

主題

정지궤도위성을 이용한 표준 시각/주파수 전송 시스템의 동기오차 보정 기술

연세대학교 이기훈, 최진욱, 서중수
한국통신 김진대

차례

- I. 서론
- II. 위성망을 이용한 시각전송 기술
- III. 시각/주파수 동기오차 요인
- IV. 동기오차 보정
- V. 시각 안정도와 주파수 안정도의 관계
- VI. 무궁화 위성용 STFS 전송 시스템의 성능개선 방안
- VII. 결론

요약

본 논문은 정지궤도위성을 이용한 표준 시각/주파수 전송 시스템의 동기오차 요인을 분석하고, 한국과 같이 영토가 작은 국가의 경우, 정지궤도 위성을 이용하는 방식의 이점을 단파 또는 광 전용망을 이용하는 지상망 방식, 그리고 저궤도 위성을 이용하는 GPS 방식과 비교 분석한다. 또한, 본 논문은 현재 서비스를 제공 중이거나 연구가 진행중인 단방향 위성 시각 전송 서비스를 고찰하고, 특히, 무궁화 위성을 이용한 고정밀도의 표준 시각/주파수 전송 서비스를 제공하기 위해 요구되는 동기오차 보정 기술에 관하여 연구한다. 국가적 통신망 동기를 위한 표준 시각/주파수의 동기 정확도를 만족시킬 수 있는 효과적인 동기 오차 보정 방식으로 차동(differential mode)보정 방식을 제안하고 그 성능을 분석하였으며 시각 정확도와 주파수 정확도의 관계를 분석하였다. 모의실험 결과, 정상적인 시스템 운영하에서 시

각 정확도와 주파수 정확도는 각각 100ns(95%)와 10^{-11} (7일이상) 보다 우수한 것으로 분석되었으며 본 논문에서 제시한 성능 개선 방안을 적용함으로써 보다 높은 정확도의 시각/주파수 동기가 가능함을 확인하였다.

I. 서론

시각/주파수 동기기술은 차세대 고속 광대역 유·무선 통합망 구현에 필수적이며 항법시스템 등 다양한 분야에서 광범위한 활용이 증가되고 있는 통신, 방송 및 위치정보 서비스 분야의 기반 기술이다. 현재 국내 유선통신망의 동기에는 다중 중계방식이 이용되고 있으나, 하부 계위로 갈수록 정확도 및 안정도가 떨어지는 단점이 있으며, 이동통신망의 동기는 전적으로 미국의 GPS 시스템에 의존하고 있으나 유사시 국가 기간망의 정상적 운용을 위하여 독자적

인 시각/주파수 동기 시스템의 구현이 절실하다.

시각/주파수 전송방식에는 정지궤도위성, GPS 위성과 같은 위성망 또는 지상망을 이용한 방식이 있으며 그 중 정지궤도위성을 이용한 방식이 유무선 통신망의 동기성능과 시스템 구현의 경제성 면에서 가장 적절한 방식으로 평가되고 있다[1]. 그러나 정지궤도위성을 이용한 시각/주파수 동기 기술은 최근 유럽, 일본, 인도에서 연구 개발되고 있는 첨단 기술로서 이들 국가는 기술공개를 엄격하게 제한하고 있으며 국내에서는 개념정립 및 기술개발이 미진한 실정이다. 따라서 정지궤도위성을 이용하여 국내에서 목표로 하는 100ns(95%)이내의 시각 정확도와 10^{-11} (7일 이상) 이내의 주파수 정확도를 가지는 시각/주파수 동기 시스템을 개발하기 위해서는 먼저 이들의 정확도를 결정하는 정지궤도위성의 궤도운동에 의한 오차발생 요인과 무선구간에 의한 오차, 그리고 송수신기에 의한 오차 등을 분석하고 또한 요구되는 정확도를 만족할 수 있는 시각/주파수 동기오차 보정 기술의 개발이 요구된다.

II. 위성망을 이용한 시각전송 기술

표준 시각/주파수 전송 기술에는 정지궤도 또는 비정지궤도 위성을 이용하는 방식, 그리고 지상망을 이용하는 방식이 있다. 지상망 시스템중 유선망은 고가의 비용이 분체가 되며, 무선망은 열악한 SNR, 좁은 가용 대역폭, 전파 지연, 그리고 낮은 신뢰성의 문제점이 있다. 위성망을 이용하는 시각 전송 시스템은 높은 고도에 의한 넓은 커버리지, 높은 주파수 사용에 의한 좋은 SNR, 넓은 가용 대역폭, 높은 정밀도 등의 장점을 가지나 시스템 구현이 비싸다는 문제점이 있다. 인도의 NPL(National Physical Lab.)은 1980년대 말부터 GEO 위성인 INSAT을 이용한 단방향 방식의 STFS 전송 기술 연구를 통해 기술을 확보하고 1990년대 초부터 인도 전역

에 단방향 방식의 시각/주파수 전송 서비스를 제공하고 있다. 이를 통하여 통신망의 기준 클럭 뿐 아니라 각 연구소에 표준 주파수 정보를 제공하며, 인도 전역 전력 시스템의 주파수 동기 및 고장 탐지 등에도 활용하고 있다. 보정 데이터 미사용시에는 $20\mu s$ 이내, 보정 데이터 사용시에는 $1\mu s$ 이내의 오차를 가지는 시각 정보를 얻을 수 있다. 주파수 정확도는 위성 신호에 정확히 동기되어 있는 경우 약 10^{-11} 정도가 된다. 현재 사용중인 FM 방식 대신 DS/SS 방식을 적용하는 등 1us 이내의 시각 정확도를 위한 연구가 진행중이다[1, 2, 3]. 한편, 유럽공동체는 1990년대에 들어와 INTELSAT을 이용한 양방향 방식의 시각/주파수 동기 기술연구를 진행중이며[4], 프랑스는 CNES(우주국)가 TDF2 위성을 이용한 단방향 시각/주파수 전송 실험을 실시하여 현재 시각 정확도는 50ns, 주파수 안정도는 10일 관측시 약 10^{-14} 정도 되는 것으로 보고되고 있다. 신호포맷은 기존의 위성 TV 신호인 D2-MAC을 사용하며, 시각표시(time marker)가 추가되어 있다. TDF2 위성을 이용한 STFS 전송 시스템에서는, 네 개 이상의 보정된 관제국을 사용하여 GEO 위성의 궤도오차가 시각/주파수 정확도에 미치는 영향을 보정하는 연구와 실험이 진행되고 있다[5]. 멕시코와 이집트는 자국이 보유한 정지궤도위성을 이용하는 STFS 시스템 개발에 착수하였다. 일본은 1970년대 초부터 위성망을 이용한 시각/주파수 동기 기술을 연구하고 있으며 관련 분야에서 상당한 기술을 보유하고 있으며 주로 통신위성을 이용한 양방향 방식을 연구하였다[6, 7]. 그러나 GEO 위성을 이용한 단방향 방식의 시각 전송기술에 관한 연구는 아직 보고되지 않고 있다. 한국의 경우, 1986년 표준과학 연구원이 GPS 위성을 이용한 시각/주파수 동기 실험을 수행한 바 있으며[8], 한국통신은 1992년, VSAT 기지국의 양방향 방식을 이용한 주파수 전송 기술 연구를 수행하였고, 1999년 초부터 무궁화 위성을 이용한 단방향 방식의 시각 전송 기술 연구개발

