

## VLBI의 기준 주파수와 시각 동기 시스템 FREQUENCY STANDARD AND CLOCK SYSTEM IN VLBI

오세진, 정현수, 노덕규, 김광동  
한국천문연구원

SE-JIN OH, HYUN-SOO CHUNG, DUK-GYOO ROH, AND KWANG-DONG KIM  
Korea Astronomy Observatory, 61-1 Hwaam, Yusong, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: sjoh@trao.re.kr

(Received October 19, 2004; Accepted December 21, 2004)

### ABSTRACT

In this paper, we describe a principle of the atomic frequency standard and clock system in VLBI(Very Long Baseline Interferometry). The hydrogen maser is a usual VLBI standard. During VLBI observations, signals emitted by distant sources of radio frequency energy(quasars) are received and recorded at several antennas. At each antenna(VLBI station), a very stable frequency standard(hydrogen maser) provides a reference signal which enables time-tagging to the quasar signals as they are being recorded on magnetic tapes or hard-disk modules. For each VLBI experiment, correlation of the time-tagged recorded information between the participating antennas is used to yield the arrival time differences of any specific quasar radio wave between the antennas. These time differences are used to calculate the relative antennas to each other. In this paper, we also introduce the KVN(Korean VLBI Network) atomic frequency standard and clock system.

*Keywords:* VLBI, Active Hydrogen Maser, Standard Frequency and Clock System, GPS

### 1. 서론

시간 또는 그 역수의 차원을 가진 주파수는 길이와 질량 등과 함께 인간의 생활에 가장 기본적인 물리적인 양으로 인류는 예전부터 자연계의 다양한 물리현상을 이용하여 시간을 정밀하게 측정하는 노력을 계속하여 왔다. 고대 이집트에서는 당시의 기간산업인 농업이 정확한 시간을 필요로 하여 천체관측으로부터 역(曆)을 발달시켜온 것으로 잘 알려져 있다. 17, 18세기의 유럽에서는 해의무역이 발달하여 안전하고 효율적인 항해기술과 경도를 정확하게 알 수 있는 기술의 확립은 국가의 가장 중요한 과제 중의 하나였으며, 유럽의 열강은 그리니치 천문대와 파리 천문대를 설립하여 막대한 금액을 들여 정확한 시계를 개발하는 것을 장려하였다. 현대의 과학기술사회에서도 GPS로 대표되는 위성측위기술을 시작으로 고속 디지털 통신망의 동기, 정밀계측기술등의 첨단 과학기술분야에서 원자시계(atomic clock)가 중요한 역할을 하고 있다(デーウア, 1997).

원자주파수 표준기의 일종인 수소메이저(hydrogen

maser)는 현재 사용하고 있는 원자주파수 표준기 중에서 단기 주파수 안정도가 가장 뛰어나고, VLBI(초장기선전파간섭계;very long baseline interferometry), 심(深)우주 탐색, 전파천문 등의 최첨단 과학 및 공학분야의 정밀측정에 필수적인 장치이다(김현구, 2003).

일반적으로 VLBI 시스템의 각 관측국에서는 독립적인 기준 주파수를 유지하고 있다. 그리고 각 관측국의 수신기에서는 기준 주파수에 위상잠금(phase-locked)된 국부발진기(local oscillator)의 신호로 사용함으로써, 입력신호의 위상정보를 지닌 주파수 변환을 하게 된다. 이 경우, 기준 주파수의 안정도는 결맞음을 유지하기 위해서도 중요하며, 주로 수소메이저를 기준 주파수원으로 이용하고 있다(Kondo et al. 1997). VLBI 시스템에서 안정된 기준 주파수와 시각 동기 시스템이 필요한 이유는 다음과 같다. 우선, 각 수신기의 안정된 국부발진 신호가 기준신호로 사용되며, 각 관측국에서 관측된 우주전파신호를 상관처리센터로 보내기 위해 아날로그에서 디지털로 고속 변환하는 샘플러의 타이밍 신호로 사용되기 때문이다. 또한

높은 안정도를 가진 기준 주파수원과 시각 동기 시스템은 VLBI 시스템의 특성상 멀리 떨어진 각 관측국에서의 기준이 되는 시계가 불안정하게 된다면, 이것에 따른 시간의 흔들림이 직접 간접으로 지연시간의 오차로 작용하기 때문이다. 따라서 VLBI 시스템의 원리 가운데 가장 중요한 역할을 하는 부분은 높은 정확도와 안정도를 가지는 시각 동기 시스템을 통해 각 관측국간의 위상차를 알아내는 것이다.

