료 융합 필터를 선택하기 위해서는 다음과 같은 요구조건을 고려해야 한다. 첫째, 비행체의 동적 모델을 반영하는 자료 해석이 필요하다. 둘째, 비행체나 계측 장비(레이더, 원격측정장치)의 잡음 모델을 필터 성능에 반영해야 한다. 셋째, 여러 개의 계측 센서를 하나로 통합하여 필터링 하거나 각각의 계측 센서가 독립적으로 필터링을 수행하고 나중에 하나로 통합하는 기능이 필요하다. 넷째, 계측 센서의 추적 실패나 부정확한 위치 자료에도 추정할 수 있는 기능이 필요하다. 이러한 기능들을 고려할 때 비행시험을 위한 자료 융합 필터로서 칼만 필터가 선택되었다[5,6].

비행체의 특성에 따라 칼만 필터의 종류를 분류하였으며 그 기준은 비행체 위치 자료의 정확성에 두었다. Table 1은 비행 시험용 자료 융합 필터를 분류한 것이다.

비행체의 항법 종류가 순수 항법이나 기타 레이더 유도 항법 등을 주로 사용하고 있는 경우 비행

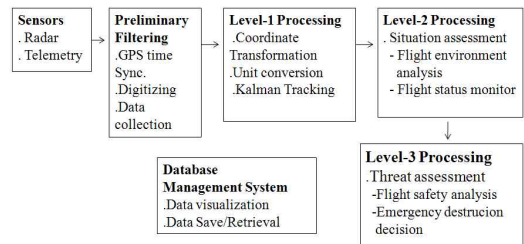
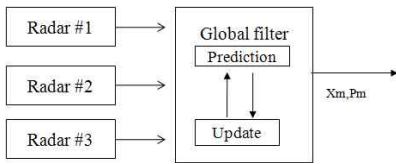


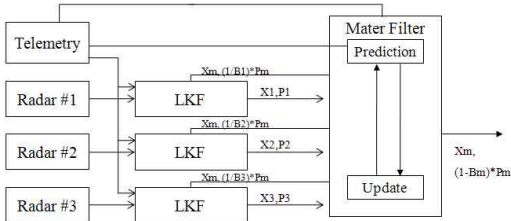
Fig. 4. Data Fusion Process Model for Flight Test

Table 1. Data Fusion Filter for Flight Test

적용필터 시험분야	융합소스	항법종류	융합필터 (칼만필터)
무유도 비행	레이더	-	중앙집중형
단거리 유도비행	레이더/ 원격측정	순수항법 및 레이 더 유도	중앙집중형
중/장거리 유 도비행	레이더/원 격측정	GPS보정 항법	연합형



(a) Centralized Kalman Filter



(b) Federated Kalman Filter

Fig. 5. Data Fusion Filter for Flight Test

체의 항법 정보에 큰 비중을 두지 않고 계측 레이더와 유사한 가중치를 제공할 수 있는 집중형 칼만 필터를 선택하였다. 반면에 비행체의 항법 종류가 GPS정보를 주로 사용하고 있으면 비행 위치 정보가 정확하다고 판단하여 항법 정보에 큰 비중을 둘 수 있는 연합형 칼만 필터를 선택하였다.

Fig. 5는 비행 시험용 자료융합 칼만 필터의 구성을 나타낸다.

중앙 집중형 칼만 필터(Centralized Kalman Filter)는 각 센서 특성이 유사한 경우에 주로 사용하며 센서의 출력을 하나의 중앙에서 처리하며 시스템의 차수가 작을 경우 가장 쉽게 필터를 구현할 수 있는 장점을 갖는다. 반면 센서 고장 발생시 센서를 분리하기 어려운 단점이 있다. 연합형 칼만 필터(Federated Kalman Filter)는 각 부 필터(LKF ; Local Kalman Filter)에 가중치를 주어 특정 센서에 중요도를 부여할 수 있으며 처리 속도가 빠르고 각 부 필터에 고장 검출 기능을 부여할 수 있는 장점이 있다[5~8].

