

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.10.946>

제주 국제 공항의 Protection Level 관점에서

GBAS 가용성 및 요구 조건 분석

안종선*, 원대희*, 성상경*, 허문범**, 이은성**, 이영재*

Analysis of GBAS Availability and Requirement
with respected to Protection Level at Jeju International AirportJongsun Ahn*, Dae Hee Won*, Sankyung Sung*, Moon-Beom Heo**,
Eunsung Lee** and Young Jae Lee*

ABSTRACT

This paper presents the simulation results of GBAS availability and requirement (with respected to Vertical Protection Level) using simulated data at CAT I, CAT II/III DH point (Decision Height), which are generated using Jeju international GNSS reference position, aircraft horizontal velocity and reference/aircraft GNSS antenna performance index and so on. Two kinds of protection levels are presented, one is from a null hypothesis (H0) and other is from a alternative hypothesis (H1). These protection levels are compared with AL (Alert Limit), and we analyse the GBAS availability and requirement for CAT I and CAT II/III at the airport.

초 록

본 논문에서는 제주 국제 공항에서 실시된 항공우주연구원의 비행 실험 데이터를 기반으로 항공기 착륙 상황을 시뮬레이션하고, Protection Level 관점에서 제주 국제 공항 GBAS 시스템의 가용성 및 성능 향상을 위한 요구조건을 분석하였다. 요구조건을 분석하기 위해, CAT I, CAT II/III의 결심고도에서 항공기 착륙 상황 (기준국 정밀좌표, 항공기 착륙 속도, 기준국 및 항공기 안테나 성능지표 등)을 Protection Level 계산에 적용하였다. 이 때 귀무가설 / 대립가설 (H0 / H1) Protection Level을 한계치 (Alert Limit)와 비교 분석하여, 현재 CAT I, CAT II/III의 가용도 및 개선 방향을 도출하였다.

Key Words : Ground Based Augmentation System(지역기반 위성항법 보강시스템), Decision Height(결심고도), Protection Level(보호수준), Jeju International Airport(제주국제공항)

I. 서 론

† 2011년 7월 18일 접수 ~ 2011년 9월 22일 심사완료

* 정희원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
교신저자, E-mail : youngle@konkuk.ac.kr

서울특별시 광진구 화양동 1번지

** 정희원, 한국항공우주연구원 위성항법팀

위성항법시스템 (GNSS : Global Navigation Satellite System)은 다수의 항법위성으로부터 전달되는 신호를 통해 계산된 측정값 (의사거리) 이용하여, 사용자의 위치를 계산할 수 있는 항법 시스템이다. 위성항법시스템은 현재 차량용 항법

장치에 많이 사용되고 있으며, 이를 항공기용 항법장치에 적용될 수 있는 연구가 진행되고 있다. 차량용 항법장치와는 달리 항공기용 항법장치의 경우, 안전성에 대한 엄밀한 연구가 필요하다. 이를 위해 국제 민간항공기구 (ICAO : International Civil Aviation Organization) 에서는 항공용 위성 항법시스템의 4대 요구조건 (정확성, 무결성, 연속성, 가용성)을 항공기 운항 요구조건 별로 설정하고, 이를 만족시킬 것을 권고하고 있다[1]. 이 중 GBAS (Ground Based Augmentation System)의 경우, 항공기의 공항의 정밀 접근 및 이착륙을 목표로 개발되고 있다.

본 논문에서는 무결성의 요구조건 중 항공기의 Protection Level 관점에서 제주 국제 공항의 가용성 및 요구조건 분석하였다. 이 때 분석 방법은 GBAS 항공기 운항 조건 중 CAT I, CAT II/III의 결심고도 (DH : Decision Height)에서 항공기 착륙 상황을 시뮬레이션하여 Protection Level을 계산하고, 이를 해당 운항 조건의 Alert Limit와 비교하여 가용여부를 판단하였다. 이를 통해 현재 제주 국제 공항에 GBAS 가 설치되었을 경우의 CAT I, CAT II/III의 가용도 및 성능 향상을 위한 요구조건을 정리하였다.