본 논문에서는 수소메이저의 기본원리와 특성 그리고 한국우주전파관측망(KVN)에서 도입하고자 하는 수소메이저에 대해서 간략히 기술하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 기준 주파수와 시각 동기 시스템의 관계에 대해 살펴보고, 3장에서는 수소메이저의 기본원리에 대해 자세히 기술한다. 4장에서는 KVN에서 도입하고자 하는 수소메이저의 구성에 대해 기술하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 기준 주파수와 시각 동기 시스템의 관계

### 2.1. 수소 메이저의 특징과 다른 원자주파수 표준기와의 비교

지금까지 실용화된 주요 원자주파수 표준기로서는 수소메이저 이외에 루비듐(rubidium) 원자주파수 표준기, 세슘(cesium) 원자주파수 표준기 등이 있다.

루비듐 원자주파수 표준기는 루비듐 원자를 안에 넣고 봉한 가스 셀(cell)을 이용함으로써 소형 및 경량화가 가능하여 통신, 방송분야에서 널리 이용되고 있다. 루비듐 원자주파수 표준기의 단기 주파수 안정도는 세슘 원자주파수 표준기와 비슷하지만, 장기안정도는 세슘 원자주파수 표준기보다 떨어진다.

세슘 원자주파수 표준기는 가열된 세슘 오븐(oven)에서 나오는 열원자빔을 마이크로파와 상호작용시켜, 마이크로파의 주파수를 세슘 원자의 시계전이선에 잠금하여 안정된 주파수를 얻는다. 세슘 원자주파수 표준기는 장기안정도가 뛰어난 것이 특징이다. 또한 1초의 정의가 세슘원자의 전이주파수로부터 결정되었기 때문에 독일, 프랑스, 미국, 일본, 한국 등의 표준연구기관에서는 세슘 원자주파수 표준기를 운영하고 있으며, 위성을 이용하여 세슘 원자주파수 표준기를 국제 비교하고, 그 결과를 매달 국제도량위국(BIPM)에 보고하고 있으며, 국제원자시(TAI) 생성에 기여하고 있다(테우아, 1997).

그리고 최근에는 보다 높은 정확도를 가진 광펄핑 세슘 원자주파수 표준기, 원자분수 주파수 표준기 등의 원자주파수 표준기 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 광펄핑 세슘 원자주파수 표준기는 레이저를 원자에 비추어 원자들이 모두 특정한 에너지상태가 되도록 만든다. 광펄핑 방식을 이용하면 세슘원자빔의 진행경로가 공간적으로 굴절되지 않고, 원자빔의 손실이 적고, S/N 비를 높일

수 있으며, 강자석을 사용하지 않기 때문에 자장에 의한 주파수 편이를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한, 바닥상태 Zeeman 준위의 밀도분포를 대칭적으로 만들기 때문에 시계전이선에 이웃한 전이선에 의한 시계전이선의 주파수 편이를 최소화 할 수 있다. 그러나 레이저 광을 이용하기 때문에 광편이(light shift)라는 새로운 주파수 편이가 발생하는 문제를 가지고 있다. 원자분수 주파수 표준기는 포획된 원자를 연직 상방향으로 쏘아 올리면 원자들은 위로 올라갈 때와 다시 떨어질 때 마이크로파를 두 번 만나는데, 그 마이크로파의 주파수와 위상과 세기에 관한 자세한 정보를 가지고 떨어진다. 원자들이 가진 마이크로파에 관한 정보는 바로 원자시계를 동작시키는데 사용된다. 이 원자들이 위로 올라갔다 떨어지는 모양이 마치 분수와 같다하여 이런 방식의 원자시계를 흔히 원자분수시계(atomic fountain clock)라고 부른다. 세슘원자분수시계는 프랑스의 LPTF 등에서 완성되었으며 그 정확도는 기존의 어떤 원자시계보다 우수한 것으로 보고되었다(한국표준과학연구원).

이러한 원자주파수 표준기와 비교하여 수소메이저의 가장 큰 특징은 단기안정도가 매우 높다는 것이다. 이 특징을 살려서 VLBI에 널리 이용되고 있다. 수소메이저는 메이저 발전을 위한 공동 공진기(수소축적구), 진공배기계, 수소소스 등과 같은 것 때문에 다른 원자시계와 비교하여 크고 무거운 단점이 있다.

