

주 파 수 표 준 확 보 예 관 한 언 구

1. 서 론

최근 수년래, 외국에 있어서는 원자주파수 표준원기 (Atomic Frequency Standards) 의 연구개발로 그의 확도 및 안정도도 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 자리 (桁) 의 문제가 취급되게끔까지 진보하였으며 국제간 시각동기에 있어서도 인공위성이나 Flying Clock 등을 이용하여 0.1ns 까지 비교 정도 (精度) 를 얻을 수 있게 되었다.

당 연구소에서는 10여년전에 도입한 공칭확도 10^{-8} 의 T-1100-A 수정 발전기형 표준원기를 2대 보유하고 있으며 금년 말 (1969년 11월) 확도 및 안정도가 각각 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 인 CESIUM BEAM 원자 주파수원기가 도입되었다. (이하 원기 명칭은 각각 X-tal.1, X-tal.2, CS.1 이라 칭한다.)

작년도에는 X-tal 원기의 확도를 대략 10^{-7} 까지 유지할 수 있었으며 금년도에는 이의 확도를 개선하고 계속적인 관리방안을 모색하기 위해서는현재 분해능 (Resolution) 이 가장 양호한 T-1123-A Digital Synchrogonometer (시각 비교장치) 를 사용하여 일본 표준 단파 (JJY 8MHz, 15MHz) 와의 정밀 시각 비교측정 및 X-tal 의 주파수 교정 방법등을 연구하였다.

그리고 표준 단파를 수신하여 비교측정을 할 경우 가장 큰 영향을 미치는 전리층의 상태에 따른 비교 정도 (精度) 의 감소등을 이론적으로 구하여 보았으며 원기를 규정 확도 이내로 계속 유지하기 위한 관리 방안으로써 시각차와 원기의 Drift 와의 안정도 문제등을 고찰하였다.

끝으로 금년말에 도입된 Cesium Beam 원자 표준원기와의 직접 비교측정에 의하여 X-tal 원기의 확도 및 안정도를 측정하여

J J Y 고출단파에 의한 비교 측정값과 비교 분석하여 보았다.

2. 전리층의 높이와 전파지연시간

(propagation delay) 과의 관계

2.1 개요

단파를 수신하여 정밀 시각비교 측정을 할 경우 가장 큰 오차를 포함하는 것이 전리층의 상태에 따른 변동이다.

본장에서는 주로 전리층 높이의 변동에 따른 전파 지연시간을 수식적으로 계산하여 수신 정도(精度)를 알아보고자 한다.

이 과정에서 지구를 완전한 구면체로 생각하고 양 지점간의 거리가 4000 km 이내 이므로 전리층 반사는 1 hop로 가정 하였다.

2.2 대원거리 (great - circle

distance) 산출공식

지구를 극좌표계로 생각하면 대원거리 D 및 중심각 α 는 다음 (1) 및 (2)식으로 구할 수 있다.

$$\cos \alpha = \frac{1}{2} \{ \cos(B-C) - \cos(B+C) \} + \frac{1}{2} \{ \cos(B-C) + \cos(B+C) \} \cos A \dots\dots\dots (1)$$

$$D = 111.195 \times \alpha^{\circ} (km) \dots\dots\dots (2)$$

여기서

B, C b 및 c 점의 위도
 A b 및 c 점의 경도의 차
 α b 및 c 점을 연결하는 지구 중심각

2.3 전파지연시간 산출공식

지금 지구를 구면체지로 생각하면 (제 1.5)와 같이 기하학적으로 2 점 a, b 간을 h' 높이로 되는 P 점에서 반사하여 도달하는 전파통로의 길이를 알아 낼 수 있다.

이때 전파지연시간 d 는

$$d = L/c = 2 \sqrt{\ell^2 + (h' + n_0)^2} / c \dots\dots\dots (3)$$

가 된다.