II. 본 론

2.1 GBAS

GBAS의 경우, 지역기반 위성항법보강시스템으로, 공항 내에 설치되어 있는 기준국 수신기 및 안테나를 통해 위성항법시스템 측정값 오차를 계산하고 이를 공항에 정밀 접근 및 이착륙하려는 항공기에 전송한다. 이를 통해, 일정 범위 내(23NM)에서는 높은 정확도 구현 (DGPS : Differential GPS 급)을 위한 서비스를 제공할 수 있다.

2.1.1 Protection Level, Alert Limit, 결심고도

GBAS를 통해 위치 정확도 향상은 기대할 수 있지만, 실제 위치 오차는 알 수 없다. 이를 예측하기 위해 설계된 지표가 Protection Level이다. Protection Level은 항공기 위치 오차를 발생시키는 요인 (신호 노이즈, 다중 경로, 대류층, 전리층, 지상국 보정정보 오차 등)등을 각종 상수와 위성양각에 따라 모델링된 수식을 통해 계산된다 [1]. 다양한 가설 설정을 통해 Protection Level을 계산할 수 있으며 귀무가설 (Null Hypothesis : H_0 , PL_{H_0}), 대립가설 (Alternative Hypothesis : H_1 , PL_{H_1})에 따라 계산식이 상이하다. 이 때 귀

무가설의 경우 'GBAS 관련 시스템에는 어떠한 고장이 발생하지 않았다'는 가정을 하며, 대립가설의 경우 'GBAS 기준국 수신기 1곳에서 고장이 발생하였다'는 가정을 하게 된다. 이 뿐만 아니라 항법메시지 고장 가설에 따른 Protection Level (PL_E)을 함께 계산하여 식 (1)과 같이, 가장 큰 Protection Level을 최종적인 GBAS의 Protection Level로 사용하게 된다.

$$PL = \max(PL_{H_0}, PL_{H_1}, PL_E) \quad (1)$$

Alert Limit의 경우, 허용 가능한 위치 오차의 한계치로 만약 Protection Level이 Alert Limit를 초과할 경우 관련 시스템은 가용할 수 없음을 의미한다.

결심고도는 항공기가 이착륙을 시도할 경우, 관련 운항 요구 조건 (CAT I, CAT II/III)에 따라 착륙을 결정하는 항공기의 높이 지점으로, 만약 관련 요구조건을 만족시키지 못할 경우, 항공기는 착륙을 포기하고 다시 고도를 높여야 한다. CAT I, CAT II/III의 결심고도는 그림 1과 같다.

그림 1은 실제 제주 국제공항서 실시된 GBAS 비행실험 데이터 (2009년 11월 21일) 기반으로 항공기의 시간대별 착륙 고도 변화를 나타낸다. CAT I에서는 200ft, CAT II는 100ft, CAT II/III는 0~100ft에서 Protection Level을 Alert Limit와 비교하여, 착륙 여부를 결정해야한다.

본 논문에서는 항공기 이착륙시의 중요한 고도 정보에 초점을 맞춰 수직방향의 Protection Level (VPL)을 계산하고 분석하였다.

2.1.2 귀무가설에서의 VPL 계산

귀무가설의 VPL의 경우, 식 (2)와 같이, 귀무가설하에서 사전에 결정되는 False Alarm (오경보율)을 만족시키는 마진 상수, 거리 오차를 위치 도메인으로 투영시키는 행렬, 그리고 거리 오

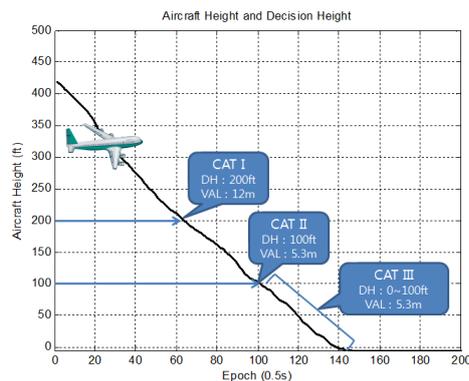


그림 1. 항공기 결심고도

차를 모델링한 분산 모델로 구성된다 [1].