2.4 자료연동 기법

자료연동 기법은 계측정보의 추적 안정성을 향상시키기 위한 방법으로, 자료융합으로부터 얻어진 자료를 계측장비에 제공하거나, 계측장비 간 추적 자료를 상호 공유하는 기술에 해당한다. 자료 연동은 연동그룹을 설정하고 연동우선순위 결정 알고리즘에 의해 처리된다. 연동우선순위 결정 알고리즘은 어느 계측정보를 연동정보로 사용할 것인가를 결정한다. 유도 비행시험과 같이 특정 계측장비의 정확도가 높다면 Priority Fixed나 Priority Favor를 사용하고, 무유도 비행시험과 같이 계측장비의 정확도가 비슷하다면 Device Fixed나 Quality Favor를 사용한다. Table 2는 연동 우선순위 결정 알고리즘의 종류를 나타낸다.

Table 2. Data Slaving Priority Decision Algorithm

알고리즘	내 용
Priority Fixed	고정된 순서에 따라 계측장비 선택
Priority Favor	항상 우선순위가 높은 계측장비 선택
Device Fixed	고정된 하나의 계측장비 선택
Quality Favor	레이더의 SNB에 의해 계측장비 선택

III. 시험 결과

3.1 자료융합필터 설계 검증

다중표적 자료처리를 위한 자료융합 필터를 구현하기 위해 중앙 집중형 필터와 연합형 필터의 성능을 검증하였다. 중앙 집중형 필터는 각 계측 레이더에 동일한 가중치를 부여하도록 구성되어 무유도 비행시험에 적용하였다. 무유도 비행시험은 주로 스킨추적(Skin Tracking)을 수행하며 비행체의 자세, 위치, 구름, 섬, 주파수 간섭 등의 다양한 변수에 따라 추적오차를 많이 발생시킨다. 특히 비행 초기구간 저고도 상승시 오차가 많이 발생하는데 이는 계측 레이더의 안테나 각도가 낮아 해수면 반사에 의한 다중경로오차(Multi-path error)가 발생하기 때문이다. 이 경우 비행체 추적성공(Track='on')이 되었더라도 위치 오차가 크게 발생할 수 있다.

이러한 단점을 개선하기 위해 비행체 추적시 추적성공정보 이외에 신호대 잡음비(SNR)를 추가 정보로 사용하는 방법을 구현하였다. SNR은 레이더 유효 반사 단면적(Radar Cross Section)을 측정하면서 얻어지는 전파의 세기와 비례하므로 추적을 위한 부수적인 정보로 사용될 수 있다.

일반적으로 SNR이 높을수록 추적성공 확률이 높지만, 특정 임계값(dB)이상으로 추적성공을 규정짓기 어렵기 때문에 각 레이더의 SNR을 상대적으로 비교한 후 낮은 SNR을 갖는 레이더 위치 정보를 자료융합 소스로 사용하지 않는 방식을 취하였다.

예를 들어, RADAR-1, RADAR-2, RADAR-3의 SNR이 각각 SNR-1, SNR-2, SNR-3 이고 상대적인 기준값(dB)이 A일 때, 관계식은 다음과 같다.

If $SNR-1 < (SNR-2 - A)$ and $SNR-1 < (SNR-3 - A)$ then

Input_source != RADAR-1

여기에서 상대적인 기준값 A는 약 15dB로 선정하였으며 레이더의 특성에 따라 경험적으로 산출하였다. 또한 자료융합 수행결과로부터 속도를 구하여 비행체의 속도 허용치와 비교한 후, 만족하지 못한 경우에는 이전의 위치융합결과를 추정하여 최종 결과로 산출하였다. Fig. 6은 일반적인 중앙 집중형 칼만 필터링 방법이며 Fig. 7은 레이더의 SNR과 추정 기능을 추가하여 개선된 중앙 집중형 칼만 필터링 방법이다.