여기서

$$\ell = r \sin \alpha/2 = r \sin D/2r$$

$$h_0 = r (1 - \cos \alpha/2) = r (1 - \cos D/2r)$$

$$c = \text{광속} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$$\alpha = \text{양 지점을 연결하는 지구 중심각}$$

$$r = \text{지구의 반경}$$

$$D = 2 \text{ 점간의 대원거리}$$

$$\therefore \alpha = 10^{\circ} 13' \approx 10.21667^{\circ}$$

태원거리

$$D = 111.195 \times 10.21667 \approx 1136 \text{ km}$$

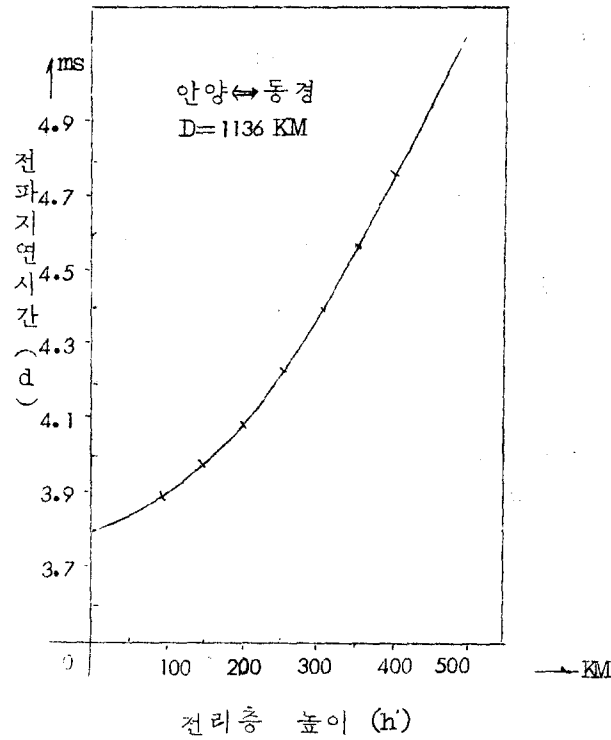
$$n_0 = r (1 - \cos \alpha/2) \approx 25.5 \text{ km}$$

$$e = r \sin \alpha/2 \approx 567.02 \text{ km}$$

(도표 1)

전리층의 높이 (h') < km >	전파지연 시간 (d) < ms >
0	3.786
50	3.816
100	3.874
150	3.959
200	4.071
250	4.205
300	4.361
350	4.536
400	4.729

(3)식에 의해서 안양 동경간에 있어서 h' 변동에 의한 전파지연 시간 d를 구해보면 (도표 1)과 같으며 이것을 그래프로 그리면



(제 2 도) 안양과 동경간의 $h'-d$ 곡선

(제 2 도)와 같다.

여기서 볼 수 있듯이 h' 가 높아짐에 따라 d 는 급격히 증가함을 알 수 있으며 만일 f 중이 200 km에서 400 km로 변화한다면 전파 지연시간의 변동치 Δd 는 658 μs 로 측정치에 큰 오차를 포함시킨다.

3. 시각차 (Time error)와 고화율 (Ageing rate)과의 관계

Ageing rate를 알고 있는 수정 발진기로 시각을 보지 (保持) 할 경우 이 time system은 일정한 교정에 의해서 규정된 오차 범위 이내로 유지되어야 한다.

그러므로 발진기의 고화율 (枯化率)을 미리 알고 있어야 하며 주파수가 시간에 따라 거의 직선적이 되도록 ageing rate는 거의 일정하여야 한다.

실제 문제에 있어 표준 전파와의 시각비교 측정치와 발진기 (X-talker)의 고화율과의 관계를 분석하여 규정된 오차범위 이내로 유지하기 위한 정기주파수 교정 기간을 수식적으로 구하여 보고자 한다.