을 시작하여 2001년 상용화를 목표로 진행 중이다.

III. 시각/주파수 동기오차 요인

정밀한 표준 시각 정보의 정확한 송수신은 바로 표준 주파수 정보의 정확한 송수신이 가능함을 의미한다. 높은 정확도의 시각 동기는 표준 주파수를 이용한 주파수 보정에 사용될 수 있기 때문에 시각 동기뿐 아니라 주파수 보정을 통한 높은 정확도의 주파수 동기가 가능하다. 그러나 시각/주파수 동기 성능은 동기 시스템에 적용된 주파수 대역폭, 변조방식, 보정방식 등 여러 가지의 설계 요소에 따라 영향을 받는다. 시각 동기 정확도는 직접적으로 주파수 보정 정확도에 영향을 주기 때문에 시각 동기 오차에 영향을 주는 요소를 모델링하고 오차의 크기를 판단하는 것이 효과적 보정 알고리즘 결정을 위해 필수적이다. 위성을 이용한 STFS 전송은 주기적으로 궤도운동을 하는 위성까지의 전파지연 변화를 효과적으로 보상하는 기술을 요구한다. 경로 지연값의 크기가 일정하다면, 시각 동기를 위한 복잡한 보정 알

고리즘이 불필요하나, 실제로 경로 지연값은 계속적으로 변화한다. 위상잡음 변조로 표현되는 전파지연 변화는 아래 세 가지 요인들 중 하나 또는 하나 이상에 의해 발생된다(9).

- 1) 수신 신호의 열악한 SNR(부가잡음)
- 2) 전송 매체의 특성 변화(온도, 기압 변화 등)
- 3) 송·수신기간 기하학적 거리의 변화

위의 요인들 중 SNR의 열화는 가우시안 위상 잡음으로 나타나게 된다. 이러한 파라미터들이 장기간 drift와 무관하고 충분히 많은 측정값들에 대해 평균을 취한다면, 나머지 두가지 요인들 또한 백색 위상 잡음으로 나타나게 된다. 이때 일별, 계절별, 그리고 태양의 흑점 주기 변화들은 주기적이므로 랜덤 잡음과는 분리하여 고려하여야 한다. 그림 1은 위성망 신호지연의 요소별 크기와 변화 정도를 보여주며, 식 (1)과 같이 송신 및 수신 시각간의 시간차이를 요소별로 구분하여 표현할 수 있다(10).

$$\text{송신 시각} = \text{수신 시각} - \rho/c - \Delta T_{\text{ION}} - \Delta T_{\text{TROP}} - \Delta T_{\text{EQ}} \quad (1)$$

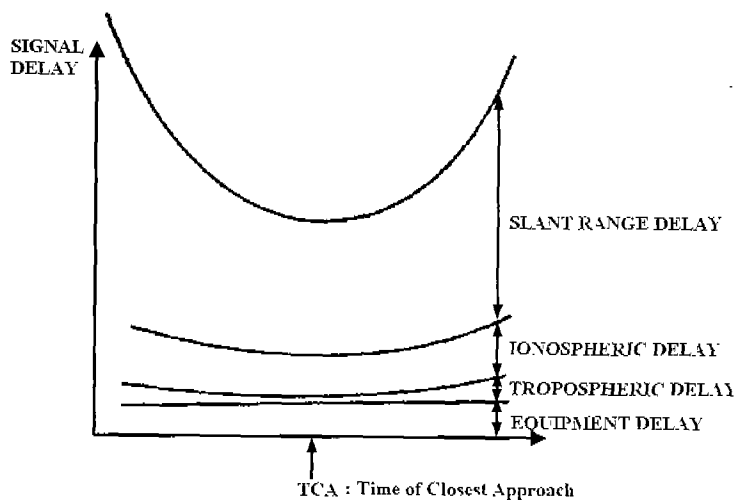


그림 1. 위성망 신호지연의 요소별 크기

- ρ : 위성궤도와 수신기 좌표간의 Slant Range
- c : 전파(빛)의 속도
- ΔT_{ION} : 이온층에 의한 지연변화
- ΔT_{TROP} : 온도, 압력, 습도를 고려한 대류권 모델에 의한 지연변화
- ΔT_{EQ} : 장비에 의한 지연변화

본 연구에서는 정지궤도위성을 이용한 시각 주파수 동기 시스템의 동기 오차를 발생시키는 여러 가지 요인들을 위의 세가지 요인들로 분류하여 고려하였다.

1. 수신 신호의 SNR 열화

가. C/No 감소에 따른 오차

시각 코드 포맷으로 시각정보를 전송하는 방식에서는 subframe을 구성하는 bit열중 하나의 bit가 1pps(pulse per second) 정보를 갖게 되므로 비교적 대역폭 대 전송률이 낮아 BER 성능은 우수하

지만 CNR의 열화로 인해 시각 오차가 증가함이 실험을 통해 입증되었다. 일본의 RRL(Radio Research Lab.)은 통신위성을 이용한 시각비교 실험에서 Main station과의 실험을 위해 설정된 CNR보다 4~6 dB 가량 낮은 CNR을 적용하였을 때, SSRA(Spread Spectrum Random Access)에서 위상고정 상태의 안정성이 떨어짐으로 인해 장기간 및 단기간 영역 모두에서 시각동기 오차가 증가함을 확인하였다[7]. 그림 2는 SS 모델의 C/No 값 변화에 따른 백색 위상 잡음 변화를 보여준다[17].

