

# GPS를 이용한 주파수 안정도 측정 (Frequency Stability Measurement Using GPS)

전동석\* 임병원\*\* 박찬범\*\*\*  
(D. S. Jun, B. W. Lim, C. B. Park)

발진기의 특정시간 동안의 주파수 안정도 측정을 위하여 시간영역에서의 측정방법인 알랜분산(Allan Variance)을 응용하였으며, 기준 주파수는 GPS 위성으로부터 세계시를 수신하여 이용하였다. 또한 측정시스템의 자동제어 및 측정 데이터의 처리를 위한 S/W를 개발하여 GPS를 이용한 주파수 안정도 측정시스템을 개발하였다.

## I. 서 론

과학기술의 발전에 따라 교환기술을 비롯한 이동통신, 위성통신기술 등의 전자통신 분야를 비롯한 광범위한 분야에서 정밀 발진기(oscillator)를 이용한 안정된 주파수 사용이 크게 증가하게 되었다. 따라서 이를 위한 정밀 발진기의 개발은 물론, 정확한 성능을 유지하기 위한 상위 표준과의 수시 비교를 통하여 정확도(accuracy)를 소급하는 교정검사(calibration)의 필요성도 강조되고 있다.

시간·주파수 분야의 교정검사 과정에서 주파

수 안정도(frequency stability) 측정은 매우 중요한 요소인데, 주파수 안정도의 측정이란 발진기가 단위시간 동안에 얼마만큼 안정된 주파수 값을 나타내는가의 정도를 측정하는 것이다. 이것의 측정방법은 상호 보완적으로 사용되고 있는데, 본 고에서는 실험장비의 구성상 비교적 간단한 시간 영역에서의 측정방법을 사용하였다.

또한 주파수 안정도 측정을 위하여는 상위의 발진기를 필요로 하는데, 이 기준이 되는 발진기(주로 세슘, 루비듐 등의 원자시계)는 직접 보유하거나 외부의 주파수 표준을 수신하여 사용하는 바, 본고에서는 기존의 지상파를 이용함으로써 복잡한 전파경로에 의한 주파수 비교에 오차가 크고 전달정보의 양이 제한되었던 VLF(Very Low Frequency) 수신방식을 개선하여 위성을 이

\* 장비기술개발실 기술원

\*\* 장비기술개발실 선임기술원

\*\*\* 장비기술개발실 실장

용한 GPS(Global Positioning System) 수신방식을 택하였다. 이 방법은 세계시에 동기되어 있는 GPS 위성으로부터 지상의 GPS 수신기로 주파수 표준을 소급받아, 전자계수기의 기준 주파수(reference frequency)로 사용하여 피교정체 발진기의 주파수 안정도를 직접 측정하게 되어 있다. 이때 데이터 측정오차의 최소화 및 측정장비의 자동제어를 위하여 측정 자동화 S/W가 필수적인 바, 측정장비와 PC를 GPIB로 연결하여 별도로 개발된 S/W(C-Language 구성)를 이용하여 주파수 안정도 측정을 제어하도록 개발하였다.

본문의 구성은 우선 주파수 안정도의 정의를 수식으로 나타내었고, 구현된 측정 시스템의 구성과 측정 S/W 흐름 및 데이터 처리방법에 대하여 기술하고 있다.

## II. 주파수 안정도의 정의

일반적으로 순간주파수는 다음 식과 같이 표현된다.

$$2\pi\nu(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \dot{\Phi}(t) \dots\dots\dots (1)$$

$\nu(t)$  = 발진기의 시간에 대한 순간주파수

$\Phi(t)$  = 발진기의 순간 위상

따라서 일반적으로 발진기의 잡음성분을 조사하기 위해서 출력전압을 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = V_p \sin 2\pi ft$$

$$V(t) = [V_0 + \epsilon(t)] \sin[2\pi\nu_0 t + \phi(t)] \dots\dots\dots (2)$$

$V_p$  : 최대전압

$V_0$  : 명목 최대 진폭전압

$\epsilon(t)$  : 명목으로부터 진폭변동

$\nu_0$  : 명목 주파수

$\phi(t)$  : 명목으로부터 위상변동

일반적으로 정밀 발진기는  $|\frac{\epsilon(t)}{V_0}| \ll 1$  이므로 진폭변동은 무시되며, 위상변동  $\phi(t)$ 의 특성이 곧 발진기의 특성이 된다. 식(1), (2)로부터