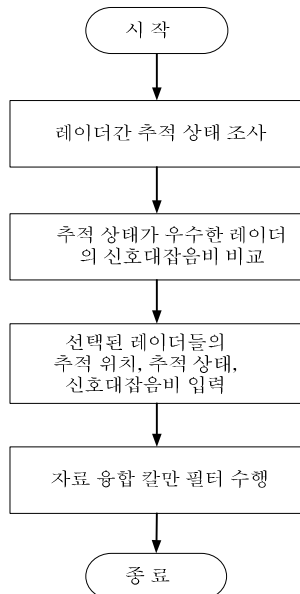


Fig. 6. Flow of Centralized Kalman Filter

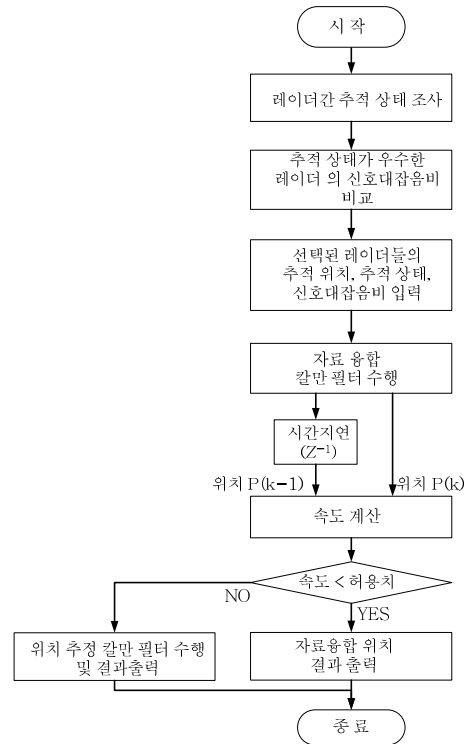


Fig. 7. Flow of Modified Centralized Kalman Filter

Fig. 8은 무유도 비행체인 다련장 로켓발사 체계(MLRS; Multiple Launch Rocket System)의 계측 레이더 스킨 추적결과를 융합한 것이며 그림 9는 일반적인 중앙 집중형 칼만 필터 융합 방법을 적용한 결과이다. 이 경우 RADAR-3의 추적 오차가 발생하여 자료융합결과가 오차를 갖게 되었다. Fig. 10은 개선된 중앙 집중형 칼만 필터링을 적용한 결과이다. 이 경우 상대적으로 낮은 SNR을 갖는 RADAR-3이 융합 소스로 참조되지 않아 비행 초기구간의 융합 결과가 개선되었음을 확인할 수 있다. 연합형 필터를 적용하는 분야는 주로 유도 비행체이다. 연합형 필터의 기준치는 항법정보의 위치를 나타내는 원격추정장치(TLM)이며 계측 레이더는 비콘 추적인 경우와 스킨 추적인 경우에 대해 각각 가중치가 다르게 인가된다. 연합형 필터에는 계측센서의 자료오류를 검출할 수 있는 기능을 부필터에 구현하였다.

예를 들어, TLM 또는 레이더의 경우 저고도 해수면 전파 반사 등으로 인하여 자료수신이 성공(TLM : Frame Sync='on', Radar : Track='on')하였더라도 위/경/고도 값이 크게 벗어나는 경우가 있다. 이러한 경우 이전 비행체적과의 속도차이를 검출하여 기준치보다 큰 경우 비정상 궤적으로 판단하여 다른 계측센서 값을 참조하도록 하였다.

