

고정밀 표준 시각/주파수 신호의 위성방송 서비스를 위한 무궁화 위성의 실시간 위성궤도 결정 기술

정회원 이기훈*, 윤재철**, 서종수*

Dynamic Orbit Determination for Geostationary Satellite Broadcasting of Highly Accurate Standard Frequency/Time Signal

Kee-Hoon Lee*, Jae-Cheol Yoon**, Jong-Soo Seo* *Regular Members*

요 약

본 논문은 정지궤도위성을 이용한 고정밀 표준 시각/주파수 방송 서비스를 위해 요구되는 정지궤도위성 궤도추적 정확도를 개선할 수 있도록 기존의 무선 지점결정 기술인 trilateration에 확장칼만필터(EKF : extended Kalman filter)를 결합한 EKF-trilateration 방식을 제안하고 차동보정 방식, 국내 및 국외 보정국을 이용한 trilateration 방식과 시각 정확도를 비교 분석하였다. EKF-trilateration 방식은 ECF-좌표계상의 각 축별 오차를 수백 m이내로 줄임으로써 위성궤도 추적 정확도를 10배 개선할 수 있었다. 한국과 같이 영토가 작은 국가의 경우 위성궤도 결정에 참여하는 국내 보정국들이 형성하는 기하학적 조건 (GDOP)이 매우 열악함에도 불구하고, 국내 보정국만을 이용한 EKF-trilateration 방식을 사용하여 수 ns 이내(주파수 안정도 : 10^{-14} [7일이상])의 시각 정확도로 표준 시각 방송 서비스를 한반도 전역에 제공할 수 있다.

ABSTRACT

In this paper we propose extended Kalman filter (EKF)-trilateration method which associates EKF to conventional radiolocation technique, trilateration in order to improve the accuracy of dynamic orbit determination of geostationary satellite for broadcasting of highly accurate Standard Time/Frequency Signal (STFS). We then compare to analyze the time accuracies of three techniques which are differential mode, trilateration locating one of four calibrated earth stations on a neighboring country, and domestic-only baseline EKF-trilateration. Computer simulations have shown that in spite of domestic-only baseline EKF-trilateration of poor GDOP, it is possible to track and locate satellite with an accuracy of a few hundred meter which is the performance 10 times more accurate than trilateration can provide. Finally we can provide standard time service with the time accuracy better than a few ns (frequency stability : 10^{-14} over 7 days) all around Korea peninsula.

1. 서론

고정밀 표준 시각/주파수 방송 서비스는 수백 Mbps의 차세대 고속 광대역 유·무선 통합망 구현에 필수적이며 통신, 방송 및 위치정보 서비스 분야의 기반 기술이다. 특별히 위치정보 서비스를 일부

국가에서는 PCS 단말기의 필수 사양으로 채택하고 있는 실정이다. 한국의 경우 이동통신망의 동기는 전적으로 미국의 GPS 시스템에 의존하고 있으므로 유사시 국가 기간망의 정상적 운용을 위하여 독자적인 시각/주파수 동기 시스템의 구현이 절실하다. 정지궤도 위성을 이용한 표준 시각/주파수 신호(이하 STFS : Standard Time/Frequency Signal)의 방

* 연세대학교 전기전자공학과 디지털전송연구실(powerlee@yonsei.ac.kr, jsseo@yonsei.ac.kr),

** 연세대학교 천문우주학과(yjch@galaxy.yonsei.ac.kr)

논문번호 : 010381-1208, 접수일자 : 2001년 12월 8일

송 서비스는 매우 효과적이고 경제적인 선택으로서 인도는 자국 정지궤도 위성 INSAT을 이용한 STFS 방송 서비스를 1990년부터 인도전역에 제공하고 있다^{[1][2]}.