2. 송신기와 수신기간의 기하학적 거리 변화

가. 위성궤도 운동에 의한 doppler shift

위성궤도 운동에 의해 나타나는 doppler 효과는 사실상 송신국~위성~수신국에 이르는 전파경로의 거리 변화에 의한 1pps 신호의 전파지연시간의 변화로 정의할 수 있다. 전파경로 상에 대류권과 이온층이 존재하나 이들의 변화에 의한 영향은 위성궤도

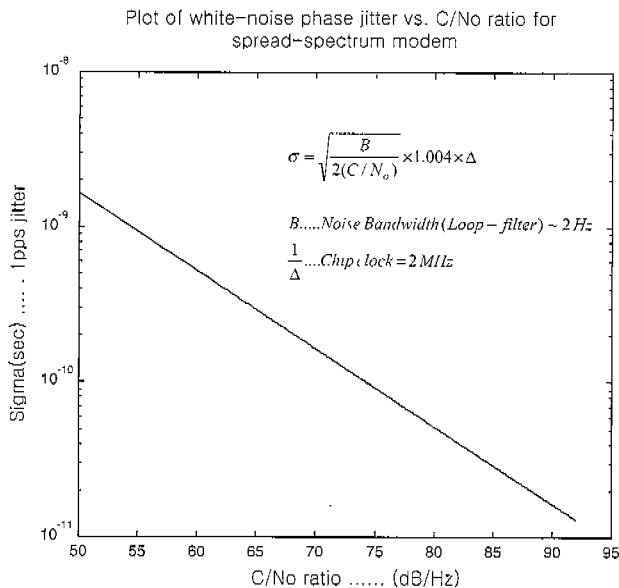


그림 2. 주파수 확산(SS) 모델의 C/No 값 변화에 따른 백색 위상 잡음 변화

운동에 의한 영향에 비해 상대적으로 매우 작다. ITU-R은 36,000Km 고도 이상에 위치한 정지궤도 위성에 의한 doppler shift를 0Hz로 명시하고 있다. 실제 관측 데이터를 이용한 doppler shift를 시뮬레이션을 통해 얻은 결과 궤도 정보의 갱신일에서 멀어질수록 그 값이 증가하는데 궤도 정보 갱신 주기가 14일인 경우 제 14일에 관측된 doppler shift는 최고 15Hz에 불과하다. 정지궤도위성과 달리 GPS 저궤도 위성의 경우는 그 영향이 급격히 증가하게 된다.

나. 위성궤도 예측 데이터(Ephemeris data)의 부정확성

대부분의 시각동기 오차는 GEO 위성의 궤도 오차에 기인하고 있다[1, 3, 15]. 무궁화 위성 시스템이 사용하는 MAS(Mission Analysis Software)는 약 200~300 미터의 초기 궤도 오차를 가지며 이를 초과하는 초기 오차가 시각/주파수 동기에 미치는 영향은 절대적이다. INSAT의 경우 24일 주기로 궤도 정보를 갱신하고 있는데 제 24일의 최대 궤도 오차 범위는 각 축 방향으로 5Km이다[3]. INSAT은 관측국으로부터 관측된 실제 궤도정보를 자체 궤도 예측 프로그램을 통해 시간별로 생성하고 생성된 시간별 궤도 정보를 분 간격으로 보관하여 갱신하고 있다. 그러나 정상적인 GEO 위성의 궤도운동과는 달리, 약 4시간이 소요되는 station-keeping 동안에는 실제 궤도 정보는 예측된 궤도 정보와의 차이가 상당히 커서 보정이 불가능하다(동서 : 80Km/4Hours, 남북 : 150Km/4Hours). 또한 궤도 정보가 오래된 것일수록 위성 위치의 바이어스 오차로 인해 정확도가 떨어지게 되는데, 무궁화 위성은 궤도 정보 갱신 주기가 10~14일이고, INSAT은 24일, GPS의 경우 수 분 ~ 수십 분인 것을 고려할 때 갱신 주기가 빠를수록 높은 정확도에 근접함을 알 수 있다.

3. 대기 영향의 특성 변화

가. 대류권(Tropospheric layer) 지연변화에 의한 오차

대류권에 의한 지연은 주로 지구곡과 위성이 이루는 각도에 따라 결정된다. 10° 이하의 낮은 각도에서 대기 영향에 의해 발생하는 전파 속도 변화는 10ns이다. 이 지연에 영향을 미치는 다른 요소들은 지역적인 대기 조건들로서 이들의 영향은 약한 편이다. 지연의 건조소(dry component)는 온도에 대해서 비교적 일정하며, 대기 압력에 대해서는 영향을 덜 받는데, 극점에서는 7ns이다. 지연의 습요소(wet component)는 극점에서 습도와 온도에 따라 0~2ns 사이에서 변화한다. 극단의 조건 하에서, 대류권 지연은 14~20ns 정도이며, 최고 6ns의 differential effect를 유발한다.

나. 전리층(Ionospheric layer) 지연변화에 의한 오차

12/14 GHz 주파수 대역에서, 위성에서 적도상에 있는 지구곡까지와 위성에서 극지에 있는 지구곡까지의 차동 경로상에서 전리층에 의해 야기되는 차동 지연은, 전자적 농도가 가장 높은 때(정오) 계산된 값으로서, 2ns 이하이다. 전리층 통과에 따른 시간 지연 τ_{ion} 은 반송 주파수 제곱의 역에 비례하며, 자유 공간에서 1차 전리층 시간지연과의 관계는 식 (2)와 같이 주어진다[6, 16].

$$\tau_{ion} = 40.3 \cdot TEC / (c \cdot f^2) \quad (2)$$

여기서,

TEC : 전체 전자 함유량 (electrons/m²)

c : 빛의 속도(3×10^8 m/s)

f : 반송 주파수(Hz)

주파수가 높아짐에 따라 시간지연 값은 작아지며, 위성에서 지구곡까지의 전체 전자 함유량(TEC)은

전리층에 포함된 TEC 보다 상당히 많기 때문에 전체 신호 전송경로상의 시간지연 변화에는 큰 영향을 미치지 않게 된다. 수신지구국 위치에 따른 시간지연 값의 차이는 우리나라와 같이 작은 영토의 경우 고려가 불필요하다[8].

4. 기타 영향

그외 동기오차 발생 요인들로는 상/하향 변환 지연, 송수신 시스템이 갖는 오차, 시간간격 계수기(TIC : Time Interval Counter)의 분해능 한계, 차동 보정(differential correction)의 분해능 한계, 위성 station-keeping에 의한 오차, 그리고 지구 자전운동에 의해 발생하는 Sagnac 영향 등이 있다.