지금 (제 3 도)에서와 같이 이상적인 경우를 생각하면 t 초후의 주파수 f_t 는 (4)식과 같이 시간이 함수로 나타낼 수 있다.

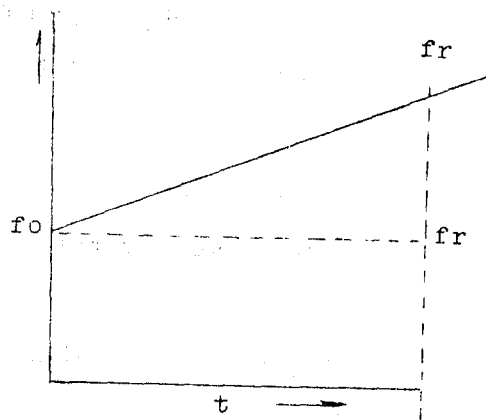
$$f_t = f_0 + af_r t \dots\dots\dots (4)$$

지금 f_t 는 f_r 에 비하여 약간 차가 있기 때문에 이 발진기에 의하여 동작하고 있는 시계는 빠르거나 혹은 느리게 될 것이다.

(제 3 도)의 경우에 있어서는 f_t 는 f_r 에 비하여 증가하고 있다. 즉 f_t 의 주기는 f_r 의 주기에 비하여 L 만큼 짧게 될 것이다.

$$L = \frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_t} \dots\dots\dots (5)$$

임의의 미소시간 Δt 를 잡으면 $f_t \cdot \Delta t$ 사이클이 된다.



f_t ; t 시간 후의 발진기 주파수

f_0 ; 초기 주파수 ($t=0$ 인 때)

f_r ; reference frequency

a ; ageing rate

(제 3 도) 시간에 대한 주파수변화

그러므로 Δt 시간 동안에 있어서의 시각 증분 (増分) ΔE 는 (6) 식과 같이된다.

$$\Delta E = \left(\frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_t} \right) f_{t0} \Delta t \dots\dots\dots (6)$$

극한치 (極限值) 를 취하면

$$dE = \left(\frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_t} \right) f_t dt = \left(\frac{f_t}{f_r} - 1 \right) dt \dots\dots\dots (7)$$

총 시간차 E를 얻기 위해서 (7)식을 적분하면

$$E = \int \frac{f_t}{f_r} dt - \int dt \dots\dots\dots (8)$$

여기서

$$f_t = f_0 + af_r t \text{ 이므로}$$

$$\begin{aligned} E &= \int \frac{f_0 + af_r t}{f_r} dt - \int dt \\ &= \int \frac{f_0}{f_r} dt + \int at dt - \int dt \\ &= \frac{f_0}{f_r} t + \frac{1}{2} at^2 - t + C \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

(9) 식에서 초기조건 $t = 0$ 인때 $C = E_0$ 를 대입하면

$$E = E_0 + \left(\frac{f_0}{f_r} - 1 \right) t + \frac{1}{2} at^2 \dots\dots\dots (10)$$

지금 (4)식과 (10)식을 그래프로 나타내면 (제4도)와 같다.