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0 t + \phi(t)$$

이며, 이것을 t에 대해 미분하면

$$\dot{\Phi}(t) = 2\pi\nu_0 + \dot{\phi}(t) = 2\pi\nu(t) \dots\dots\dots (3)$$

임의 시간 t에서 주파수  $\nu(t)$ 를 갖는 발진기의 명목 주파수로부터의 이탈정도인 상대주파수 변동(relative frequency fluctuation)  $y(t)$ 는

$$y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0}$$

에서 식(3)를 이용하면

$$y(t) = \frac{\dot{\phi}(t)}{2\pi\nu_0} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $y(t)$ 는 무차원의 양이며 이것을 이용하여 발진기의 t시간 동안의 변동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \int_0^t y(t) dt \dots\dots\dots (5)$$

한편, 주파수 측정시 어느 한 순간의 주파수를 측정한다는 것은 불가능하므로, Sample Time( $\tau$ )은 상대주파수 변동을 나타낼 때 중요한 요소로 사용된다. 따라서 어떤 시간 t에서  $t+\tau$ 까지의 평균 상대주파수 변동(Average Relative Frequency Fluctuation)인  $\bar{y}(t,\tau)$ 는 다음과 같다.

$$\bar{y}(t,\tau) = \frac{x(t+\tau) - x(t)}{\tau} \dots\dots\dots (6)$$

또한 식(4)를 이용하면  $\bar{y}_k$ 는 다음과 같다.

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt = \frac{\phi(t_k+\tau) - \phi(t_k)}{2\pi\nu_0\tau} \dots\dots\dots (7)$$

$$t_{k+1} = t_k + T (k=0,1,2,\dots)$$

$\tau$  : 측정시간

$T$  : 측정시간  $\tau$ 에 대한 측정주기

알렌(Allan)은 식(7)에서 시간영역에서의 주파수 안정도 측정을 위하여 분산값(Allan Variance)을 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \rangle \equiv \left\langle \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{y}_k)^2 \right\rangle \dots (8)$$

$N$  : 데이터의 개수

$T$  : 데이터의 측정 주기

$\langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \rangle$  :  $\sigma_y^2(N, T, \tau)$  무한시간 평균

그런데 일반적으로 발전기에서는  $N = \infty$ 가 된다고 해서 식(8)이 의미있는 극한값으로 수렴한다고 보기 어려우며, 또한 무한한  $N$ 을 실제로 측정하기도 불가능하므로, 국제전기전자기술협회의 주파수 안정도 분과위원회(IEEE Subcommittee on Frequency Stability)에서는  $N=2$ ,  $T=\tau$ (측정값 사이에 Gate를 닫고 다시 열 때 측정할 수 없는 불감시간(dead time)이 없는 경우)일 때의 아래와 같은 알렌분산( $\sigma_y^2(\tau)$ )의 제곱근을 시간 영역에서의 주파수 안정도로 정의하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_y^2(\tau) &\equiv \langle \sigma_y^2(N=2, T=\tau, \tau) \rangle = \left\langle \frac{(y_{k+1} - y_k)^2}{2} \right\rangle \\ &\simeq \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (y_{k+1} - y_k)^2 \end{aligned}$$

따라서  $\sigma_y(\tau)$ 는

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (y_{k+1} - y_k)^2}$$

단,  $M$ 은 측정된  $y_k$  개수임.