그림 1에 각 원자주파수 표준기의 일반적인 주파수 안정도를 나타내었다(NICT, 2003). 그림 1에서 예를 들어, VLBI(수천 초)의 관측 시간에 대해 수소메이저의 안정도가 우수한 것을 알 수 있는데, 이 수소메이저를 적절하게 운영하는 것은 그림 1과 같은 안정도 레벨을 제공하기 때문이다. 따라서 모든 나라의 VLBI 네트워크에서 각 관

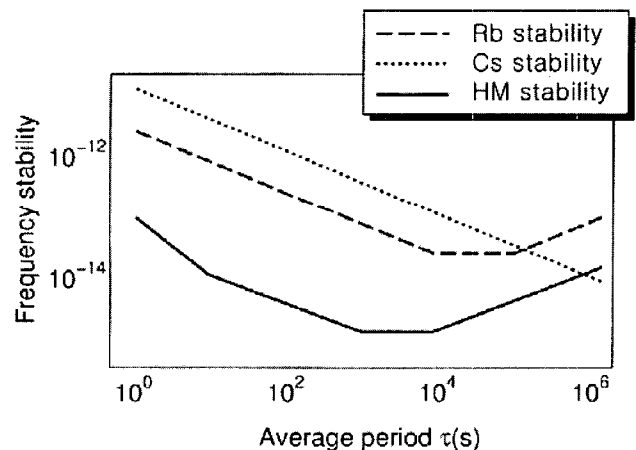


그림 1. 원자주파수 표준기의 주파수 안정도(테우아, 1997).

측국 사이의 정확한 기선(基線; baseline)을 결정하는데 수소메이저를 사용하고 있다.

2.2. 기준 주파수의 규칙과 필요성

VLBI 관측의 경우, 전파 에너지(quasar; 퀘이서)의 먼 소스로부터 들어오는 신호는 각 전파망원경에서 수신하고 디지털 처리 시스템을 거친 후 기록기에 기록된다. 각 전파망원경(VLBI 관측국)에서 매우 안정된 기준 주파수는 자기 테이프(하드디스크)에 기록되는 퀘이서 신호에 시간 태그를 삽입하는 표준 신호를 제공한다. 각 VLBI 관측에 대해 참여한 전파망원경으로부터 시간 태그를 기록한 정보의 상관처리를 수행할 때 전파망원경에서 임의의 특정한 퀘이서 전파가 도착한 시간 사이에는 차이가 발생하게 된다. 이 시간 차이를 이용하여 각 관측국의 전파망원경 위치와 퀘이서의 관측시간을 정확하게 결정하는데 사용된다.

$$\begin{aligned} \text{필요한 주파수 안정도} &= \frac{\text{Baseline Precision}}{\frac{\text{Speed of Light}}{\text{Observation Period}}} \\ &= \frac{2\text{mm}}{\frac{3 \times 10^{11}\text{mm/sec}}{600\text{sec}}} \\ &= 1 \times 10^{-14} \end{aligned}$$

또는

$$\begin{aligned} \text{필요한 주파수 안정도} &= \frac{\text{위상의 1라디안 이동하는 } X \text{ 대역 파형에 대한 시간}}{\text{관측시간}} \\ &= \frac{1 \text{ radian}}{\frac{8 \times 10^9 \text{ cycle/sec} \times 2\pi \text{ radian/cycle}}{600\text{sec}}} \\ &= 3 \times 10^{-14} \end{aligned}$$

(1)

예를 들어, 식(1)에 나타낸 것과 같이 2 mm의 정확성으로 VLBI 기선의 측정은 600 초 관측시간 동안 약  $1 \times 10^{-14}$  정도의 클럭(기준 주파수) 안정도를 필요로 한다. 이것은 2 mm를 600 초로 나누어 진행하기 위한 전파에 대한 시간과 관계가 있다. 같은 방법으로 1 mm의 기선 정확성은 600 초의 관측에 대해  $5 \times 10^{-15}$ 의 클럭 안정도가 필요하게 된다. 주파수 표준에 필요한 안정도를 추정하는 다른 방법으로는 위상의 1 라디안 이동하는 X 밴드(8 GHz) 파형에 대해 시간을 계산하고 이것을 관측 주기로 나눈 것이다. 이때 600 초의 관측시간에 대해  $3 \times 10^{-14}$ 의 안정도가 필요하다.

3. 수소메이저 원리와 개요

3.1. 원리

수소원자(hydrogen atoms)는 여러 방법으로 에너지 준위를 변화시킬 수 있다. 자연의 법칙에 의해 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위까지 변하는 원자의 변화(전이)는 에너지 준위를 상수로 나눈 것 사이에서의 차이로 정의한 주파수에서 전자기 복사가 발생한다(NICT, 2003).

그림 2는 자기 극성을 변화시키는 하나의 전자를 가진 수소원자를 나타낸 것이다. 이 극성변화는 원자의 에너지 준위에서의 변화와 핵, 전자 사이의 상호작용에서의 변화에 의해 발생하게 된다. 수소원자의 초미세 준위 사이의 전이를 초미세 전이(hyperfine transition)라고 하고, 전자기 복사는 1,420,405,751.77Hz(수소원자의 바닥상태의 두 초미세 준위 사이의 복사선의 주파수)의 주파수를 만들어 낸다(Masahiro et al.).