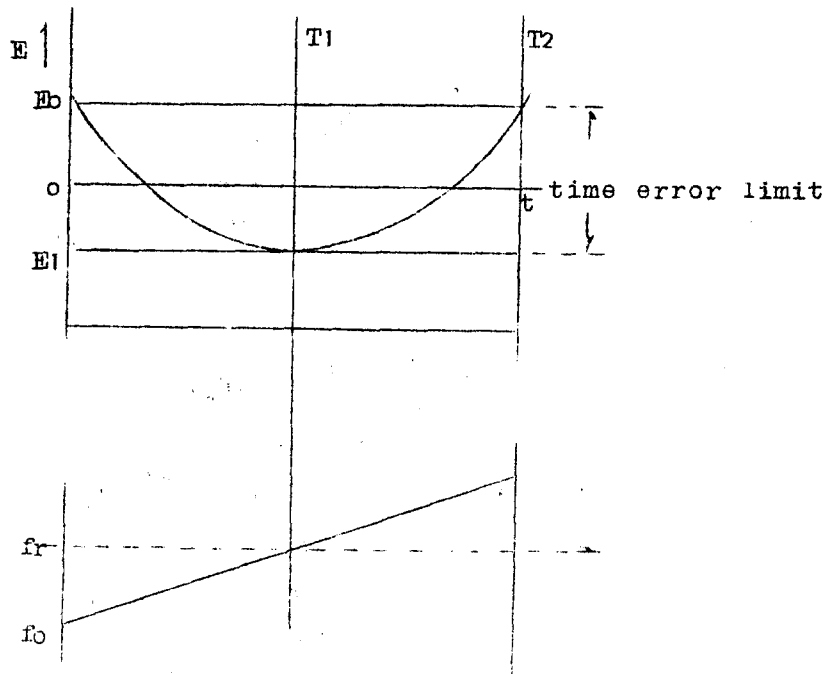
(10) 식에서

$$E = E_0 + \left(\frac{f_0}{f_r} - 1 \right) t + \frac{1}{2} at^2$$

$$t = t_1 \text{ 때 } E = E_1$$

$$E_1 = E_0 + \left(\frac{f_0}{f_r} - 1 \right) T_1 + \frac{1}{2} aT_1^2$$

그러나 여기서 $E_1 = E_0$ 이므로



제 4 도

$$-E_0 = E_0 + \left(\frac{f_0}{f_r} - 1 \right) T_1 + \frac{1}{2} a T_1^2$$

$$0 = 2E_0 + \left(\frac{f_0}{f_r} - 1 \right) T_1 + \frac{1}{2} a T_1^2 \dots\dots\dots (11)$$

(11) 식에는 f_0 와 T_1 의 두개의 미지수가 있으므로 이를 풀기 위하여 이를 미분하여 $\frac{dE}{dt} = 0$ 을 대입하면

$$\frac{dE}{dt} = 0 \quad (\text{Slope Zero})$$

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= \frac{f_o}{f_r} - 1 + \frac{a}{2} (2T_1) \\ &= \frac{f_o}{f_r} - 1 + aT_1 = 0\end{aligned}$$

$$aT_1 = 1 - \frac{f_o}{f_r}$$

$$\therefore \frac{f_o}{f_r} = 1 - aT_1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

(12) 식을 (11) 식에 대입하면

$$\begin{aligned}0 &= 2E_o + (1 - aT_1 - 1) T_1 + \frac{1}{2} aT_1^2 \\ &= 2E_o - \frac{aT_1^2}{2}\end{aligned}$$

$$T_1^2 = \frac{4E_o}{a}$$

$$T_1 = 2\sqrt{\frac{E_o}{a}}$$

이 쌍곡선은 T_1 에 대하여 대칭이므로

$$T_2 = 2T_1$$

$$\therefore T_2 = 4\sqrt{\frac{E_o}{a}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

그러므로 발전기의 ageing rate 를 알고 E_o 가 주어지면 규정

오차(時刻差) 이내로 주파수를 유지하기 위한 교정주기 T_2 는

(13) 식으로 구할 수 있다.

4. 일본 JJY 수신에 의한 상대적인 시각비교 측정

4.1 측정개요

현재 당 연구소에서 운용중인 X-tal의 표준원기의 확도 및 Ageing rate (Frequency drift rate)를 구하고 그 관리 방안을 모색하기 위해서 일본 JJY 단파 표준전파를 수신하여 비교측정을 하였다.

(a) 표준전파

표준전파는 안양에서 가장 근거리이고 양호하게 수신되는 일본 JJY 8 MHz를 택하였다. 낮에는 2.5 MHz와 5 MHz는 동일 주파수 내에서의 강한 BPV 혼신으로 측정할 수 없었다.