### III. 측정시스템 구성

주파수 안정도 측정시 일반적으로 원자시계(세

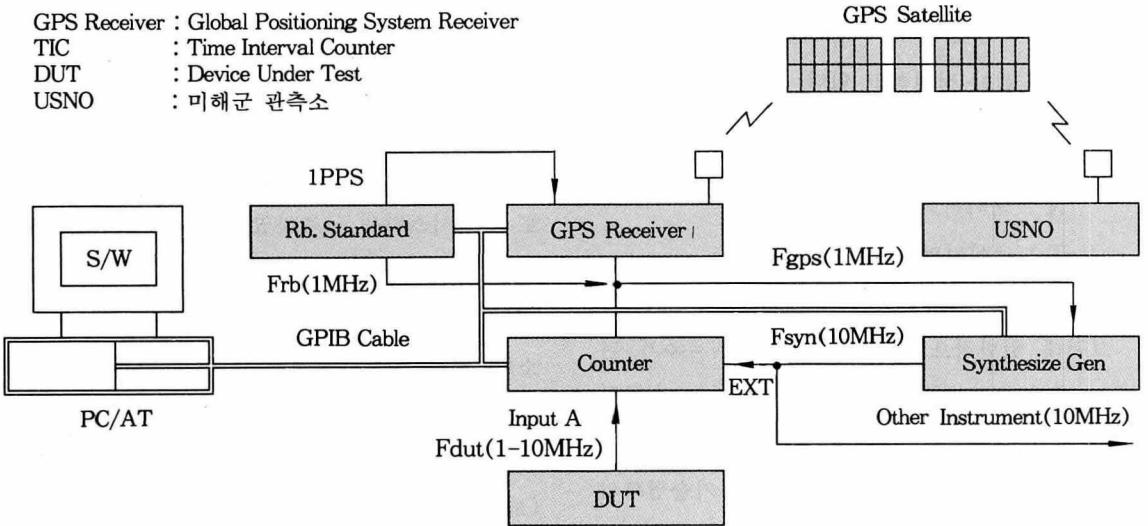
슘, 루비듐)를 직접 이용하거나, 표준단파, 표준장파, LORAN-C 신호, TV 신호 등의 원자시계로부터 신호를 수신하여 사용하고 있지만, 최근에는 방송위성(BS), 기상위성(GMS), GPS 위성등의 위성중계국을 통하여 수신된 표준 주파수를 이용하여 주파수 안정도를 측정하는 방법이 연구되고 있다.

본 고에서도 GPS 위성을 이용한 주파수 안정도 측정시스템을 구축하였는 바, 구성방법은 (그림 1)과 같이, 미해군 관측소(USNO)의 모시계로 GPS 위성에 탑재된 원자시계(세슘, 루비듐, 수소)를 1pps 동기시켜, GPS 위성의 원자시계는 항상 일정한 시각을 유지하면서 지상으로 일정한 시각정보를 송신한다. 수신국에서는 수신 안테나(보통 무방향성)를 가진 GPS 수신기를 통하여 이를 수신한 후, 적정 과정을 통하여 피측정체 발전기의 주파수 안정도 측정 및 교정에 사용하게 된다. 이때 보조장치는 루비듐 원자시계, 주파수 합성기, 시간·주파수 계수기, GPIB 카드 그리고 각 장비를 제어하는 PC로 구성된다. 수행과정은 GPS 수신기를 통하여 세계시를 소급받은 GPS 위성의 원자시계로부터 고정도의 표준시각을 수신하며, 수신된 표준시각은 수신과정에서 있을 수 있는 수신장애시(위성의 자세, 전리층 상태등)를 대비하기 위하여 한국표준과학연구원(KRISS)등의 국내 표준시각에서 소급받은 원자시계(루비듐)와 1pps로 동기시켜 유지한다. GPS 수신기로 수신된 표준시각은  $10^{-10} \sim 10^{-12}$ 의 정확도인 1MHz의 주파수(Fgps)를 주파수 합성기의 EXT 단자로 연결하고, 주파수 합성기는 Fgps를 10배로 한 Fref(10MHz)를 생성하여 각 피측정체의 기준 주파수로 사용하였다. 주파수 합성기로

부터 EXT 단자를 통하여 Fref를 받은 시간·주파수 계수기는 피측정체 주파수(Fdut)를 A단에 연결하고, 주파수 모드에서 Fdut의 값을 얻어

서 GPIB(IEEE488)를 통하여 PC에 연결하여, GPIB로 연결된 계수기의 데이터를 수집한 것을 계산하도록 프로그램하였다.