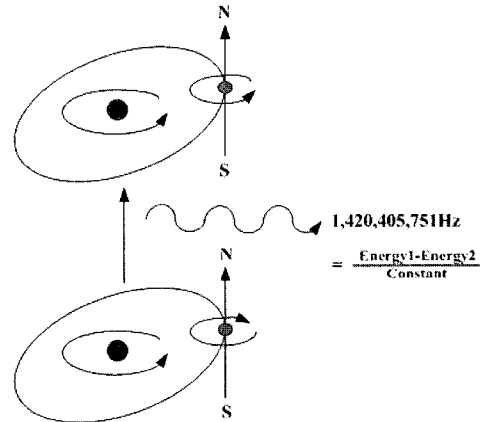


그림 2. 수소 원자-메이저 주파수원.

다시 말해 그림 2에 나타낸 것과 같이 수소원자는 원자핵과 1개의 전자로 구성된 가장 간단한 구조의 원자이다. 이 원자의 에너지 바닥준위는 음전하 전자의 스핀과 양전하 스핀과 원자핵의 자기적 작용에 의해 수소원자의 바닥준위는 그림 3에 나타낸 것과 같이  $F=1$ 과  $F=0$ 의 2개의 초미세 준위로 나누어진다. 여기서 수소원자에 외부로부터 자기장을 인가하면  $F=1$ 은  $m_F=+1$ ,  $m_F=0$ ,  $m_F=-1$ 의 3개의 자기 부준위로 나누어진다.

수소원자가 열평형 상태가 될 때는  $F=1$  준위의 원자수  $n_{F=1}$  과  $F=0$  준위의 원자수  $n_{F=0}$  와의 차이는 매우 작아져서,  $(n_{F=0} - n_{F=1})/n_{F=0}$  은 약 0.1%로, 원자의 고유 공명주파수  $f_0$  (1,420,405,751.774±0.005Hz)의 마이크로파를 가하여도 미약한 흡수신호밖에 얻어지지 않는다.

따라서 수소메이저 시스템에서는 원자 에너지의 준위를 선별하여  $F=0$  준위의 원자를 발산하고, 에너지 준위의 높은  $F=1$ ,  $m_F=0$ 의 원자만을 선택하게 된다. 선택된

원자는 고유 공명주파수  $f_0$ 에 매우 가까운 주파수  $f_c$ 의 마이크로파 자극을 받아서  $F=0, m_F=0$  에너지 준위의 낮은 상태로 전이할 때  $\Delta E = h \cdot f_0$  ( $h$ : 플랑크 상수)의 마이크로파 에너지를 유도방출하여 메이저로 발진을 하게 된다.

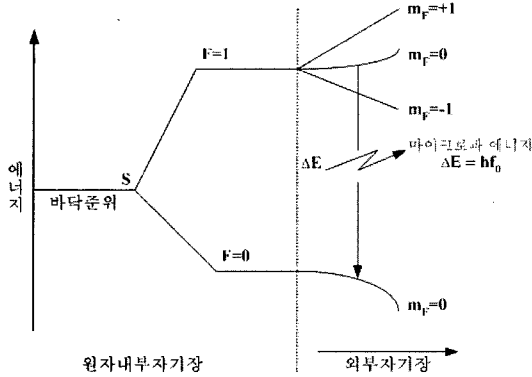


그림 3. 수소원자의 에너지 준위.

3.2. 개요

수소메이저는 원리에 따라 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 수소메이저가 능동적으로 발진기(oscillator)로 동작하는가(active hydrogen maser; AHM)이고, 두 번째는 수동적으로 증폭기(amplifier)로 동작하는가(passive hydrogen maser; PHM)이다. 본 논문에서는 보다 정확한 주파수 안정도를 필요로 하는 VLBI에서 널리 사용되고 있는 능동 수소메이저(AHM)을 기준으로 간략히 기술한다.

일반적으로 수소메이저 시스템은 그림 4에 나타난 것과 같이 크게 양자부, 수신·1상동기부, 공진기동기부로 구성된다(Masahiro et al., 1990).

양자부는 방전관에 적정량의 수소를 안정하게 공급하

는 수소공급부, 공급된 수소를 원자로 분해하여 에너지 준위를 선별하는 빔 생성부, 높은 준위의 수소원자만을 모아 받아들이며 메이저 발진을 일으키게 하는 메이저 발진부, 진공함 내를 진공으로 배기하는 진공배기부로 구성된다. 수신·1상동기부, 공진기동기부는 전자장치부에 위치한다. 그 외에 각 부로 전원을 공급하는 컨버터와 진공배기용의 스퍼터(sputter) 이온펌프 전원으로 구성된다.