IV. 동기오차 보정

주파수는 시간 간격에 반비례하며 주파수 전송을

통해 시각동기가 가능하고 주파수 정보도 시각 방송으로부터 얻어질 수 있으며 또한 어떠한 시각 전송 서비스도 주파수원으로 사용될 수 있다.

1. 차동 보정(differential correction)과 시각동기오차 보정

보정신호의 획득을 위하여 특정 지구국과 송신 기준국에서 STFS 시각을 동시에 전송하며, 위성의 예측된 궤도 데이터와 실제 위성 위치간의 차이에 의해 발생하는 오차가 기록된다. 시각 전송에서 부정확성의 주요인은 수신신호의 랜덤한 지터가 아니라 느린 주행 형태의 구조적 오차이다. 이 주행 변동은 주로 부정확한 위성궤도 모델링을 기초하여 계산된 전파 지연 값에 의해 발생하는 오차이다. 한국의 경우 송신기준국에서 지구국까지의 최대거리가 500 Km인 것에 비해 지구국에서 위성까지의 거리는 약 40,000 km에 달한다. 임의의 두 지구국과 위성간을 연결하는 경로는 매우 작은 각을 이루게 되어 대부분의 오차 요인들은 한국 전역에 대해 거의 동일한

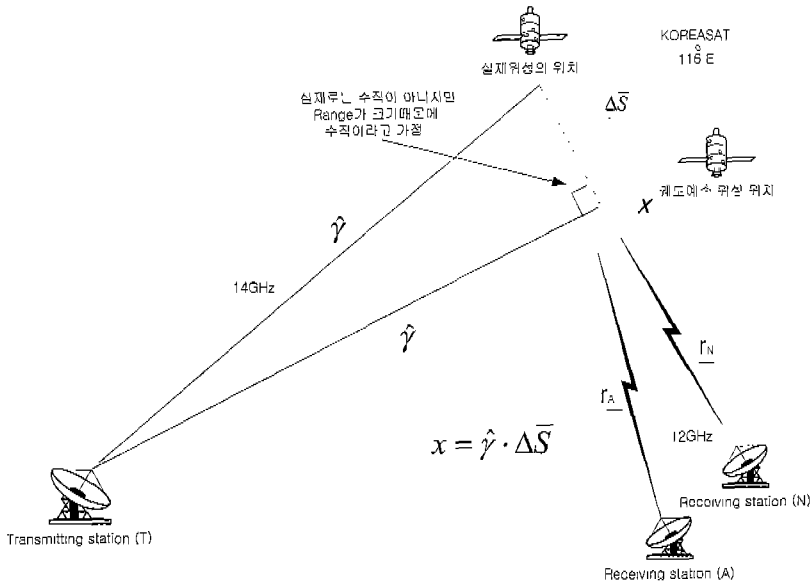


그림 3. 위성위치 예측 값과 실제 값간의 차이에 의한 전파지연 거리

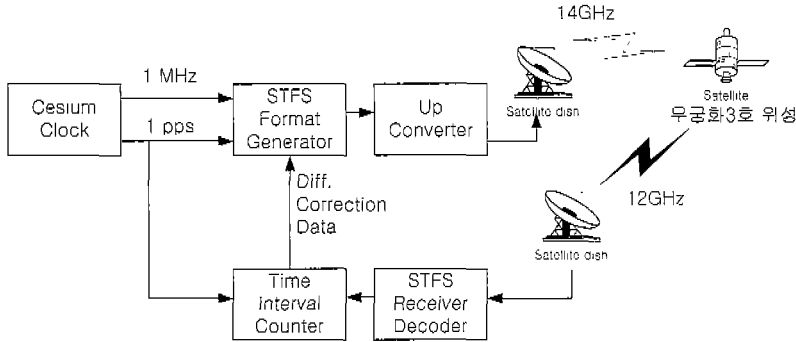


그림 4. 차동보정 방식 적용을 위한 송신기준국의 Setup

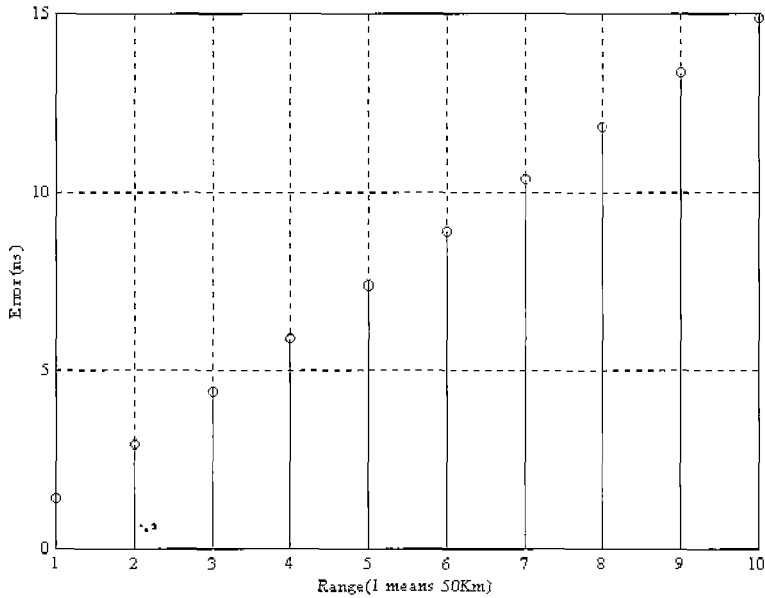


그림 5. 두 지구국간 거리 이격에 따른 차동보정 방식의 error contour

(3축에 대한 위성궤도 예측 오차가 각각 500m인 경우)

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. 송신 기준국과 보정국을 동일한 기지에 뒀으로써 시스템 복잡도를 줄이고 정확도를 향상시킬 수 있다. 이러한 보정 방식을 차동 보정(differential correction)이라고 하며,

시각/주파수 동기오차의 결정적인 요인들인 위성궤도 예측 오차와 대류권, 전리층의 영향을 최소화하는 방법으로서 DGPS(Differential GPS)에도 적용되고 있다. 한국과 같이 송수신국간의 거리가 수백 Km이내인 경우 하나의 보정국을 송신기준국과 동일 기지에 위치시키고, 송신기준국은 획득한 보정 값을 주기적으로 전송한다. 수신국은 보정 데이터를