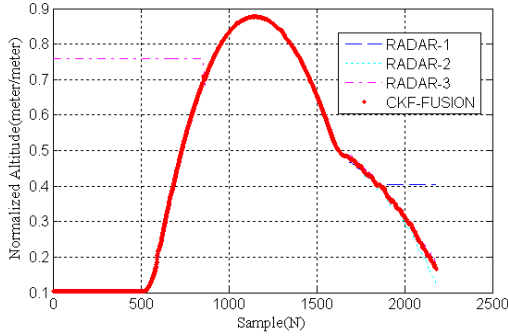


Fig. 8. An Example of Centralized Kalman Filter

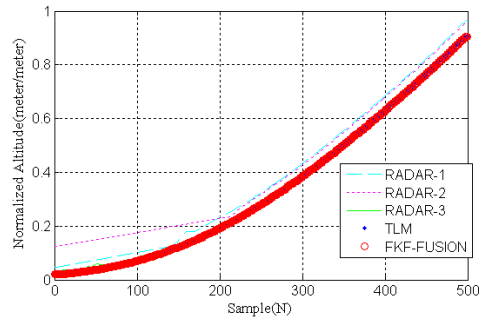


Fig. 11. Result of Federated Kalman Filter for Guided Missile

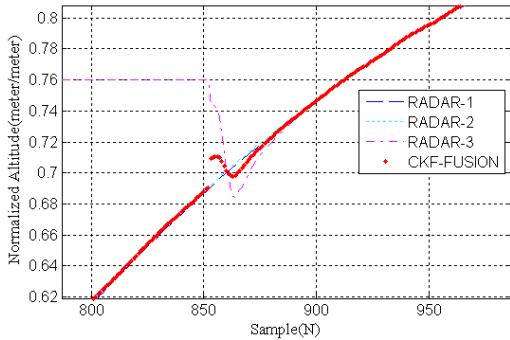


Fig. 9. Result of Centralized Kalman Filter for MLRS Flight Test

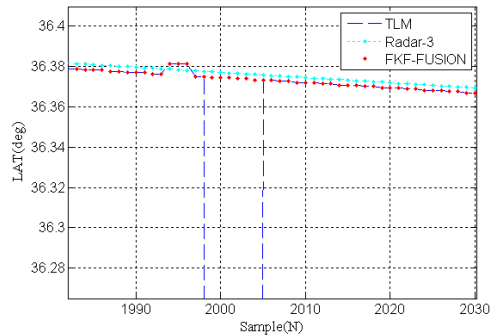


Fig. 12. Simulation Result for Fault Detection

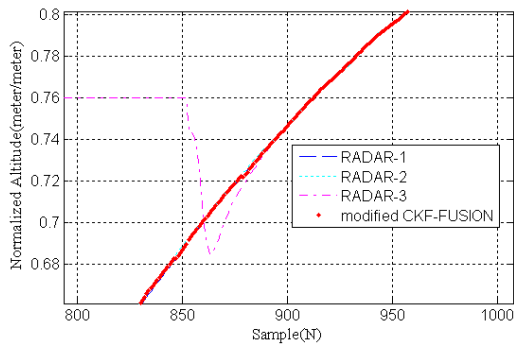


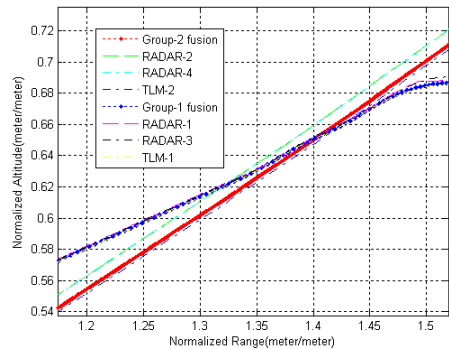
Fig. 10. Result of Modified Centralized Kalman Filter for MLRS Flight Test

Fig. 11은 유도 비행체의 연합형 칼만 필터를 수행한 예를 나타내며 융합 결과가 기준치인 TLM과 거의 유사하게 나타났다. Fig. 12는 유도 비행체의 고장 검출 기능을 시뮬레이션을 통하여 살펴본 것이다. 융합 결과, 특정 구간(샘플 1995 부근)에서 TLM의 고장이 발생하였으며, 다른 부 필터인 RADAR-3의 결과가 참조 되므로써 융합 결과가 향상될 수 있음을 보여주고 있다.

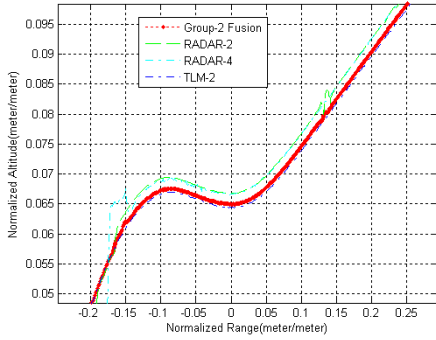
3.2 다중표적 자료융합 결과

다중표적 자료융합 결과를 살펴보기 위해 유도 비행체의 표적 그룹별 자료융합(칼만 집중형 필터) 결과를 살펴보았다.

Fig. 13(a)는 다중표적 자료융합 결과를 나타내며, 그룹-1 융합결과(청색)와 그룹-2 융합결과(적색)가 각 그룹의 대표 궤적을 나타냈다. Fig. 13(b)에서는 저고도에서의 그룹-2 융합결과를 나타내며 레이더의 저고도 오차에도 개선된 결과를 보여주고 있다.



(a) Result of Group Data Fusion



(b) Group-2 Fusion at Low Altitude

Fig. 13. Result of Multiple Target Data Fusion

3.3 자료연동 결과

자료연동 시험은 원거리(해미)에 위치한 'X'지점(Start Point)에서 항공기가 이륙하여 안면도 부근으로 비행한 궤적을 레이더로 측정하여 효과를 살펴보았다. Fig. 14는 자료연동 수행 전후의 경도-위도, 경도-고도 비교결과를 나타낸다. 자료연동 수행 전후 비행은 각 1회씩 실시하였으며, 모두 'X'지점에서 출발하여 연동전(Without Slaving)은 고도 약 4,000m까지의 비행을, 연동후(With Slaving)는 고도 약 3,000m까지의 비행을 실시하였다. 자료연동은 해미 원격측정장치로부터 항공기의 탑재 항법장치 정보를 네트워크 송수신 하여 안흥 레이더에 제공하는 방법으로 수행되었다.