그러나 주간 8 MHz, 15 MHz 측정에 있어 전송곡선이 양측과 교차하기 때문에 fading이 심하고 주기성 잡음등이 심하여 비교정도(精度)가 불양함을 피할 수 없었다.

(b) 측정방식 선택

현재 당 연구소에서 행할 수 있는 비교측정방법은 아래와 같다.

(i) Digital Synchronometer에 의한 시각비교 측정

(ii) Microdial에 의한 비교측정

(iii) Beat 측정

상기 3가지 방법중 Beat 측정법은 fading, 혼신 및 전계강도의 변화등으로 Beat를 잡기가 극히 어려우며 Microdial에

의한 방법은 분해능이 5 ns 이고 동기시계축(同期時計軸)의 기계적인 점접(Microdial Contactor)을 사용하는 관계로 독취(読取) 정도(精度)가 매우 불량하였다.

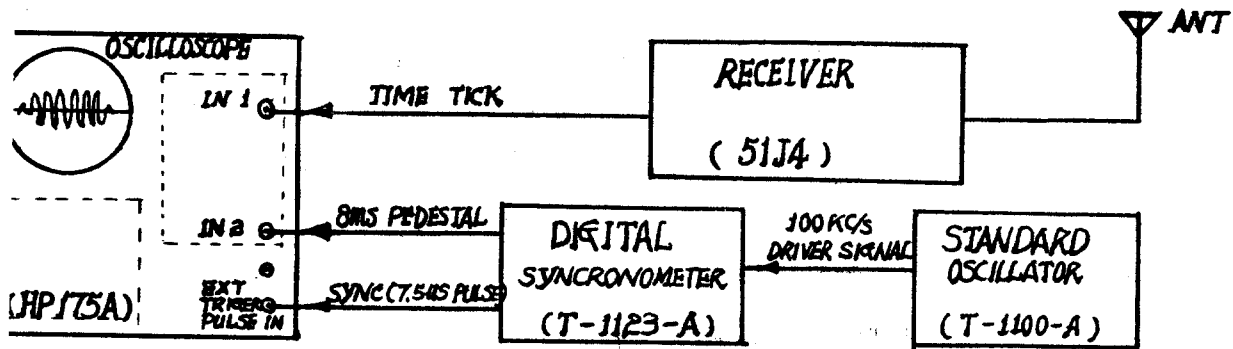
그러므로 본 측정 기간중에는 전리층 상태가 양호한 경우 독취 정도를 $\pm 40 \mu s$ 까지 올린 수 있고 측정이 간편한 T 1123A Digital Synchronometer에 의한 시각비교 측정방법을 택하였다.

4.2 측정장치의 구성 및 측정 원리

송신점	일본동경 소금정	$35^{\circ} 42' N$ $139^{\circ} 31' E$
수신점	안양 전파연구소	$37^{\circ} 23' 16'' N$ $126^{\circ} 57' 115'' E$
대원거리	1136 km	
주파수	J J Y (8 MHz, 15 MHz)	

측정장치의 구성은 (제 5 도)와 같다. 51 J 4로 수신한 J J Y의 time tick와 원기의 출력 주파수에 의해서 동작하는 Digital Synchronometer의 1 sec tick와의 상대적인 시각차를 거의 일정시각에 매일 측정하였다.

주파수 f는 시간 t를 기준단위인 유도단위이므로 아래 식과 같이 직접적인 정밀 시각비교는 고정도(高精度)의 주파수비교와



(제 5 도) 측정 장치의 구성도

밀접한 관계를 가지고 있다.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t}{t}$$

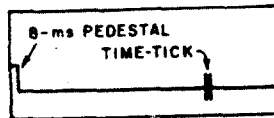
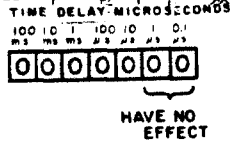
f : 발진기의 공칭주파수