일본의 CRL(Communications Research Laboratory)은 정지궤도위성(BS-3)을 이용하고 네 개의 보정국들이 BS-3으로부터 수신하는 유색 부반송파(color subcarriers)의 도플러 천이를 측정하여 위성의 속도 벡터를 결정하는 새로운 주파수 전송 방식을 제안하고 실험을 수행하였다. 보다 높은 정확도를 제공할 수 있는 GDOP(Geometric Delusion Of Precision) 조건 하에서의 실험을 위해 보정국을 일본열도에 세 개, 국외 보정국으로 한국의 대전에 한 개를 배치하였으며 보정국간의 주파수 동기를 유지하였다. 실험결과 1000초의 평균시간에 대해 10^{-11} ($\approx 3 \times 10^{-13}$ [7일 이상])의 주파수 안정도로 주파수 전송이 가능하였다^[3]. 국내에서는 한국통신이 1999년부터 무궁화 위성을 이용하여 단방향 방식으로 시각 정확도 100 ns, 주파수 안정도 10^{-11} (7일이상)을 개발목표로 시각 전송 기술 연구개발을 시작하여 2001년 상용화 서비스를 목표로 진행 중이다.

정지궤도위성을 이용한 고정밀 표준 시각/주파수 방송 서비스를 위해 오차발생의 주요인인 위성궤도 추적 정확도의 개선이 필수적이다. 차동보정 방식은 알고리즘의 특성상 14일의 갱신주기를 갖는 예측 위성궤도와 실제 위성궤도의 차이에서 기인하는 위성위치 오차를 완벽히 보정할 수 없다^[2]. STFS를 송신하는 주송신국으로부터 사용자 단말기 위치가 변화함에 따라 ECF-좌표계를 중심으로 위성-사용자단말기간 slant range가 변화한다. Slant range가 증가함에 따라서 위성궤도 추적 오차는 시각/주파수 동기 오차의 주요인을 작용하게 된다^[2]. 단방향 전송 방식의 표준 시각/주파수 방송 서비스의 정확도를 개선할 수 있는 방법중의 하나는 실시간 위성궤도 추적 기술을 적용하는 것이다^[1]. Trilateration은 네 개의 지상 보정국을 이용하여 실시간으로 위성 위치를 결정하는 기술로서, 충분히 넓게 분포된 보정 지구국들의 조합이 필요하며 적어도 하나의 보정국이 나머지 보정국들로부터 충분히 이격(수천 km)되어야 정확한 위성위치 추적이 가능하다^{[2][4]}. 한국과 같이 작은 영토를 가진 국가가 trilateration 기술을 적용하기 위한 충분히 이격된 보정국의 배치가 사실상 불가능하므로, 본 논문에서는 국내 보정국만을 배치하여 위성위치 추적 정확도를 개선하고자 하였다.

본 논문은 시각/주파수 동기 오차의 주요인인 위성위치 오차를 최소화하기 위해서 무선 지점결정 기술인 trilateration에 확장칼만필터(EKF)를 결합한 EKF-trilateration 방식을 제안하고 성능을 차동보정 방식, 하나의 국외 보정국을 세 개의 국내보정국들과 함께 사용하는 trilateration 방식의 성과와 비교 분석하였다. 2장에는 시각/주파수 동기오차 요인을, 3장에는 시각동기오차 보정 방식을 각각 정리하였다. 4장에는 EKF-trilateration 방식을 소개하고 추적 성능 및 이를 적용한 시각동기 오차 contour를 제시하였으며 5장에서 결론을 내렸다.

II. 시각/주파수 동기오차 요인

STFS 방송 서비스의 동기 성능은 동기 시스템에 적용된 보정방식, 주파수 대역폭, 변조방식 등에 영향을 받는다. 시각 동기 정확도는 직접적으로 주파수 보정 정확도에 영향을 주기 때문에 먼저 시각 동기 오차에 영향을 주는 요소를 모델링하고 오차의 크기를 분석하는 것이 효과적인 보정 알고리즘을 연구개발하기 위해 필수적이다. 정지궤도위성을 이용한 STFS 전송은 주기적궤도운동을 하는 위성까지의 전파지연시간 변화를 효과적으로 보상하는 기술을 요구한다. 위상잡음 변조로 표현되는 전파지연시간 변화는 아래 세 가지 요인들 중 하나 또는 하나 이상에 의해 발생된다^{[4][5]}.