$$VPL_{H0} = K_{ffmd} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{ver,i}^2 \times \sigma_i^2} \quad (2)$$

$$S = (G^T W G)^{-1} G^T W \quad (3)$$

$$G = \begin{bmatrix} -\cos E_1(k) \cos Az_1(k) & -\cos E_1(k) \sin Az_1(k) & -\sin E_1(k) & 1 \\ -\cos E_2(k) \cos Az_2(k) & -\cos E_2(k) \sin Az_2(k) & -\sin E_2(k) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\cos E_N(k) \cos Az_N(k) & -\cos E_N(k) \sin Az_N(k) & -\sin E_N(k) & 1 \end{bmatrix}_{N \times 4}$$

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_N^2 \end{bmatrix}$$

- K_{ffmd} : 귀무가설가설에서 Fault Free Missed Detection 확률에 의해 결정되는 마진 상수
- $S_{ver,i}^2$: 의사거리 오차를 수직방향 위치 오차로의 투영 (Projection) 행렬
- σ_i^2 : 각종 오차 성분의 분산 모델[1]
- E_i : 위성 양각 (Degree)
- Az_i : 위성 방위각 (Degree)
- N : 가시위성 개수
- W : 측정값 오차 가중치 매트릭스
- G : 위성 시선각 매트릭스

2.1.3 대립가설에서의 VPL 계산

대립가설의 VPL의 경우, 식 (5)와 같이, 기준국 1곳이 고장이 났다는 가정하에서, 지상국에서 전송되는 다중 기준국의 B-Value를 위치 도메인으로 투영시켜 가장 큰 영향을 미치는 기준국의 B-Value로 계산된 VPL을 사용하게 된다[1]. GBAS 다중 기준국에서 B-Value는 보정정보의 일치성을 나타내는 계산값으로, '0'에 가까울 수록 주변 기준국과 보정정보가 일치하는 것을 나타낸다.

$$VPL_{H1} = \max (VPL_{H1} [j]) \quad (4)$$

$$VPL_{H1} [j] = |B_{j,ver}| + K_{md,ver} \times \sum_{i=1}^N S_{3,i}^2 \sigma_{i,H1}^2 \quad (5)$$

$$B_{j,ver} = \sum_{i=1}^N S_{3,i} B[i,j] \quad (6)$$

$$B[i,j] = \frac{1}{M(k)} \sum_{l \in S_j(k)} PRC_{l,j}(k) - \frac{1}{M(k)-1} \sum_{l \in S_j(k), l \neq j} PRC_{l,j}(k) \quad (7)$$

- K_{md} : 대립가설에서 Missed detection 확률

에 의해 결정되는 상수

- $\sigma_{i,H1}^2$: 각종 오차 성분의 분산모델
- $B_{j,ver}$: j번 기준국의 모든 가시위성에 대한 B-Value를 수직 방향으로 투영
- $B[i,j]$: j번 기준국 수신기에서 생성되는 i위성 대한 B-Value (m)
- N : 가시위성 개수
- M : 수신기 개수
- PRC : 의사거리 보정정보 (Pseudorange Correction)

2.2 제주 국제 공항에서의 Protection Level 시뮬레이션 방법

제주 국제 공항에서 실시된 비행실험 데이터 (항공기 수평 속도, 기준국 좌표) 및 IGS에서 제공되는 정밀 위성좌표 정보 (SP3)를 사용하여, 결심고도 지점에서의 시간대별 Protection Level 분석하였다.

이를 위한 항공기 및 제주 국제공항 GBAS 지상 장비의 기본 조건은 표 2와 같다.

항공기의 속도의 경우, 실제 제주 국제 공항에서 한국항공우주연구원에서 수행되었던, 실제 항공기 비행데이터를 통해 얻은 결심고도에서의 항공기 수평 속도를 의미한다.