3.2.1. 양자부

수소봉에서 공급된 수소가스는 감압된 후 팔라듐(palladium) 판막에서 고정도(高精度)로 유량이 제어되고, 일정압력에서 방전관으로 유도된다. 방전관에 더해진 고주파 전자장에 의해 분리된 수소원자는 방전관 콜리메이터(collimator)를 통하여 원자 빔이 되고, 원자의 상태를 선택하는 마그네트(magnet)에 의해 특정 준위에 점유된 원자만이 선택된다.

이 중에,  $F=1, m_F=0$ 과  $m_F=+1$ 의 고준위에 있는 수소원자만이 마이크로파 공진기 내의 수소 축적구 부분에 모여진다. 수소 축적구 안쪽 면은 테플론(teflon) 등의 천으로 코팅되어 있으므로 벽면과의 충돌에 의한 수소원자의 내부 상태의 변화를 줄일 수 있기 때문에, 수소원자는 내부상태가 거의 흐트러지지 않고 약 1초 정도 수소 축적구 내에 머물러 있게 된다. 이 때문에 전이확률은 작아도 유도복사에 의해 지속적인 발진을 일으킨다. 이 사이, 마이크로파 공진기의 공진주파수에 의해 유도방출을 받아서 낮은 준위로 전이한다. 이 때 마이크로파가 유도방출에 의해 증폭되어 메이저 발진이 발생한다. 수소메이저에서 메이저 발진에 이용하는 수소원자의 에너지 상태전이는 그림 3에 나타난 것과 같이 외부 자기장의 영향이

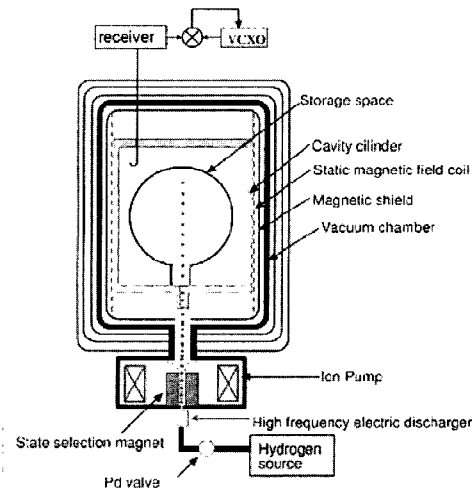
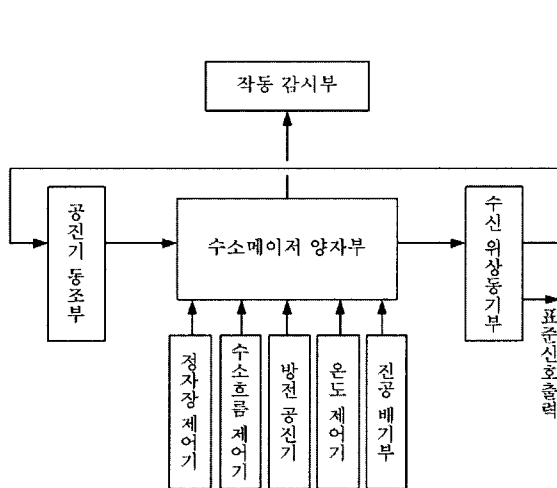


그림 4. 수소메이저의 구성 (테우아, 1997).

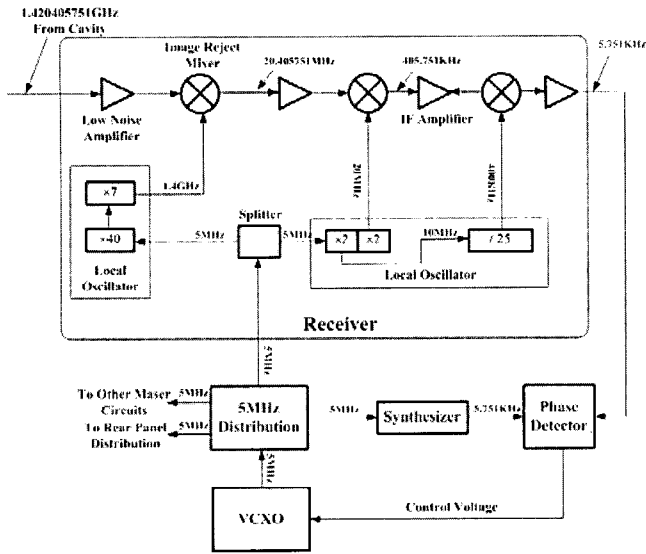


그림 5. 수신 위상 동기부의 구성도.