- 1) 수신 신호의 열화
- 2) 송·수신기간 기하학적 거리의 변화
- 3) 전송 매체의 특성 변화

표 1에는 정지궤도 위성을 이용한 시각/주파수 전송 시스템의 전형적인 동기오차의 크기를 요인별로 정리하였다.

표 1. 정지궤도 위성을 이용한 시각/주파수 전송 시스템의 전형적인 동기오차 요인과 크기

동기오차 요인	오차 크기
위성궤도 추적 오차	3~6 μ s
전리층 지연	2 ns
대류권 지연	14~20 ns
수신 시스템의 dispersion	20 ns
지구국 안테나 좌표 / 1 미터	3 ns
Sagnac 효과 / 1° 경도 차이	3 ns

III. 시각 동기오차 보정

3.1 차동 보정 방식

한국의 경우 송신기준국에서 수신지구국까지의 최대거리가 500 km인 것에 비해 지구국에서 위성까지의 거리는 약 36,000 km가 되므로 임의의 두 지구국과 위성간을 연결하는 경로는 매우 작은 각을 이루게 되어 대부분의 오차 요인들은 한국 전역에 대해 거의 동일한 값을 가지며 이를 공통 모드(common mode)라고 부른다. 특정 지구국의 오차로부터 송신 기준국에서 기록된 오차를 뺌으로써 이러한 공통 모드의 오차 요인들 대부분이 제거될 수 있다. 이러한 보정 방식을 차동 보정(differential correction)이라고 하며, 시각/주파수 동기오차의 결정적인 요인들인 위성궤도 예측 오차와 대류권, 전리층의 영향을 최소화할 수 있다. 차동보정 방식을 사용하여 얻을 수 있는 시각동기 정확도는 다음과 같이 표현된다^{[2][6]}.

$$\Delta T_A = \Delta T_{PA} - \Delta T_{PN} = \frac{1}{c} (\hat{y}_A - \hat{y}_N) \cdot \Delta \bar{S} \quad (1)$$

여기서 $\Delta \bar{S}$ 는 ECF-좌표계상 세 축의 값으로 표현되는 위성위치 오차, \hat{y}_A 와 \hat{y}_N 는 각각 위성~수신지구국(A), 위성~수신지구국(N)까지의 단위 벡터, 그리고 c 는 빛의 속도를 의미한다. 또한 ΔT_{PA} 와 Δ

T_{PN} 은 송신지구국 T 를 수신지구국 A 및 N 과 결합한 경우의 전파지연 오차이다. 식 (1)에서 보듯이 ΔT_A 는 송신지구국 T 와 수신지구국 A 를 동일지점에 위치시킴(T 와 A 간 slant range 차이 ≈ 0 km)으로써 단위 벡터(range vector) 차이와 위성위치 오차에 따라 시각동기 정확도가 결정됨을 알 수 있다. 그림 3에는 세 축에 대한 위성궤도 추적 오차가 각각 2 km인 경우 단위벡터 차이에 따른 차동보정 방식의 시각동기 오차 contour를 보이며 한반도 전역에 약 100 ns 오차 이내의 시각동기를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 Trilateration 기술

Trilateration 방식은 세 개(또는 그 이상)의 보정된 지구국들에 의해 수집된 데이터를 사용하여 위성위치를 결정한다. 보정된 지구국들의 clock들간의 윗셋은 독립적인 방법에 의해 결정될 수 있다. 보정 지구국들의 각 쌍에 의해 획득되는 전파지연시간 측정값들은 다음의 쌍곡선 방정식으로 표현되는 프레임 이내에 존재하게 되는 위성위치의 제한범위를 제공한다.

$$\left(\frac{X_s^2}{\frac{d_{AB}^2 - c^2 T_{AB}^2}{4}} \right) + \left(\frac{Y_s^2}{\frac{d_{AB}^2 - c^2 T_{AB}^2}{4}} \right) - \left(\frac{Z_s^2}{\frac{c^2 T_{AB}^2}{4}} \right) = -1 \quad (2)$$