Sigma Inflation의 경우, 기준국에서 생성된 보정정보 오차의 분산 마진을 의미하며 [2], 대류층, 전리층 두께, 대류층의 Refractivity Uncertainty, $\sigma_{ver_iono_gradient}$ 정보는 관련 요구 문서 [3]에서 명시된 최대값을 사용하였다. 항공기 및 기준국 안테나 성능의 경우는 민간 항공기에 장착될 최

표 2. 시뮬레이션 기본 조건

항목	CAT I	CAT II/III
결심고도	200ft	100ft
항공기 속도	39.02m/s	38.64m/s
기준국 개수	4곳	
Sigma Inflation	2.78 [2]	
위성좌표	IGS SP3 ('11. 3.20 ~ 3.26)	
대류층 높이	25,500 m [3]	
Refractivity Uncertainty	255 [3]	
$\sigma_{ver_iono_gradient}$	25.5×10^{-6} [3]	
지구 반경	6378.1363km [3]	
이온층 두께	350km [3]	
기준국안테나 성능	GAD-C [2]	
항공기안테나 성능	AAD-B [2]	

고 사양의 위성항법시스템 안테나를 사용하였다 고 가정하였다 [2].

2.3 시뮬레이션 내용 및 결과

2.3.1 귀무가설 VPL을 통한 제주 국제공항 GBAS 가용도 및 요구조건 도출

- CAT I 결심고도에서의 VPL

제주 국제 공항의 결심고도 200ft (CAT I)에서의 VPL은 모두 CAT I의 VAL (Vertical Alert Limit) 12m 보다 낮은 수치를 보임에 따라, VPL 관점에서 가용성은 100%임을 확인하였다. 그림 2는 24시간 동안의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

- CAT II/III 결심고도에서의 VPL

제주 국제 공항의 결심고도 100ft (CAT II/III)에서의 VPL은 CAT II/III의 VAL 5.3m와 비교하여, 19.7%의 가용성을 보임을 확인하였다.

- CAT II/III 만족을 위한 요구조건 분석

CAT II/III의 상황에서 19.7%의 가용성을 향

상시키기 위해서, VPL 계산에 사용된 각종 오차 모델 및 Margin 상수 (K_{ffmd})의 재정립, Sigma Inflation Factor (SF : 2.78)의 감소가 필요하다. 본 논문에서는 SF를 1로 줄여, 그림 4와 같이, 가용성을 분석한 결과, 98.8%까지의 가용성 향상이 가능함을 알 수 있었다.

하지만 SF는 GBAS 시스템의 가용성 확보를 위해 정상상태의 의사거리 보정정보 오차 (PRC Error)의 분산의 '몇 배수'를 나타내는 상수로, 실제로는 Non-Gaussian 특성이 있어 실제로는 분산 (SF=1) 이상의 값을 사용해야 한다 [4].

이렇듯 SF 조정을 통해, 현재 CAT II/III를 만족시키기는 현실적으로 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 새로운 VPL 계산 알고리즘 및 오차 모델 생성, 추가적인 위성항법시스템이 필요함을 알 수 있다.

2.3.2 대립가설 VPL을 통한 제주 국제공항 GBAS 가용도 및 요구조건 도출

대립가설의 VPL의 경우, 식 (5)와 같이, 기준국에서 전송되는 B-Value 정보가 사용된다. 각 기준국마다 동일 위성에 대해 생성되는 B-Value를 모두 VPL 계산식에 적용하여, 가장 큰 위치 오차에 영향을 미치는 수신기의 B-Value를 사용함으로써 '수신기 1곳이 고장이라는 가설'을 적용하게 된다. 일단 B-Value를 '0'으로 설정하여 기준국 오차가 없다고 가정하여 이를 통해, 그림 5와 같이 대립 가설 하에 각 요구조건 (CAT I,II,III)의 Alert Limit와 차분하여 각 요구조건을 만족을 위해 허용 가능한 Protection Level 마진을 계산하였다. Protection 마진을 계산하여 수신기의 B-Value 요구조건을 산출하였다.