가장 작은  $F=1$ ,  $m_F=0$  준위에서  $F=0$ ,  $m_F=0$  준위로의 준위 전이이다. 이 전이를 다른 전이와 분리하기 위해서는 정자장이 필요한데, 이를 위해 공진기에 솔레노이드 코일을 설치하고, 솔레노이드 외부에 지자장 및 외부 자장을 차단하기 위한 자기차폐(magnetic shield)를 설치한다.

또한 메이저 발진에 필요한 들뜬 준위의 수소원자가 다른 분자와의 충돌에 의해 메이저 발진 전력의 감소와 발진주파수의 변동을 피하기 위해 빔 생성부와 메이저 발진부를 진공함 내에 수용하여, 스퍼터 (sputter) 이온펌프에서 높은 진공으로 배기된다.

3.2.2. 수신 위상동기부

수신 위상동기부는 그림 5에 나타난 것과 같이 수정발진기(VCXO)의 출력주파수를 메이저 발진 주파수에 위상잠

금하여 높은 안정도를 가진 마이크로파를 발생하는 장치이다.

공진기로부터 추출된 매우 미약한 메이저 발진출력 신호는 front-end 내의 저잡음 증폭기(low noise amplifier; LNA)에서 증폭된 후, 믹서에서 VCXO 출력신호에 위상잠금된 국부신호와 혼합된 IF 신호(5.751kHz)가 된다. 이 IF 신호와 VCXO 출력신호를 기준으로 한 합성 신호와 위상비교를 하여 VCXO의 출력주파수를 제어한다. 이 VCXO 출력신호는 분배기에서 분할되어 아이솔레이션(isolation)된 기준주파수로 출력된다.

3.2.3. 공진기 동기부

공진기 동기부는 메이저 발진 주파수를 수소원자의 공명 주파수와 일치되는 것에 의해 공진기의 공진 주파수를 설정하고 장기간동안 이것을 유지시키는 자동제어계이다. 여기서는 그림 6에 나타난 것과 같이 공진기의 공진 주파수( $f_c$ )의 검출에 cavity sensing 방식을 이용하고 있다. 공진기 Q 곡선의 반치폭( $2 \cdot \Delta f$ )에 해당하는 2 주파 센싱신호를 VCXO 출력신호를 기준으로 한 스위치 주파수 합성기(synthesizer)로 합성( $\sim 20.4 \text{ MHz} \pm \Delta f$ )하고, 같은 VCXO 출력신호를 체배한 국부 신호(1,400MHz)와 혼합하여 공진기 내에 주입한다. 공진기 Q 곡선에 의해 수소원자의 공명 주파수에 대한 공진 주파수의 떨어져 조화를 이루어 발생하는 진폭차의 센싱신호를 locking amp에서 동기를 검출하여 오차전압을 생성한다. 공진기내의 가변 용량 소자에 이 오차전압을 입력하여 공진 주파수를 제어한다.

4. KVN의 기준 주파수 시스템

KVN에서 건설 중인 3개의 관측국(연세, 울산, 탐라)에서 기준 주파수 및 시각 동기 시스템으로 운용하고자 하는 시스템의 간략한 구성도를 그림 7에 나타내었다 (김현구,

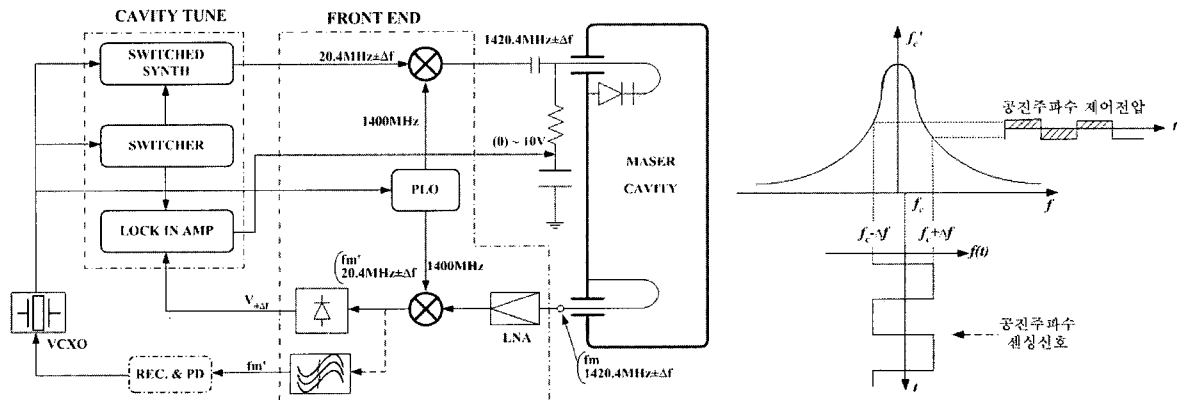


그림 6. 공조기 동조부의 구성도.