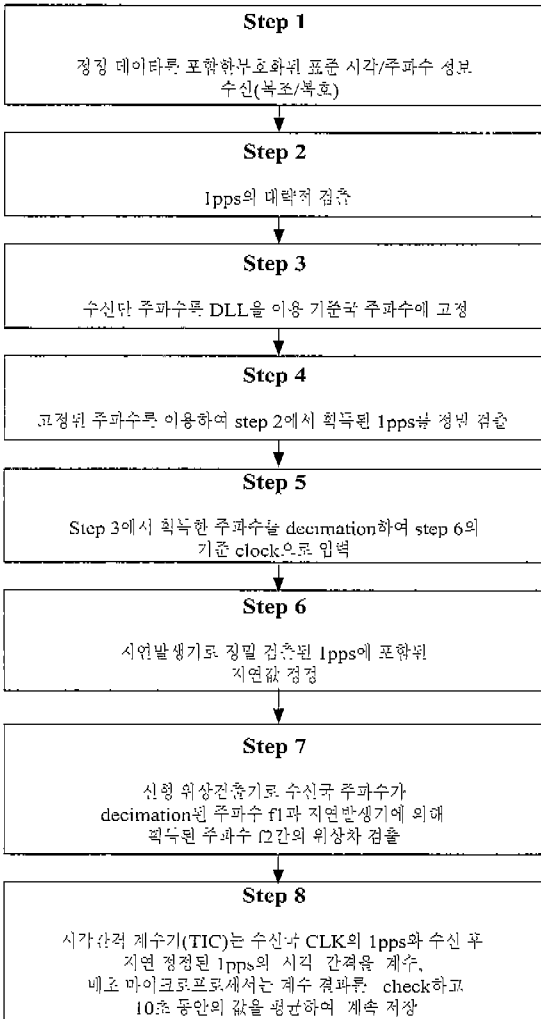


그림 6. 수신국의 동기오차 보정 flow-chart

수신하고, 이를 시각 복호화기에서 한번 지연 정정된 시각정보를 다시 보정하는 과정에 사용한다. 그림 3은 위성위치의 예측값과 실제값 사이의 차이에 의한 전파지연 거리 x 의 발생 과정을 보여준다.

위성위치 오차 $\Delta \bar{S}$ 에 의한 전체 전파 지연 오차 ΔT_{PN} 를 구하기 위하여 송신지구국 T 를 수신지구국 A 와 결합할 경우, ΔT_{PA} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta T_{PA} = \frac{1}{c} [\hat{\gamma}_T \cdot \Delta \bar{S} + \hat{\gamma}_A \cdot \Delta \bar{S}] \quad (3)$$

여기서 $\hat{\gamma}_T$ 와 $\hat{\gamma}_A$ 는 각각 송신지구국(T)~위성, 위성~수신지구국(A)까지의 단위 벡터이다.

송신지구국 T 를 수신 지구국 N 과 결합할 경우, 위성위치 오차 $\Delta \bar{S}$ 에 의한 전체 전파 지연 오차 ΔT_{PN} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta T_{PN} = \frac{1}{c} [\hat{\gamma}_T \cdot \Delta \bar{S} + \hat{\gamma}_N \cdot \Delta \bar{S}] \quad (4)$$

식(3)과 식(4)의 차, 즉 두 경로 송신지구국~위성~수신지구국 A 와 송신지구국~위성~수신지구국 N 사이의 전파 지연차를 구하면 다음 식과 같다.

$$\Delta T_A = \Delta T_{PA} - \Delta T_{PN} = \frac{1}{c} (\hat{\gamma}_A - \hat{\gamma}_N) \cdot \Delta \bar{S} \quad (5)$$

여기서 A 와 N 수신지구국간의 단위벡터 차는 지상측지를 통해 정밀하게 구할 수 있다. 결국 차동 STFS(DSTFS) 오차 ΔT_A 는 송신국과 수신국간의 거리 벡터(range vector)와 위성 궤도 오차 $\Delta \bar{S}$ 에 따라 결정된다. 즉, 송수신국간의 거리가 가까울수록 그리고 보다 정확한 위성궤도 예측 프로그램을 통해 위성궤도 예측 오차 $\Delta \bar{S}$ 를 최소화할수록 ΔT_A 는 작아진다. 그림 4는 차동보정 방식을 위한 송신기준국의 구성을 보여주고 있으며, 그림 5는 3축에 대한 위성궤도 예측 오차가 각각 500m인 경우 두 송신지구국과 수신국간 거리 이격에 따른 차동보정 방식의 error contour를 보이며 약 13ns까지의 지연 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 송신기준국은 먼저 부호화된 표준 시각/주파수 정보를 위성으로 상향링크 전송한 후, 다시 하향 링크된 부호화된 표준 시각/주파수 수신 및 차분보정 데이터를 생성한다. 수신국의 동기오차 보정 알고리즘은 그림 6에 flow-chart로 보였다.

2. 주파수 율셋 보정

시각 디코더의 선형 위상 검출기는 수신국의

clock과 STFS에 의해 수신된 clock과의 위상 차이를 검출한다. 일정 시간 동안의 위성검출기 결과가 보여주는 기울기 값은 기준국에 대한 수신국의 주파수 윽셋 정도를 나타내며, 시각/주파수 동기 시스템에서의 주파수 정확도는 주파수 윽셋 측정 정확도와 측정에 따른 clock 조정 정확도를 뜻한다. 높은 안정도의 발진기는 식 (6)과 같이 표현되는 상대적 주파수 윽셋(또는 오차) F 로 정의된다.

$$F = \frac{(f - f_0)}{f_0} = \frac{\Delta f}{f} \quad (6)$$

이 때, f 는 발진기의 주파수이고, f_0 는 발진기의 고유 주파수이다. STFS와 같은 시각전송 기술을 이용하여, T 시간 동안의 clock의 drift Δt 를 관측하면, 발진기의 평균 주파수 윽셋을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left| \frac{\Delta f}{f} \right| = \left| \frac{\Delta t}{T} \right| \quad (7)$$

주파수 윽셋의 부호는 clock의 drift 방향에 따라 결정된다. 즉, 양의 지연을 갖는 clock은 양의 F 를 가지며, 음의 지연을 갖는 clock은 음의 F 를 갖는다. 시간 T_1 에서 clock C 와 서울송신국의 reference clock간의 차이는 다음과 같이 정의한다.

$$t_1 = C(T_1) - \text{서울송신국}(T_1) \quad (8)$$

이것은 시간간격 계수기가 clock C 의 1pps로 시작되고, 서울송신국의 1pps에 의해 정지될 때, 측정된 시간 간격이 t_1 이라는 것을 의미한다. 다시 말해 시간 T_1 과 T_2 ($T_2 > T_1$) 사이에서 clock C 의 drift는 $\Delta t = (t_1 - t_2)$ 가 된다. Drift Δt 의 부호(클럭 C 가 양(+))의 지연을 갖는지 음의 지연을 갖는지에 따라, 각각의 주파수 윽셋 부호가 결정된다. 주파수 윽셋값은 clock의 drift 기울기이며, $T = T_2 - T_1$ 로 주어질 때 위의 식 (7)과 같이 표현된다.