여기서 d_{AB} 는 두 보정국간의 거리를 나타내며, T_{AB} 는 지구국 A 와 B 간에 측정된 차등 전파 지연, c 는 빛의 속도, (X_s, Y_s, Z_s) 는 채택된 프레임내에서의 위성의 좌표이다. 실제적으로, 두 쌍(AB, BC)에 의해 만들어진 위성좌표 결정을 위한 두 개의 방정식과 두 방정식의 선형 조합인 세 번째 방정식을 풀어 두 지점의 위치를 얻고, 세 개의 보정된 지구국들로부터 충분히 이격된 네번째 지구국의 추가를 통해서 정확한 위성위치를 결정할 수 있다^{[4][7]}.

Trilateration 기술을 적용하여 무궁화 3호 위성의 위치 추적성능을 시뮬레이션 하기 위해서 다음 네 가지 사항을 설정하였으며, 시뮬레이션 결과를 STK(Satellite Tool Kit)를 통해 획득한 무궁화위성 3호의 위치와 비교하였다.

- 1) 강릉, 제주, 부산, 동경(또는 타이페이) 등 4개의 지구국을 trilateration을 위한 base로 설정한다.
- 2) 무궁화 3호의 궤도가 실제 운동과 동일한 특성을 가질 수 있도록 위성이 받은 섭동들을 고려한 시뮬레이션 궤도를 생성한다.

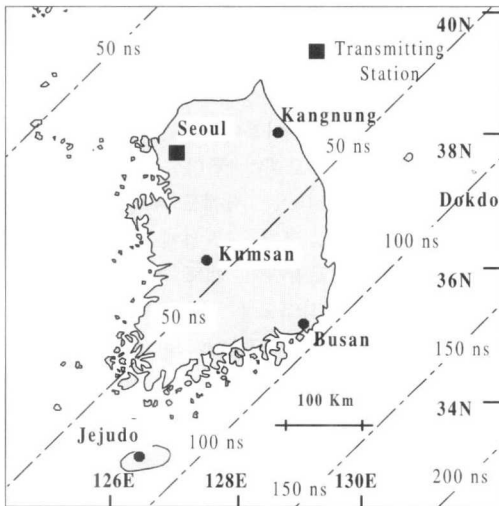


그림 1. 송신기준국(서울)~수신지구국간 거리에 따른 차동보정 방식의 시각동기 오차 contour (3축에 대한 위성궤도 예측 오차가 각각 2 km인 경우)

3) 시간에 따른 각 지구국과 위성간 거리를 구한 다음, 이를 빛의 속도로 나누어 각 지구국 조합사이의 차동 전파지연 시간을 구한다.

4) 지구국 조합 사이의 차동 전파지연 시간 관측 오차(10 ns)를 추가한다.

무궁화위성 3호(112°E)는 지구국들(127°E)과의 경도차이가 상대적으로 커서 위성추적의 부정확성을 증가시킨다. 충분히 이격된 하나의 보정국을 동경(138°E)에 배치하였을 경우와 타이페이(121°E)에 배치하였을 경우의 위성추적 정확도를 비교한 결과 타이페이를 국외보정국으로 배치하는 것이 약 10배 정도 성능이 우수하였다⁸⁾. 이는 최적의 국외 보정국 선정을 통해 더욱 정확한 위성궤도 추적이 가능함을 보여주는 결과이다. 위성위치의 추적 정확도를 더욱 높이기 위해서는 차동 전파지연 시간의 관측 오차를 더욱 감소시킬 수 있는 기술을 적용하거나 또는 최적의 추적 성능을 제공할 수 있는 국외보정국의 좌표를 찾아야 한다. 그러나 두 번째 방법은 작은 영토를 가진 국가에서는 획기적인 성능향상을 기대하기 어렵다고 판단하고 첫 번째 기술의 적용을 위해 Extended Kalman Filter를 사용하여 관측 오차를 최소화하는 EKF-trilateration 방식을 고려하였다.