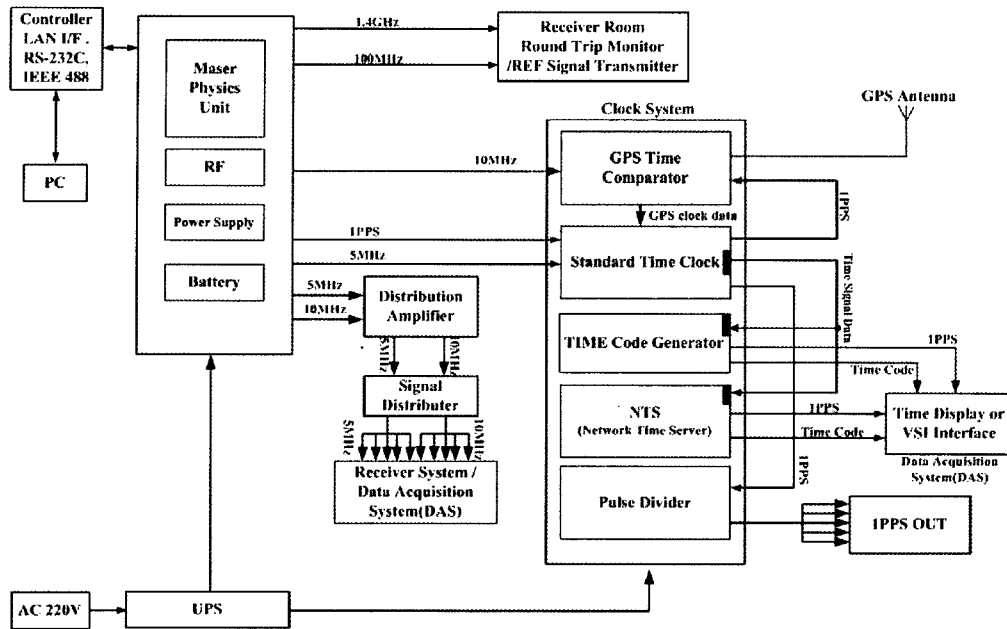


그림 7. KVN 기준 주파수 및 시각 동기 시스템 구성도.

2003). 그림 7에서 수소메이저로부터는 5 MHz, 10 MHz, 100 MHz, 1.4 GHz, 1 PPS 신호가 출력된다. 그리고 대부분의 주변 장비의 동기를 맞추기 위해 1 PPS와 10 MHz를 기본으로 사용하기 때문에 수소메이저로부터 10 MHz를 사용하거나 주파수 변환기를 사용하여 5 MHz를 체배하여 10 MHz를 만들며, 신호분배기를 사용하여 5 MHz, 10 MHz의 신호를 KVN back-end 시스템에 신호를 분배되도록 할 계획이다. 그림 7에서 KVN 시각 동기 시스템에서 GPS 시각비교기(GPS time comparator)의 경우는 수소메이저에서 출력되는 신호의 위상과 GPS 위성으로부터 수신한 신호의 위상변화를 감지하기 위한 것이다. 그리고 표준 시각표시기(standard time clock)와 시각부호 생성기(time code generator)는 디지털 back-end 장비에 현재의 관측시각을 생성하여 전달하기 위해 설치할 계획이다. 펄스분배기(pulse divider)는 각 주변장비의 시각동기를 위한 1 PPS 신호를 전달하기 위한 것이다. 또한 펄스분배기는 100 MHz, 1.4 GHz의 수신기의 위상안정도를 감지하기 위해 설치될 Round Trip Monitor에 사용된다.

여기서 일반적인 VLBI의 기준 주파수 및 시각 동기 시스템에서 GPS 시각비교기를 사용하는 이유는 다음과 같다(Technical Operation Workshop, 2003). 우선 GPS의 데이터는 VLBI에서 수소메이저의 성능을 조사하기 위한 것이다. 장기간의 데이터 모니터링과 분석은 주파수 오프셋과 변화를 결정하는데 도움을 주기 때문에 GPS 데이터 역시 수소메이저의 시간을 설정하는데 도움을 준다.

그리고 GPS 데이터는 수소메이저에 어떤 문제가 발생하였는지를 확인하는데 사용된다. 대부분의 문제는 수소

메이저 주파수가 GPS 데이터에 보이기 때문에 얼마나 오차가 발생하였는가를 확인할 수 있다. 그러나 이 문제를 얼마나 빨리 확인하고 교정(calibration)을 수행하여야 하는가를 결정하는 것이 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 만약 이 과정이 늦어지면 그동안 관측한 데이터를 신뢰할 수 없는 문제점이 발생하게 된다.