Δf : 표준 주파수와 발진기의 공칭 주파수와의 차

t : 시각비교 측정간격

Δt : 처음과 그다음번 시 비교측정 사이의 time delay 차

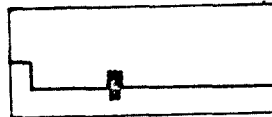
측정 방법은 제일처음 Scope 의 Sweep rate 를 100 ms/cm
 에 놓고 Digital Synchrometer 의 Time delay 를 Zero 에
 놓았을 때 (제 6 도) 의 a 와 같이 8 - ms PEDESTAL 과 수신된
 TIME - TICK 가 떨어져 있다고 하면 100 ms time delay 를



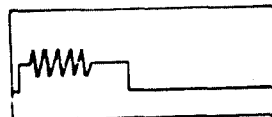
100 ms/cm
 (a)



100 ms/cm
 (b)



10 ms/cm
 (c)



2 ms/cm
 (d)



100 μ s/cm
 (e)

(제 6 도)

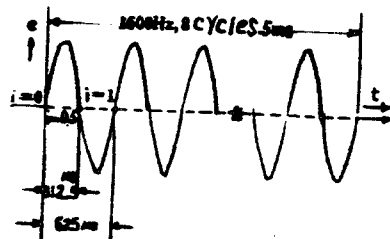
회전시켜 TIME TICK가 대략 b도와 같이 8 - ms PEDESTAL 근처에 오도록 한다.

이와 같이 점차 Scope의 Sweep rate를 증가시켜가면서 TIME DELAY를 조정하여 e도와 같이 TIME TICK(수신 표준전파)의 첫번째 Cycle이 8ms PEDESTAL 위에 오도록 한다.

이때 time delay의 최종치(6도의 경우는 7491900 ns)는 수신된 TIME TICK가 원기에 의한 1 SEC TICK보다 느린 시각량을 나타낸다.

그러므로 매일 매일의 time delay차를 구하여 $\Delta f/t$ 및 ageing rate 등을 구할 수 있다.

JJY TIME TICK는 (제7도)와 같이 1.6 KC, 8 Cycles의 5ms Pulse이다.



(제7도) JJY TIME TICK

실제 비교 측정점은 독취정도(読取精度)가 불양한 첫번째 cycle의 시작점(제7도의 $i=0$ 인 점)보다 반 cycle 후인 (312.5 ns 지연점) $i=0.5$ 점을 택하여 측정하였다.

4.3 원 기 (X-tal)의 정밀주파수 교정

(a) 예비측정

1차적으로 X-tal의 화도를 약 1주일간에 걸쳐 대략적으로 측정하였다. 측정 date는 (도표2)와 같다.

측정 기간중 1회 정전되어 일관성 있는 화도를 구할 수 없었으나 전파지연시간의 변동을 고려하지 않은 일본 JJY 8MHz와의 상대적인 주파수 변화율 $\Delta f/f$ 는 약 2×10^{-6} 이 됨을 알 수 있다.

이는 원기의 제위상에 나타난 10^{-8} 보다 두자리가 낮다.

측정전 원기의 진공관 점검 및 교체에 의하여 진공관 정수의 변화로 화로가 평형 상태에 이르지 못했기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 생각된다.

(b) 정밀주파수 교정

예비 측정결과에서와 같이 대략적인 화도는 2×10^{-6} 을 얻을 수 있었다.

이와 같이 주파수 편차가 심한 상태 하에서 계속 측정한다는 것은 무의미하므로 원기의 발진회로를 충분히 검토한 후에 정밀 교정을 행하였다.

이때는 원자주파수 표준원기가 도입전이므로 일본 표준전파를 수신하여 교정하였다.