3.3 서비스 반경 축소

시각 동기 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 또 하나의 방법으로서 STFS의 송신기준국을 서울대신 대덕이나 금산에 설정함으로써 식 (1)에서의 위성~송신기준국 및 위성~사용자 단말기가 형성하는 단위벡터 차이의 최대 값을 줄이는 방법을 고려할 수 있다. 그림 3에서 보듯이 송신기준국으로부터 사용자 단말기까지의 북서 및 남동 방향 이격거리가 증가함에 따라 차동보정 방식의 시각동기 오차가 증가한다. 금산기지국(전국 수신반경 350 km)과 대덕기지국(전국 수신반경 420 km)을 송신기준국으로 사용하는 경우 시각동기 오차를 각각 40 ns와 50 ns 이내로 개선할 수 있었다. 또한 하나의 주 송신기준국과 함께 다수의 부 송신기준국 설정함으로써 서비스 반경을 줄일 수 있어 평균 서비스 반경의 축소에 비례하는 성능향상이 가능하며 사용자 요구에 따른 서비스 반경 설계도 가능할 것이다¹⁶⁾.

IV. EKF-trilateration 방식의 위성궤도 결정

Trilateration 방식에서 보정지구국들을 서로 너무

가까이에 배치하면 보정국들과 위성이 형성하는 기하학적 구조에 의해 결정되는 GDOP가 큰 값을 가지게 되어 위성위치 결정의 부정확성을 높게 된다. EKF-trilateration은 trilateration의 기하학적 단점을 극복하기 위해 제안된 방식으로서 네 개의 보정지구국의 조합으로부터 각각의 쌍(pair)을 이룬 두 보정지구국간의 시간차를 측정하여 실시간 궤도 결정을 위한 관측 값을 획득한다. 이러한 과정은 trilateration에서와 동일하다. 그러나 EKF-trilateration에서는 기준궤도를 제공하기 위한 정밀한 궤도 섭동 모델이 적용되며 정지궤도위성의 위치와 속도를 실시간으로 추정하기 위해서 확장칼만필터(EKF)가 사용되는 것이 차이점이다. EKF 처리에서의 정밀한 기준 상태를 발생시키기 위해서 위성의 운동방정식(equation of motion)과 변화방정식(variational equation)들은 Adams-Cowell 11차 예측자-수정자(predictor-corrector) 방식을 사용하여 수치적으로 적분된다. 중력포텐셜, 태양과 달의 중력, 태양복사압, 지구자장 및 해양의 조석력, 그리고 지구의 극운동과 같은 섭동요소들을 모델링하였다. 본 연구를 위해 적용된 중력포텐셜 모델은 EGM-96으로서, 위성의 궤도결정에 사용되는 최근의 여러 모델들중 가장 정밀한 모델로 인정되고 있다. 지구자장 및 해양의 조석 모델들은 정밀한 조석력 분석을 위해 지상 추적 및 고도 데이터들이 사용된 모델로서 Colombo에 의해 제시된 것이다. 태양과 달의 천체력(ephemeris)은 JPL에서 제공된 DE403 데이터로부터 Chebyshev 보간에 의해 계산된다. 위성에 미치는 태양복사압력의 분석을 위해서 box-wing macro 모델이 사용되었는데, 이 모델은 위성을 태양전지판과 육면체(box) 형태로 배정된 평판(flat plate)의 조합으로 이루어진다고 가정하며, 위성의 자세모드가 결합되어 모델링 된다. 본 연구에서 적용된 섭동모델의 정밀도는 저궤도 위성에 대해 적용되어 검증되었는데, 저궤도 위성에 대해 대기밀도 모델 MSISE-90을 포함하여 궤도 결정한 결과 약 10 m 정도의 위치 정밀도를 얻을 수 있었다⁹⁾. 위성의 운동(dynamics)과 측정(measurements)을 처리하는 비선형 시스템을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t) + \omega(t) \quad (3)$$

$$y(t) = h(x(t)) + v(t) \quad (4)$$

여기서 $x(t)$ 는 상태 벡터, f 는 섭동 모델을 고려하여 유도된 운동 방정식, 그리고 h 는 측정 방정식이다. 이 모델은 부가된 상호 연관성이 없는 백색 잡음 프로세스 w 와 v 를 가정함에 따라 제한되지만, 궤도결정에 일반적으로 사용되는 전형적인 모델이다. 식 (5)와 (6)을 만족하는 기준상태 \bar{x} 가 정의될 때,

$$\dot{\bar{x}}(t) = f(\bar{x}(t), t) \quad (5)$$

$$\bar{y}(t) = h(\bar{x}(t)) \quad (6)$$

실제관측과 계산의 의한 관측간의 차이가 만들어내는 측정 잔차(residuals) 출력은 다음 식에 의해서 계산된다.