GPS Receiver : Global Positioning System Receiver  
 TIC : Time Interval Counter  
 DUT : Device Under Test  
 USNO : 미해군 관측소



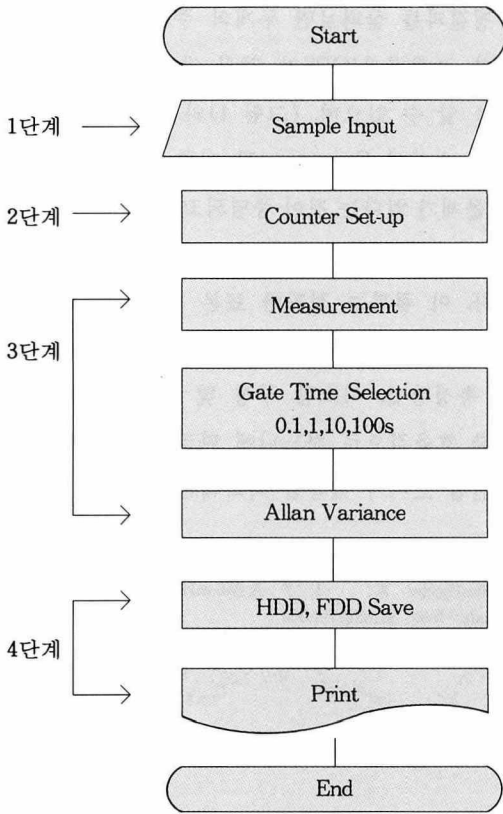
(그림 1) 시스템 구성도

#### IV. S/W 흐름 및 데이터 처리

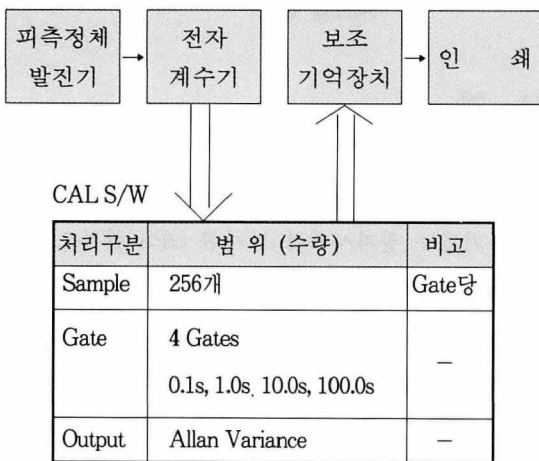
주파수 안정도 측정을 위한 시스템을 자동 제어하고 측정데이터를 처리하는 S/W는 (그림 2)와 같이 4단계로 나뉘어진다. 첫번째 단계는 주파수 안정도를 측정하고자 하는 표본수를 입력하는 단계이다. 본 시스템에서는 측정 표본수는 임의의 산정이 가능하지만, 앞서서도 언급이 되었듯이 다량이라고 반드시 의미있다고 볼 수 없고, 또한 실제로 무한히 많은 표본을 측정할 수 없기 때문에 이미 통계학적으로 발표되어 국내 표준과 학연구원 등에서 사용하고 있는 통계적 신뢰도가 약 ±7%인 표본 256개를 적정수로 보고 있다. 두번째 단계는 데이터의 실제 측정을 위한, 전자계수기를 제어하는 단계이다. 그 내용은 입력 임

피던스, 외부 기준 주파수 설정, 측정방식, 측정데이터 표현 방법을 결정하고 있다. 세번째 단계는 주파수 측정 및 주파수 안정도 데이터를 처리하는 단계이다. 측정은 Gate Time을 0.1 sec, 1sec, 10sec, 100sec로 나누어 측정하였고, 측정된 데이터의 알랜분산, 즉 주파수 안정도를 산출하는 과정이다. 네번째 단계는 데이터 관리 단계로서 측정된 데이터 및 주파수 안정도 값을 외부 기억장치에 저장하고, 프린터로 그 결과를 인쇄하는 단계이다.

S/W내의 데이터 처리과정을 다시 요약하자면, (그림 3)과 같이 피측정체의 발진기(Oscillator)에서 발생하는 주파수를 전자계수기로 각 Gate(0.1s, 1s, 10s, 100s)당 표본수(256개)만큼 측정된 데이터를 얻어서, 이를 교정 S/W를 이용하여 주파수



(그림 2) S/W 흐름



(그림 3) 피측정체 데이터 처리

안정도(알랜분산)를 산출한 다음, 그 결과를 저장하고, 출력하는 것이다.