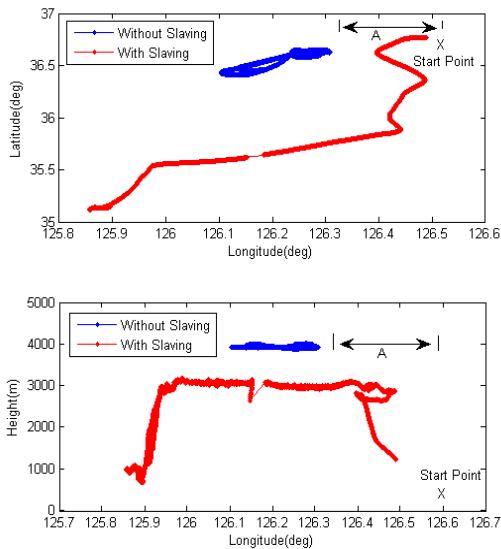


Fig. 14. Radar measurements for Data Slaving

Table 3. Comparison of FDRS and MT-FDPS

시스템 기능	자료수신시스템 (FDRS)	다중표적 자료처리 시스템(MT-FDPS)
적용 분야	단일 유도탄	단일 유도탄 및 다중표적 유도탄
계측 장비 연결수	5대	11대
자료처리 속도	10Hz	50Hz
자료연동	TLM만 연동	TLM, Radar 등 계 측장비간 상호연동
자료융합	X	O
원격지 자료처리	X	O

연동시험 결과, 자료연동을 수행하였을 때의 결과가 자료연동을 수행하지 않았을 때의 결과보다 비행초기 구간 A를 잘 계측하고 있어 자료연동을 통하여 레이더의 계측 능력이 개선되었음을 확인하였다. Table 3은 본 연구를 통해 설계된 MT-FDPS의 성능을 기존 시스템과 비교하여 요약한 것이다.

MT-FDPS는 다중표적 자료처리를 위해 계측장비의 처리속도를 약 5배, 계측장비 연결수를 2배 확장하였으며, 자료연동, 자료융합, 원격지 자료처리 등의 향상된 기능을 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다중표적 비행시험을 위한 자료처리 시스템의 설계와 수행결과에 대해 살펴보았다. 다중표적 자료처리를 수행하기 위해 표적그룹 처리, 자료융합 기술 및 자료연동 기술을 수행하였다. 표적그룹 처리는 각각의 표적을 그룹으로 설정하여 계측그룹별 융합을 수행하였다. 자료융합은 무유도/유도 비행체에 대해 집중형, 연합형 칼만필터를 설계하였다. 특히 레이더의 저고도 추적능력을 개선하기 위해 집중형 필터를 설계 개선하였으며 무유도 비행체에 적용하여 시험한 결과 향상된 융합 결과를 얻을 수 있었다. 자료연동은 원거리에 위치한 항공기를 레이더로 계측하여 연동전후를 비교하였으며, 비행초기 구간의 계측능력이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

본 시스템 개발을 통해 다중표적 비행시험과 시험장간 합동시험이 가능하게 되었으며, 향후 계측자료뿐만 아니라 시뮬레이션 자료를 연동하여 개선한다면 모델링/시뮬레이션 기반 시험평가 기술 발전에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) 김용, "대공유도무기체계 발전추세", 국방과 기술, 제 358호, 2008. 12.
- 2) Army Test Resources Master Plan, 2005. 12.
- 3) David L. Hall, Mathematical Techniques in Multisensor Data fusion, Artech House, 1992.
- 4) Edward Walts James Llinas, Multisensor Data Fusion, Artech House, 1990.
- 5) K.V.Ramachandra, Kalman Filtering Techniques for Radar Tracking, 2000.
- 6) Y. GAO, E.J.KRAKIWSKY, M.A.ABOUSALEM, Comparison and Analysis of Centralized, Decentralized, and Federated Filters, Journal of The Institute of Navigation, Vol. 40, No. 1, 1993.
- 7) 이용재, 비행시험통제용 탄도추적 자료융합 알고리즘, 아주대학교 박사학위논문, 2007.
- 8) 박석구, GPS반송파와 INS/GPS 결합기법 연구, 서울대학교 박사학위 논문, 2001.
- 9) 적응 칼만필터를 고가속 GPS 수신기의 항법정확도 향상, 한국군사과학기술학회지 제12권 1호, 2009. 2.