$$z(t) = y(t) - \bar{y}(t) \quad (7)$$

동역학 오차를 작게 유지하기 위해서는 시간 간격을 작게 유지하거나, $\|x(t) - \bar{x}(t)\|$ 을 작은 값으로 유지할 수 있도록 하는 메커니즘이 사용되어야 한다. EKF의 경우 평균 상태는 추정상태와 동일한 것, 즉 $\bar{x}(t) = \hat{x}(t)$ 으로 정의될 수 있다.

시간 t_{k+1} 에서의 예측된 상태 $\hat{x}^-(t_{k+1})$ 와 t_k 에서 t_{k+1} 로의 상태전이 행렬 ϕ 는 운동 및 변화 방정식들을 수치적분 함으로써 계산된다. 시간 t_{k+1} 에서의 공분산(covariance) 행렬 P 는 상태전이 행렬을 사용하여 예측된다.

$$\phi(t_k) = \left. \frac{\partial \bar{x}(t_{k+1})}{\partial \bar{x}(t_k)} \right|_{\bar{x}(t_k) = \hat{x}^-(t_k)} \quad (8)$$

$$P^-(t_{k+1}) = \phi(t_k)P(t_k)\phi(t_k)^T + Q(t_k) \quad (9)$$

시간 t_{k+1} 에서의 측정 부분 미분 H 는 예측된 상태 $\hat{x}^-(t_{k+1})$ 를 사용하여 계산된다.

$$H(t_{k+1}) = \left. \frac{\partial \bar{y}(t_{k+1})}{\partial \bar{x}(t_{k+1})} \right|_{\bar{x}(t_{k+1}) = \hat{x}^-(t_{k+1})} \quad (10)$$

시간 t_{k+1} 에서의 실제 측정 $y(t_{k+1})$ 가 처리될 때, 상태와 공분산 행렬은 다음 방정식들을 사용하여

추정되고 갱신된다.

$$\hat{x}(t_{k+1}) = \hat{x}^-(t_{k+1}) + K(t_{k+1})z(t_{k+1}) \quad (11)$$

$$P(t_{k+1}) = \left\{ [I - K(t_{k+1})H(t_{k+1})]P^-(t_{k+1}) \cdot [I - K(t_{k+1})H(t_{k+1})]^T + K(t_{k+1})R(t_{k+1})K(t_{k+1})^T \right\} \quad (12)$$

여기서 I 는 단위 매트릭스이고 R 은 대각행렬로 가정된다. 칼만이득 행렬은 다음 식에 의해 계산된다.

$$K(t_{k+1}) = P^-(t_{k+1})H(t_{k+1})^T [R(t_{k+1}) + H(t_{k+1})P^-(t_{k+1})H(t_{k+1})^T]^{-1} \quad (13)$$

EKF-trilateration의 위성궤도 추정 정확도 개선 능력을 검증하기 위해서 표 2에 보인 국내 보정국 들만의 조합을 이용하여 동경 113° 에 위치하는 무궁화 위성의 궤도 추적과정을 시뮬레이션 하였다. 이 때, 네 개 보정지구국들의 표준 clock은 주파수 동기화 유지되는 것으로 가정하였다. 그림 2는 EKF-trilateration을 사용한 위성궤도 추적 정확도를 보여준다. 그림에서 보듯이 5 시간의 수렴시간을 가진 후, 세 축 성분 가운데 시각동기 오차에 가장 크게 영향을 미치는 Y축의 오차는 126 m RMS이다. 차동보정 방식에서 위성궤도 추적 오차 ΔS 는 세 축방향으로 각각 최대 2 km를 가정하였으나 실제로 이보다 더 큰 오차의 발생이 가능하다^[10]. 그러므로 수 km에서 수백 m로의 위성궤도 추적 정확도 개선은 획기적이라 할 수 있다.