대립가설의 경우 '기준국에 고장이 발생하였다'로 가정하였으므로, 다른 기준국과 차이가 나

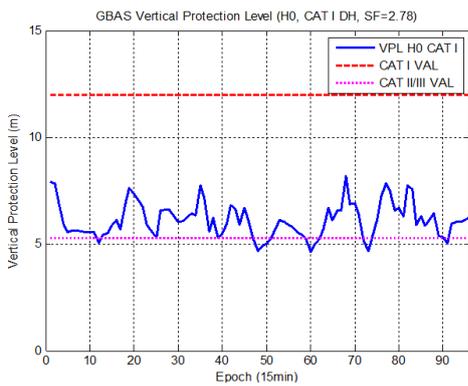


그림 2. CAT I 결심고도에서의 VPL (H0)

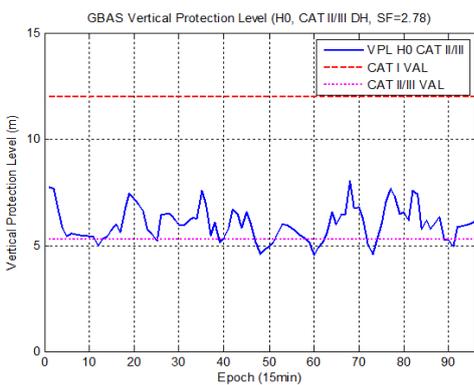


그림 3. CAT II/III 결심고도에서의 VPL (H0)

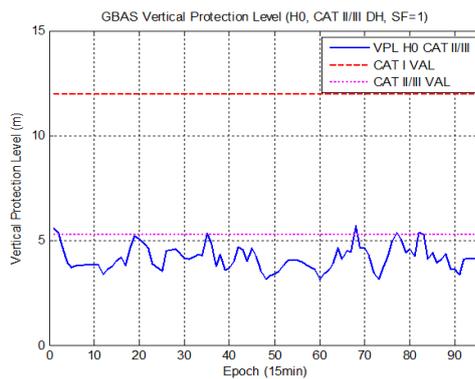


그림 4. CAT II/III 결심고도에서의 VPL (H0, SF=1)

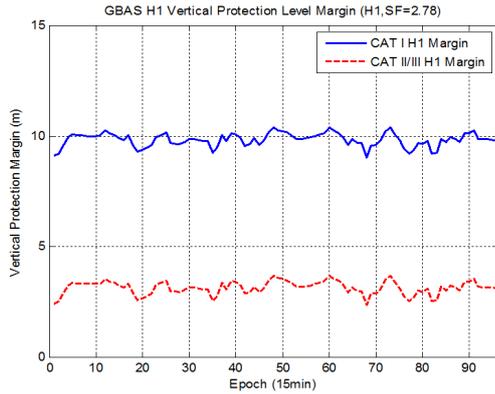


그림 5. CAT I, CAT II/III 결심고도에서의 대립가설의 Marginal Protection Level (H1)

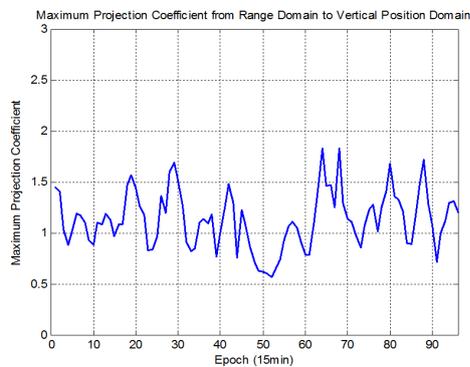


그림 6. 시간대별 B-Value의 위치 영역 최대 투영 값

는 다른 기준국과 비교하여 상대적으로 높은 B-Value를 계산되었다는 것은 고장일 확률이 높은 것을 의미한다.

B-Value 점차 증가시켜, 이를 식 (8)과 같이, 위치 영역으로 투영시켜, Protection Level의 증가폭을 관찰하였다.

$$\Delta \hat{x}(j)_{error} = S_{[4 \times i]} \cdot [B-Value(i, j)] \quad (8)$$

이 때 위치 투영 매트릭스 ($S_{[4 \times i]}$), [2]의 계수 중 최대치를 위치영역으로 투영시키는 값에, B-Value를 적용하였다. 이를 시간대 별로 나타낸 결과는 그림 6과 같다.

그 결과 그림 7, 8과 같이, CAT I 결심고도에서는 B-Value의 최대 허용치는 약 4.8m 이며, CAT II/III 결심고도에서는 약 1.25m 임을 확인하였다. 지금까지의 결과를 표 3에 정리하였다.