식 (7)로 표현된 주파수 윽셋을 보상하기 위해서 clock C 의 주파수 윽셋 F 가 "0"에 가까운 음(-)의 기울기를 갖도록 조정한다. 차동 보정은 짧은 기간의 주파수 윽셋 측정을 통해서도 주파수 보정값을 정확히 측정할 수 있으며, INSAT은 주파수 윽셋 측정값에 해당하는 clock 조정을 수동으로 수행하고 있다[11].

V. 시각 안정도와 주파수 안정도의 관계

본 절에서는 시각 정확도와 주파수 정확도 관계를 이해하기 위하여, 시각 안정도와 주파수 안정도 관계를 전형적 위상 분산과 dead time이 없는 2-샘플 분산(또는 *Allan variance*)간의 관계를 통해 분석한다. *Allan variance*에 대한 N -point fractional frequency variance의 기대값 비율이 arbitrary law spectrum μ 에 대해 샘플 평균의 수 N , 연속적인 샘플 평균을 위한 반복 시간 T , 그리고 각각의 샘플 평균의 길이 τ 의 함수로서 유도된다[12, 13, 14]. $T = \tau$ 일 때의 샘플 fractional frequency variance의 기대값을 다음과 같이 표현한다.

$$\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \rangle \quad (9)$$

여기서 $\sigma_y^2(N, T, \tau)$ 는 주파수 안정에 대한 시간영역 측정의 일반적인 표현이며, $N=2$ 이고 $T = \tau$ 인 경우 $\sigma_y^2(\tau)$ 가 되며, 일반적으로 시스템의 잡음 대역폭에 따라 값이 결정된다. 식 (10)으로 표현되는 $B_1(N, \mu)$ 를 정의하면, [12, 13]의 결과들로부터 다시 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$B_1(N, \mu) = \frac{\langle \sigma_y^2(N, \tau) \rangle}{\sigma_y^2(\tau)} \quad (10)$$

$$B_1(N, \mu) = \frac{N(N^\mu - 1)}{2(N-1)(2^\mu - 1)} \quad (11)$$

백색 위상잡음에 대해 $\mu = -2$ 이며, N 이 무한대로 커질 경우 $B_1(N, \mu)$ 은 $2/3$ 로 수렴된다. 또한 위상 변화는 시간 변화($x = \varphi/2\pi \nu_0$)에 비례하므로, fractional frequency y 와 시각 x 의 관계는 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) = \frac{x(t+\tau) - x(t)}{\tau} \quad (12)$$

여기에서 $x(t)$ 는 clock과 발진기들에 대한 구조적 모델로서 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{1}{2} \cdot D t^2 + \varepsilon(t) \quad (13)$$

여기서 주파수 drift D , 주파수 오프셋 $y_0 = \Delta f/f$ (Δf : 주파수 변화량, f : 기준주파수)와 시각 오프셋 x_0 는 시스템에 따라 결정되며, $\varepsilon(t)$ 는 랜덤한 편차 값이다. Cesium beam clock이나 발진기들에 대해서는 $D=0$ 의 설정이 적절하다. 그림 7은 식 (12)의 결과를 얻는 측정과정을 보여주며 τ 를 T 보다 짧게 설정함으로써 dead time ($T - \tau$)가 발생함을 확인할 수 있다. 그림 7에서 두 발진기간의 위상 차이가 y 축상에 plot되어 있다. 측정결과는 dead time ($T - \tau$)에 의해 분리된 동일 간격에 대해 평균된 주파수 set을 보여준다[12].

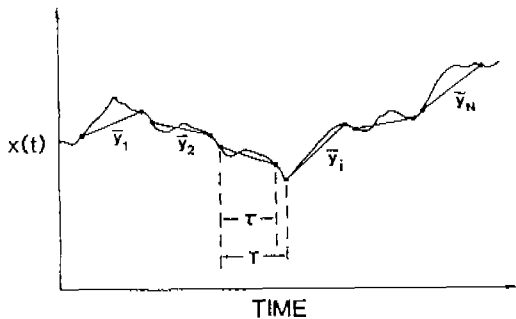


그림 7. 샘플 분산의 계산을 위한 측정 과정

T 가 τ 보다 크면, 각각의 주파수 측정 사이에는 어떤 유용한 정보도 제공되지 않는 $T - \tau$ 만큼의 dead time이 발생한다. 이러한 데이터를 표현하는 방법 중 가장 일반적인 접근은 다음의 관계식으로 표현되는 N -샘플 분산이다. 여기서 $\langle \rangle$ 는 무한시간 평균을 의미하며 N 은 샘플 수이다.

$$\left\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \right\rangle = \left\langle \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left(y_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k \right)^2 \right\rangle \quad (14)$$

발진기의 잡음 프로세스는 낮은 Fourier 주파수에서 급격하게 발산하기 때문에 위 표현식의 결과는 $N \rightarrow \infty$ 일 때 수렴되지 않는다. 이는 분산 예측 정밀도가 단순히 샘플 수 증가에 의해서만 개선되지 않음을 의미한다. 따라서, dead-time이 없는(즉, $T - \tau = 0$) 2-샘플 분산이 선호되며 이것은 또한 Allan variance라고도 하는데 정밀 발진기에서 관찰되는 모든 주요 잡음들에 대해서 수렴되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \frac{1}{2} (y_{k+1} - y_k)^2 \right\rangle \quad (15)$$

위 식의 y_k 를 시각 차이 또는 시각 편차 측정값의 향으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \frac{1}{2} \tau^{-2} [x(t+2\tau) - 2x(t+\tau) + x(t)]^2 \right\rangle \quad (16)$$

분산 측정에서 연속 시각 판독(continuous time reading) 대신 N -이산 시각 판독(N -discrete time reading)을 적용할 수 있으며 이는 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_y^2(\tau) \cong \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2 \quad (17)$$