표 2. EKF-trilateration 시뮬레이션을 위한 국내 보정지구국 설정

지구국	ECF 좌표		
	X(km)	Y(km)	Z(km)
1. 서울	-3044.845	4044.031	3867.114
2. 제주	-3168.735	4278.329	3500.437
3. 부산	-3290.803	4056.776	3647.484
4. 강릉	-3170.440	3929.676	3883.930
Pair I : 보정지구국 1과 2, Pair II : 보정지구국 2와 3, Pair III : 보정지구국 1과 4			

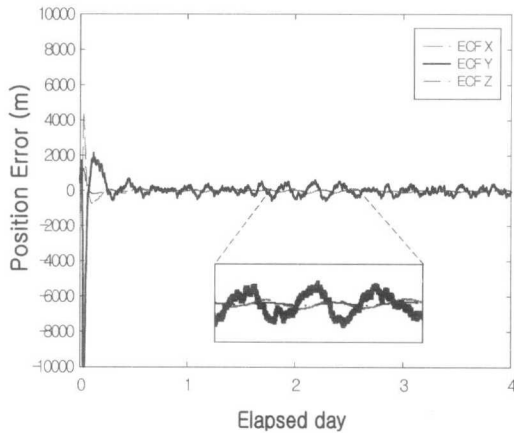


그림 2. EKF-trilateration을 적용한 위성위치 추적 오차

국내의 보정국들만을 이용한 trilateration은 기하학적 조건상 큰 GDOP로 인해 고정밀 위성궤도 추적 정확도를 제공하기 어렵지만, 정밀한 궤도 동역학 모델링과 통계적 추정 기술을 적용한 EKF-trilateration을 사용하여 무궁화위성의 고정밀 추정이 가능하였다. 위의 결과를 식 (1)의 ΔS 에 적용하여 얻게 되는 한국전역의 시각 정확도는 10 ns이내이며, 주파수 안정도는 평균 시간을 7일이상으로 했을 때 10^{-14} 으로 분석되었다. 금산지구국을 송신기준국으로 설정하고 위의 결과를 식 (1)에 적용함으로써 성능이 20배 향상된 시각동기 오차 contour를 그림 3에 보였다.