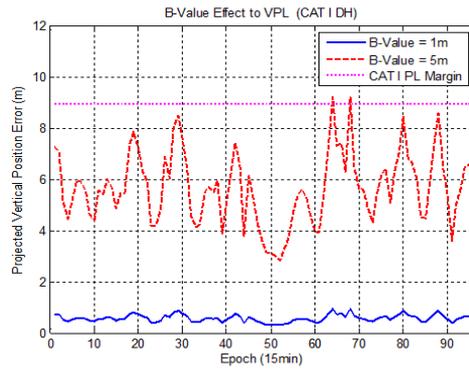


그림 7. CAT I 결심고도에서의 B-Value 마진 (H1)

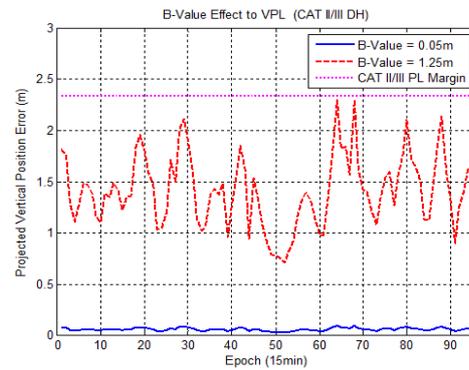


그림 8. CAT II/III 결심고도에서의 B-Value 마진 (H1)

표 3. 제주 국제 공항의 GBAS 가용성 및 기준국 요구조건

	귀무가설	대립가설
CAT I	가용성 100%	B-Value < 4.80m
CAT II/III	가용성 19.7%	B-Value < 1.25m

귀무가설하에서는, CAT I, CAT II/III에서의 결심고도에서 분석한 결과, CAT I의 Protection Level의 요구조건은 100%, CAT II/III에서는 19.7%를 만족시키는 것을 확인하였다. CAT II/III를 만족시키기 위해서는 기준국 보정정보 분산 마진값 (Sigma Inflation Factor)의 감소만으로는 현실적으로는 어렵다는 것을 Protection Level 관점에서 확인하였고, 다중 위성항법시스템의 활용이나, 새로운 Protection Level 계산식 유도가 필요하다.

대립가설하에서는 B-Value를 점차 증가시켜 Protection Level을 계산하였을 때, CAT I 상황에서

의 기준국 B-Value는 약 4.8m, CAT II/III 상황에 서는 약 1.25m을 만족시켜야한다. 이는 다중 기준 국 보정정보 생성의 요구조건으로 활용될 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는, 제주 국제 공항에 착륙하는 항 공기 데이터 (결심고도 좌표, 항공기 속도)를 바탕으로, 제주 국제 공항에서의 GBAS 가용성 및 요구도 분석을 위한, 시뮬레이션 데이터를 생성 하였다. 분석 방법은, 귀무가설 (H0), 대립가설 (H1) Protection Level을 계산하여 Alert Limit와 비교하여 가용성 여부를 확인하였다. Protection Level 관점에서 CAT I, CAT II/III의 가용 여부를 확인하였지만, 완벽히 요구조건을 만족시키기 위해서는, 본 논문의 결과 뿐만 아니라, 다양한 관점 (정확성, 무결성, 연속성, 가용성)에서 만족 여부를 검증해야한다. 하지만 제시된 요구조건 또한 CAT I, CAT II/III를 만족시키기 위한 필요조건이므로, 이를 수치적으로 분석 후 제시했 다는 데 결과의 의의가 있을 수 있다.

향후에는 Protection Level 관점 뿐만 아니라 다양한 관점에서의 GBAS 가용성 여부를 분석할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 건국대학교의 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- 1) RTCA/DO-253A, 'Minimum Operational Performance Standard for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment', Nov. 2001, pp 37~39
- 2) Jiyun Lee, 'GPS-Based Aircraft Landing Systems with Enhanced Performance : Beyond Accuracy', Ph.D Thesis, Stanford Univ., March 2005
- 3) RTCA/DO-246B, 'GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Signal-In-Space Interface Control Document (ICD)', Nov. 2001, pp. 26
- 4) Boris Pervan, Ifran Sayim, 'Sigma Inflation for Local Area Augmentation of GPS', IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 37, No. 4, Oct., 2001