- Allan Variance 산출

$$Y = \frac{F_c - F_{nc}}{F_{nc}}$$

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (Y_{k+1} - Y_k)^2$$

Y : Relative Frequency

F<sub>nc</sub> : Domino Frequency

F<sub>c</sub> : DUT Osc. Frequency

M : Sample Number

τ : Sample Time

σ<sub>y</sub><sup>2</sup>(τ) : Allan Variance

## V. 결과와 고찰

미해군 관측소의 모시계에 1pps로 동기되는 원자시계를 탑재한 GPS위성으로부터 GPS 수신기를 통하여 표준신호를 수신하여, 지상 수신국(교정실)의 기준 주파수(Fref)로 사용하였고, GPIB를 이용한 전자계수기 제어와 4가지의 Gate Time (0.1s, 1s, 10s, 100s)으로 Gate당 256개의 표본 데이터를 처리하는 측정자동화 S/W를 개발하였다.

〈표 1〉은 수신된 Fsyn를 기준 주파수로 한 Fgps와, Rubidium의 Frb, Quartz의 Fqz의 알랜분산과 상대 주파수를 비교한 실험결과인데, 이 실험결과는 Fgps가 Frb 및 Fqz보다 기준 주파수로 사용하는 것이 우수하게 나타나고 있다.

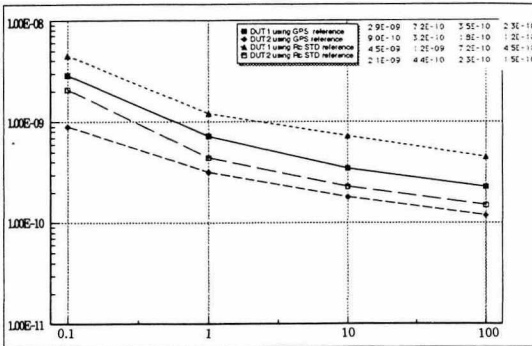
또한 Rubidium 및 Quartz(Low Noise)등의 표준발진기는 고정도의 주파수원(10<sup>-11</sup> 정도)을 얻을 수 있지만, GPS 수신기보다 상대적으로 고가이고 일정한 주기(9개월 혹은 1년)로 상위 표준시

〈표 1〉 GPS, Rubidium, Quartz STD.의 알랜분산과 상대 주파수 비교

STD.		Gate Time	
		0.1s	1s
Fg <sub>ps</sub> (F <sub>syn</sub> )	알랜분산( $\sigma$ )	$6.91 \times 10^{-12}$	$1.61 \times 10^{-12}$
	상대주파수	$1.37 \times 10^{-11}$	$3.21 \times 10^{-12}$
F <sub>rb</sub>	알랜분산( $\sigma$ )	$1.04 \times 10^{-11}$	$2.14 \times 10^{-11}$
	상대주파수	$4.44 \times 10^{-11}$	$9.11 \times 10^{-11}$
F <sub>qz</sub>	알랜분산( $\sigma$ )	$2.01 \times 10^{-11}$	$2.94 \times 10^{-11}$
	상대주파수	$8.55 \times 10^{-11}$	$1.27 \times 10^{-10}$

와 비교(교정)가 되어야 하기 때문에 수시 비교 정보의 이용이 불가함은 물론 교정기간 동안 업무에 지장을 초래한다. 또한 이를 실험실내에서 관리하기 위한 특별한 환경이 필요하기도 하다. 반면에 GPS를 이용한 주파수원(시각원)은 고정도의 독립된 주파수원을 유지하는 경우의 문제점은 해결되나, 아직까지 전리층에 의한 전파 지연 보정 등이 선결과제로 남아있다.