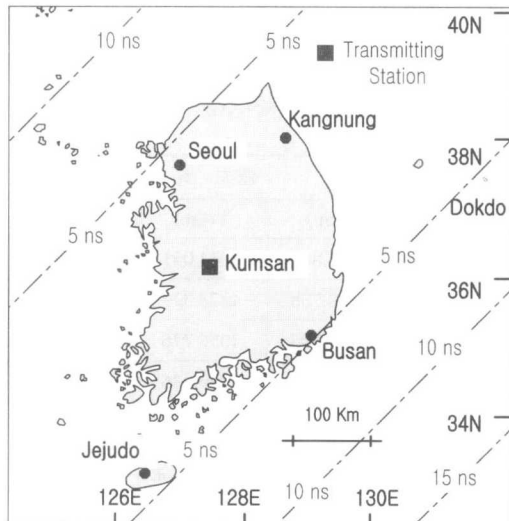


그림 3. EKF-trilateration을 적용하여 개선된 차동보정 방식

V. 결 론

본 논문은 정지궤도위성을 이용한 고정밀 표준 시각/주파수 방송 서비스를 위해 요구되는 정지궤도 위성 궤도추적 정확도를 개선할 수 있도록 기존의 무선 지점결정 기술인 trilateration에 Extended Kalman Filter (EKF)를 결합한 EKF-trilateration 방식을 제안하고 차동보정 방식, 국내 및 국외 보정국을 이용한 trilateration 방식과 성능을 비교 분석하였다. EKF-trilateration 방식은 ECF-좌표계상의 각 축별 오차를 수백 m이내로 위성궤도 추적 오차를 줄임으로써 시각/주파수 동기 오차를 10배 이상 개선할 수 있었다. 국내보정국들만을 이용하는 열악한 GDOP 조건에서도 본 논문이 제안하는 방식은 수 ns 이내(주파수 안정도 : 10^{-14} [7일이상])의 시각 정확도로 STFS 방송 서비스를 한반도 전역에 제공할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] A. Sen Gupta, Ashok K. Hanjura, and B. S. Mathur, "Satellite Broadcasting of Time and Frequency Signals," *Proc. IEEE*, vol. 79, No. 7, July 1991
- [2] A. Sen Gupta, and B. S. Mathur, "Standard Time and Frequency Signal Broadcast Via INSAT-Accuracy Improvements Using Differential Mode," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, VOL. 46, No. 2, pp. 212-215, Apr. 1997
- [3] Tahao Morikawa, et al., "An Experiment on Frequency Transfer Using a Geostationary Broadcasting Satellite," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, No. 2, pp. 216-219, Apr. 1997
- [4] Francois Meyer, "One-Way Time Transfer Using Geostationary Satellite TDF2," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, No. 2, pp. 103-106, Apr. 1995
- [5] Gernot M. R. Winkler, "Path delay, Its Variations, and Some Implications for the Field Use of Precise Frequency Standards," *Proc. IEEE*, vol. 60, No. 5, pp.522-529, May 1972
- [6] 이기훈, 최진욱, 서종수, "정지궤도위성을 이용

한 표준 시각/주파수 전송 시스템의 동기오차 보정 기술,” *한국통신학회지* vol. 17, No. 6, pp. 100-114, 2000년 6월

- [7] 이기훈, 윤재철, 신관호, 진봉철, 서중수, “무궁화 위성을 이용한 표준 시각/주파수 전송 시스템의 동기오차 보정 기술,” *한국통신학회 논문지* vol. 26, No. 11, pp. 100-114, 2001년 11월
- [8] J. S. Seo, A Study on Technique for Synchronization Error Calibration of Frequency & Time Signal Dissemination System via GEO-Satellite, *KJJC-SAT 2000 Proceeding*, Dec. 2000
- [9] Yoon J. C., Lee B. S., and Choi K. H., Spacecraft Orbit Determination Using GPS Navigation Solutions, *Aerospace Science and Technology*, vol.4, No.3, pp. 215-221, 2000
- [10] Lee, B. S., Lee, J. S., and Choi, K. H., “Analysis of a station-keeping Maneuver Strategy for collocation of Three Geostationary Satellites”, *Control Engineering Practice* 7, pp. 1153-1161, 1999

서 중 수(Jong-Soo Seo)

정회원



1975년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업
 1983년 12월 : 캐나다 오타와 대학교 전기공학과 석사
 1988년 6월 : 캐나다 오타와 대학교 전기공학과 박사
 1975년 4월~1981년 12월 : LG 정밀 중앙연구소
 1982년 1월~1987년 7월 : Univ. of Ottawa, 디지털 통신연구실
 1987년 7월~1989년 12월 : IDC, Canada
 1990년 1월~1992년 3월 : 삼성 종합기술원 정보시스템 연구소
 1992년 4월~1995년 2월 : CAL, Canada
 1995년 3월~현재 : 연세대학교 공과대학 전기전자공학과, 교수
 <주관심 분야> 위성통신, 방송시스템, 디지털 전송방식

이 기 훈(Kee-Hoon Lee)

정회원



1987년 3월 : 공군사관학교 항공공학과 졸업
 1996년 8월 : 미국 데이튼대학교 전기공학과 석사
 1999년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

1987년 3월~현재 : 공군 정보통신 장교
 <주관심 분야> 위성통신시스템, 시각/주파수 동기 기술, 대역확산통신

윤 재 철(Jae-Cheol Yoon)

비회원



1995년 3월 : 연세대학교 천문대 기과학과 졸업
 1997년 3월 : 연세대학교 천문대 기과학과 석사
 1997년 3월~현재 : 연세대학교 천문우주학과 박사과정

<주관심 분야> 위성궤도에측기술