여기서 i 는 N set에서의 측정 수를 나타내며, 측정 시간 간격은 τ 이다. 식 (12) 양변의 전형적 분산은 위상 지점 $x(t)$ 가 백색 위상잡음 모델에 대해 일정하고 $x(t+\tau)$ 와 $x(t)$ 가 비상관적이라면 샘플 수 N 이 무한대로 접근할 때 다음의 결과를 얻는다.

$$\sigma_y^2(N \rightarrow \infty, \tau) = \frac{\sigma_x^2(N \rightarrow \infty, \tau)}{\tau^2} + \frac{\sigma_x^2(N \rightarrow \infty, \tau)}{\tau^2} = \frac{2}{\tau} \sigma_x^2(\tau) \quad (18)$$

이 식을 먼저 얻은 결과 $B_I(N, \mu) = 2/3$ 에 대하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\langle \sigma_y^2(N \rightarrow \infty, \mu) \rangle}{\sigma_y^2(\tau)} = \frac{2}{3} \quad (19)$$

식 (19)를 다시 정리하면,

$$\frac{2\sigma_x^2(\tau)}{\tau^2 \sigma_y^2(\tau)} = \frac{2}{3} \quad (20)$$

결과적으로는 다음의 식을 얻는다.

$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{\sigma_y^2(\tau) \cdot \tau^2}{3} \quad (21)$$

$$\sigma_x(\tau) = \frac{\sigma_y(\tau) \cdot \tau}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

따라서 시각의 표준 편차 $\sigma_x(\tau)$ 의 관계식으로 표현한 이상의 결과를 통해서 주파수 안정도와 시각 안정도의 관계가 비례함을 알 수 있다. $\sigma_x^2(\tau)$ 는 식 (21)에 의해 정의되는 시각 안정도의 척도이다.

VI. 무궁화 위성용 STFS 전송 시스템의 성능개선 방안

차동보정 방식을 적용하고, 서울 송신기준국과 수

신국(사용자)의 거리 이격에 따른 동기오차의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한 결과, 위성의 궤도오차가 3축 방향으로 각각 2Km이며 최대 서비스 범위가 서울로부터 반경 420Km(서울 ~ 제주도 최남단)일 때, 북도를 포함한 한국 전역의 시각 동기 정확도가 60ns이고 시각 동기 성능에 따른 주파수 안정도는 10^{-12} (7일)을 만족하였다. 주파수 보정 정확도 또한 차동보정 방식 적용을 통해 장기간 측정은 물론 단기간 측정에서 10^{-12} 의 성능을 확보할 수 있었다. 그림 8과 같이 서울 송신기준국을 표준 시각주파수 전송을 위한 기준국으로 설정하는 것보다 대덕이나 금산기지국을 기준국으로 사용하는 것이 수신국까지의 최대 거리를 줄임으로써 한국 전역의 시각 주파수 동기 성능을 더욱 향상시킬 수 있다. 위성궤도가 3축으로 각각 2Km의 오차발생시 금산기지국을 기준국으로 사용하는 경우(전국 수신반경 350Km)와 대덕기지국을 기준국으로 사용하는 경우(전국 수신반경 420Km)에 대한 시각 정확도는 각각 40ns와 50ns 이내로 개선된다. 또한 단일 송신기준국 대신 복수의 송신기준국을 사용하는 방안을 고려할 수 있다. 이 때 하나의 주 송신기준국과 복수의 부 송신기준국들을 설정하고 주 송신기준국과 부 송신기준국들간을 실시간 전용 데이터 링크로 연결한다. 이들간의 주기적 보정을 통해 각각의 부 송신기준국들은 시각/주파수 서비스 반경 이내의 수신국들에 더욱 높은 정확도의 서비스를 제공할 수 있다. 위성궤도가 3축으로 각각 2Km의 오차발생시 한국 전역의 시각 정확도는 25ns 이내로 개선된다. 이때 물론 부 송신기준국들은 주 송신기준국의 clock 성능에 가까운 clock을 보유(예: 주송신기준국 - Cesium clock, 부송신기준국 - Rubidium clock)하고 있어야 하며 주기적으로 주 송신기준국과의 비교를 통해 주파수 보정을 실시하여야 한다.