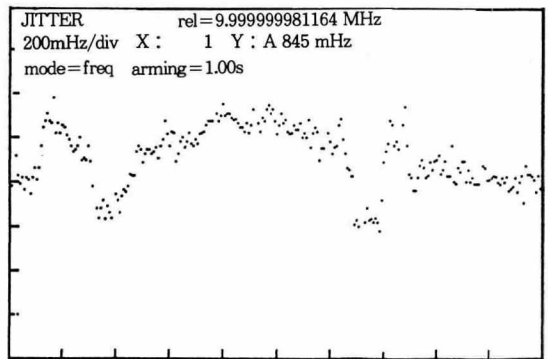
Rb 표준시각의 F<sub>rb</sub>와 GPS 표준시각을 수신한 F<sub>syn</sub>에서의 각 표준주파수를 피측정체에 직접 적용하여 나타낸 실험결과는 (그림 4)와 같다. 이



(그림 4) F<sub>rb</sub>와 F<sub>syn</sub>을 이용한 피측정체의 알랜분산

측정결과를 살펴보면 두개의 주파수원은 거의 비슷한 측정결과(GPS가 약간 우세함)가 나온다는 것을 알 수 있으며, (그림 4)의 결과로 GPS 수신기로 수신된 F<sub>syn</sub>는 교정 기준 주파수로서 사용에 문제가 없다는 것이 증명되고 있다.

(그림 5)는 현 시스템의 잡음상태를 나타낸 것이다. 이 결과는 정확한 표본 데이터를 측정하는데 있어서 표본 추출방법, 기준 주파수 설정, 실제 측정방법, 시스템 구성 및 S/W 구성을 얼마만큼 효율적으로 하느냐에 따라 주파수 안정도가 개선될 소지가 있음을 나타내는 것이다.



(그림 5) GPS를 이용한 주파수 안정도 시스템 잡음

## VI. 결 론

GPS 수신기는 미해군 관측소의 모시계에 1pps로 동기되는 원자시계를 탑재한 GPS 위성으로부터 계속적으로 표준신호를 받아 이를 기준주파수로 하여 시간표준을 유지하고 있기 때문에, 본 주파수 안정도 측정시스템에서는 이를 시간·주파수 분야의 교정검사 기준으로 사용하고, GPIB 및 PC를 이용한 전자계수기의 자동제어와 측정 데이터를 처리하는 S/W를 개발하였다. 우리 연

구소는 국내 교정검사기관으로는 최초로 GPS를 실제의 시간·주파수 분야의 교정검사업무중 주파수 안정도 측정에 응용하여 원하는 정확도를 확보하였으며, 실제 인위적인 측정시 수반되는 측정시간의 지연 및 개인 측정오차를 측정자동화 S/W(정보산업회 등록 : 92-01-12-3308)를 이용하여 극소화함으로써 효율적이고 정확한 안정도를 측정할 수 있었다. 향후 이 시스템은 GPS 수신기를 사용하여 주파수 안정도를 측정하고자 하는 외부 산업체 등에 새로운 모델로 제시될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. D.W.Allan, "The measurement of frequency and frequency stability of precision oscillator," NBS, T.N. 669, May 1975.
2. D.A.Howe, "Frequency domain stability measurements : A tutorial introduction," NBS, T.N.679, Mar. 1976.
3. J.A.Barnes, et al., "Characterization of frequency stability," NBS, T.N. 394, Oct. 1970.
4. D.W.Allan, J.H.Shoaf and Donald Halford, "Statistics of time and frequency data analysis," Chapter 8 of NBS Monograph 140, pp. 151-204, May 1974.
5. L.Cutler and C.Searle, "Some aspects of the theory and measurement of frequency fluctuations in frequency standard," Proc. IEEE, vol.54, no.2 pp.136-154, Feb. 1966.
6. N.S.Chung, J.O.Kim, Y.S.Song Frequency stability, 한국표준과학연구원, KSRI-EN-3, Jan. 1982.
7. N.S.Chung, Time, 한국표준과학연구원, KSRI-ET-83, Dec. 1985.
8. Y.B.Kim, N.S.Chung, "A study on the measurement of frequency stability using beat frequency method," 한국통신학회지, Vol.12, No.4 Aug. 1987.
9. T.Y.Otoshi, M.M.Franco, "Measurements of a deep space station fractional frequency stability to the  $10^{-15}$  level" IEEE Trans. Instrum. Mea., Vol.41.No.56, Oct. 1992.
10. 전동석, 임병원, 박찬범, "GPS 위치측정시스템 기술," 전자통신동향분석, Vol.6, No.4, pp 96-111, Jan. 1992.
11. 전동석, 임병원, 박찬범, 주파수 안정도 자동측정 S/W, 한국전자통신연구소, TM92-KET15471, Nov. 1992.