GPS 데이터로부터 확인할 수 있는 문제점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

#### 1) Phase lock의 손실

이 문제는 일반적으로 한 방향으로 데이터를 치우칠 때 나타나며 그 비율은 위상 검출기가 VCXO를 제어하는 범위에 의존적이다.

#### 2) 온도 문제

이는 몇 가지 방법으로 자체적으로 나타난다. 데이터의 경사(주파수 오프셋)의 변화, 데이터의 커브(주파수 변화), 이들 양쪽의 결합 등에 의해 나타난다.

#### 3) 자기장 문제

자기 문제는 데이터 경사 변화(주파수 오프셋) 변화에 의해 나타난다.

#### 4) 1 PPS 문제

1 PPS 문제는 전형적으로 한 스텝 또는 시간 위치를 나타내는 데이터에서 여러 스텝들로 나타나며 일반적으로는 스텝의 경사는 변하지 않는다. 일반적으로 스텝들은 부가적인 것으로 한쪽 방향으로 보면 연속적이다. 만약 1 PPS가 원래의 위치로 돌아간다면, 더 이상 클록 형태의 스텝이 아닌 잘못된 시간 위치 데이터를 가진 것이 된다.

현재 KVN에서 VLBI 관측을 위해 고려하고 있는 필요

표 1. KVN에서 VLBI 관측을 위해 고려하고 있는 수소 메이저의 특징

Items	Performance						
	1s	10s	100s	1000s	3600s	10000s	100000s
Frequency stability	$2.0 \times 10^{-13}$	$3.0 \times 10^{-14}$	$7.0 \times 10^{-15}$	$3.0 \times 10^{-15}$	$2.0 \times 10^{-15}$	$1.0 \times 10^{-15}$	$5.0 \times 10^{-16}$
Accuracy	$1.0 \times 10^{-12}$						
Temperature sensitivity	$\leq 1.5 \times 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$						
Magnetic sensitivity	$\leq 1.0 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$						
Phase noise(5MHz)	1Hz	10Hz	100Hz	1000Hz	10000Hz		
	-100	-120	-140	-150	-150		
Setting resolution	$1.0 \times 10^{-15}$						

한 수소메이저의 주파수 안정도 및 특징을 표 1에 나타내었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 VLBI의 원자주파수 표준기와 시각동기 시스템의 원리에 대해 간단히 소개하였다. 수소메이저는 세슘과 루비듐 원자주파수 표준기에 비하여 장기주파수 안정도는 떨어지지만, 단기주파수 안정도는 우수한 특징을 가지고 있으며, 동작원리에 따라 능동수소메이저와 수동수소메이저가 있으며 능동수소메이저가 VLBI에서 널리 사용된다. 일반적으로 VLBI 관측을 수행할 때, 각 관측국에서는 멀리 떨어진 우주전파 에너지원에서 방출되는 신호를 수신기를 통하여 수신한 후 저장매체에 기록하게 된다. 각 관측국에서 매우 안정된 기준 주파수로서 사용되는 수소메이저는 마그네틱테이프나 하드디스크에 기록되는 우주전파 신호에 시각태그를 붙일 수 있는 기준신호를 제공한다. 그 후 상관처리센터에서 각 관측국의 시각태그가 기록된 관측자료의 상관처리를 통해 각 관측국 사이의 특정 전파신호의 도착시간 차를 구할 수 있다. 이러한 전파의 도달시간 차이는 각 관측국의 위치와 전파원의 관측시간을 정확하게 계산하는데 사용되게 된다. 따라서 현재 건설 중인 KVN의 경우 3개의 관측국에 독자적인 기준 주파수 및 시각 동기 시스템이 필요하며, 이를 위해 전파망원경의 건설 완료 시점에 맞추어 시스템을 도입할 예정이다.

## 참고문헌

김현구 외, 2003, 한국우주전파관측망 건설사업 계획서.

デーウア, ソベル, 1997, 軽度への挑戦, 翔泳社.

Kondo et al., 1997, VLBI 技術.

Kvarz website <http://www.kvarz.ru>.

NICT, 2003, 시간·주파수 표준특집 논문집, 한국표준과학연구원 시간주파수연구실, <http://www.kriss.re.kr/time/>.

Masahiro Tsuda et al., 1990, High stability hydrogen maser, Anritsu Co. Technical paper, Japan.

PTF website <http://www.ptfinc.com>.

Quartzlock website <http://www.quartzlock.com>.

Richard Pericival, Time and Frequency Standards, Applied Microwave & Wireless.

Symmetricom website <http://www.symmetricom.com>.

Technical Operation Workshop, 2003, MIT Haystack Observatory.

Thomson et al., 2001, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, John Wiley & Sons, Inc.