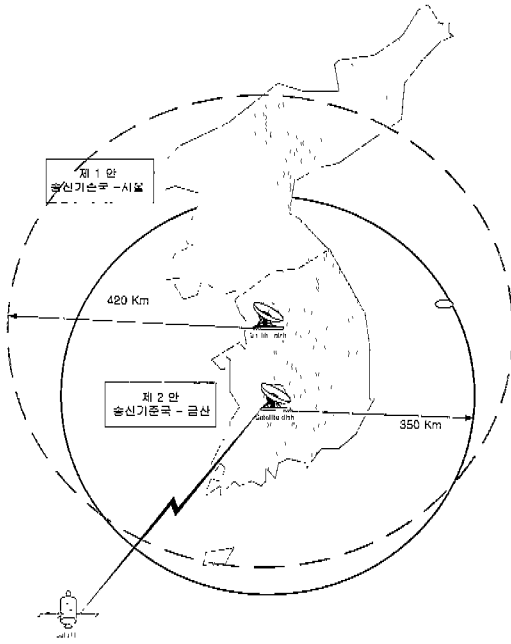


그림 8. 제주도와 울릉도를 고려하는 최적의 송신기준국 위치 설정을 통한 시각동기 정확도 향상 방안

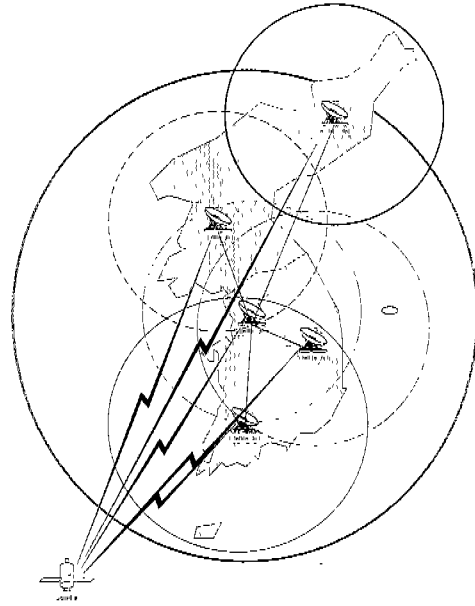


그림 9. 다수의 차동 보정국을 이용한 시각동기 정확도 향상 방안

VII. 결 론

본 논문에서는, 무궁화 위성을 이용한 STFS 전송 시스템 개발을 위해 시각/주파수 동기오차 보정 방식으로 차동보정 방식을 제안하고, 제안된 알고리즘을 적용하여 목표로 하는 시각/주파수 동기의 정확도 획득이 가능함을 확인하였다. 또한 현재 세계적으로 개발 중이거나 서비스 중인 GEO-위성을 이용한 STFS 전송 시스템을 고찰하고, 시각/주파수 동기오차 발생 요인을 분석하였다. 가장 심각한 오차요인인 GEO 위성의 궤도운동 영향과 대기영향의 특성변화 등을 보상하기 위해 차동보정 방식을 제안하고 이의 원리에 대해 고찰하고 이를 적용한 시각동기오차 보정 알고리즘과 주파수 윗셋 보정 알고리즘을 제안하였다. 또한 시각 정확도와 주파수 정확도의 관계를 분석하고 무궁화 위성을 이용한 STFS 전송 시스템의 향후 성능개선 방안을 제시하였다. 향

후 SNR의 열화와 acquisition 성능이 SS 모델을 이용한 STFS 전송 시스템에 미치는 영향 분석, TDF2에 적용된 네 개의 보정된 지구국을 이용한 실시간 위성위치 추적을 통한 보정방식 연구, 그리고 시각간격 계수기(TIC : Time Interval Counter)의 성능 한계 극복 방안 등 GEO-위성을 이용한 STFS 전송 시스템의 성능개선과 DAB 시스템과의 결합을 통한 positioning 등 활용분야에 관한 추가적 연구가 필요하다.

본 연구는 한국통신 연구개발본부 가입자망연구소의 학술용역으로 수행되었음

※ 참고문헌

- [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, April 1997.
- [3] P. Banerjee, Mithlesh Saxena, and B. S. Mathur, "Passive TV Technique for Time Transfer via Indian Satellite INSAT-1B," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-36, No. 2, pp.579-583, June 1987.
- [4] J. A. Davis, P. R. Pearce, D. Kirchner, "European Two-Way Satellite Time transfer Experiments using the INTELSAT (VA-F13) Satellite at 307E," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, No. 2, pp.90-93, April 1995.
- [5] Francois Meyer, "One-Way Time Transfer Using Geostationary Satellite TDF2," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, No. 2, pp.103-106, April 1995.
- [6] Y. Saburi, M. Yamamoto, and K. Harada, "High-Precision Time Comparison via Satellite and Observed Discrepancy of Synchronization," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-25, pp.473-477, 1976.
- [7] Michito Imae, "Time Comparison Experiments with Small K-Band Antenna and SSRA Equipment via a Domestic Geostationary Satellite," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-32, pp.119-203, 1983.
- [8] 한국표준과학연구원, "Differential GPS를 이용한 정밀 시각동기 기술 개발, 연구보고서," 5월 1995.
- [9] 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.
- [10] Roger L. Easton, Laura C. Fisher, ~, "Dissemination of Time and Frequency by Satellite," *Proc. IEEE*, vol 64, pp. 1482-1493, Oct. 1976.
- [11] A. Sen Gupta, S. Das & B. S. Mathur, "Accurate on-line calibration of rubidium standard using INSAT STFS broadcast in differential mode," *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol 26, August 1997, pp.228-236.
- [12] D. W. Allan, "Time and Frequency (Time-Domain) Characteristic, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators," *IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Freq. Control*, vol. UFFC-34, pp. 647-654, No. 6, Nov. 1987.
- [13] James A. Barnes, "Characterization of Frequency Stability," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-20, No. 2, pp.105-120, May 1971.
- [14] Eduard A. Gerber and Arthur Bal-lato, "Precision Frequency Control - Volumn 2 Acoustic Resonators and

- Filters", Academic Press, Inc., 1985.
- [15] J. L. Jespersen, B. E. Blair and L.E. Gatterer, "Characterization and concepts of Time-Frequency Dissemination." *Proc. IEEE*, vol 60, pp. 502-521, May 1972.
- [16] Chang Bok Lee, Dong Doo Lee, Nak Sam Chung, "Development of a GPS Codeless Receiver for Ionosphere Calibration and Time Transfer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 42, No. 2, pp.494-497, June 1993.
- [17] P. Hartl *et al.*, "High accuracy global time transfer via geosynchronous telecommunications satellites with MITREX," *Z. Flugwiss., Weltraumforschung*, vol. 7, no. 5, pp. 335-342, 1983.



이 기 훈

1987년 3월 공군사관학교 항공공학과(공학사)
 1996년 8월 미국 데이톤 대학교 전기공학과(공학석사)
 1999년 3월~현재 연세대학교 전기컴퓨터 공학과 박사과정

1987년 3월 ~ 현재 공군 정보통신 장교
 관심 분야 : 위성통신시스템, 시각/주파수 동기 기술



최진욱

1999년 3월 연세대학교 전파공학과(공학사)
1999년 3월~현재 연세대학교 전기컴퓨터공학과 석사
과정
관심 분야 : OFDM 전송 방식, 디지털 통신 시스템, 무
선 LAN(WLAN)



김진대

1983년 2월 서울대학교 요업공학과(공학사)
1985년 2월 KAIST 재료공학과(석사)
1995년 11월 영국 옥스퍼드 대학교 재료공학과(공학
박사)
1985년 3월~1991년 9월 한국통신 품질보증단 전임
연구원
1996년 9월~1997년 3월 한국통신 무선통신연구소
선임연구원
1997년 4월~현재 한국통신 무선통신연구소 실장
2000년 3월~현재 IMT-2000 사업본부 사업개발팀
부장
관심 분야 : 주파수 이용기술, 위성통신, 전자현미경



서종수

1976년 2월 연세대학교 전자공학과(공학사)
1983년 12월 Univ. of Ottawa, Canada, 전기공학
피(공학석사)
1988년 6월 Univ of Ottawa, Canada, 전기공학과
(공학박사)
1975년 4월~1981년 12월 LG정밀 중앙연구소
1982년 1월~1987년 7월 Univ. of Ottawa, 디지털
통신 연구실
1987년 7월~1989년 12월 IDC, Canada
1990년 1월~1992년 3월 삼성 종합기술원 정보시스
템 연구소
1992년 4월~1995년 2월 CAL, Canada
1995년 3월~현재 연세대학교 공과대학 기계·전자
공학부, 교수
관심 분야 : 디지털 위성통신, 디지털 방송시스템, 디지
털 전송방식