구분 날자	시 간	수 신 표준전파	실내온도	Time Delay	측정시간격	Δt	Δt	비 고
3월 5일	10:15	JJY 8mc/B	19 °C	188ms				
6	10:15	"	16 °C	356"	24h	168 ms	1.95×10^{-6}	
7	10:15	"	15 °C	526"	24h	170 "	1.95×10^{-6}	
8	10:15	"	15 °C	696"	24h	170 "	1.95×10^{-6}	
9		"	정	전				정적으로 time delay에 조정
10	10:00	"	16 °C	30ms				
11	10:20	"	14 °C	202"	24h 20m	172ms	2.02×10^{-6}	
12	10:20	"	13 °C	377"	24h	175 "	2.025×10^{-6}	
평 균							1.98×10^{-6}	

(도 표 2)

교정기간 19 69. 3.17 ~ 3.22

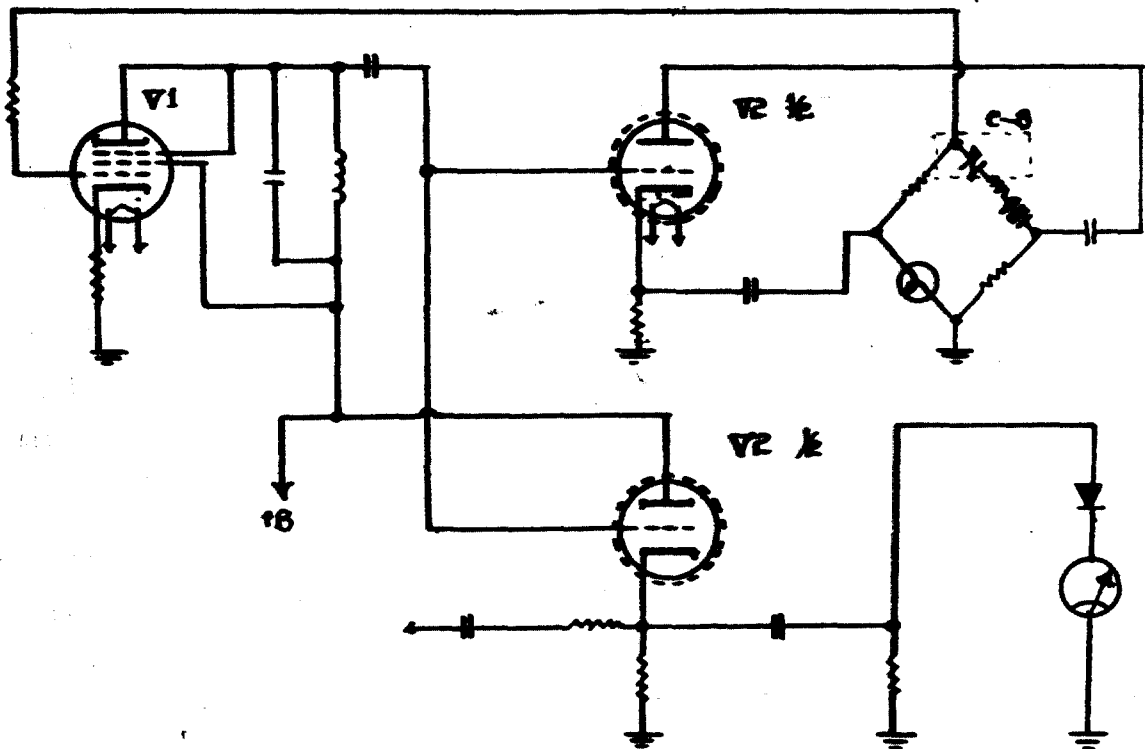
수신주파수 JJY 8MHZ

측정장소 정밀주파수 측정실

(제 8 도)는 X - tal의 발진기 회로도로써 주파수 교정용 가변 용량 " C - 8 "을 변화시켜 가면서 각각의 $\Delta f / f$ 를 구하였다.

" C - 8 " 가변 용량은 원기 뒷면에 1 ~ 100 까지의 dial 눈금으로 되어 있다.

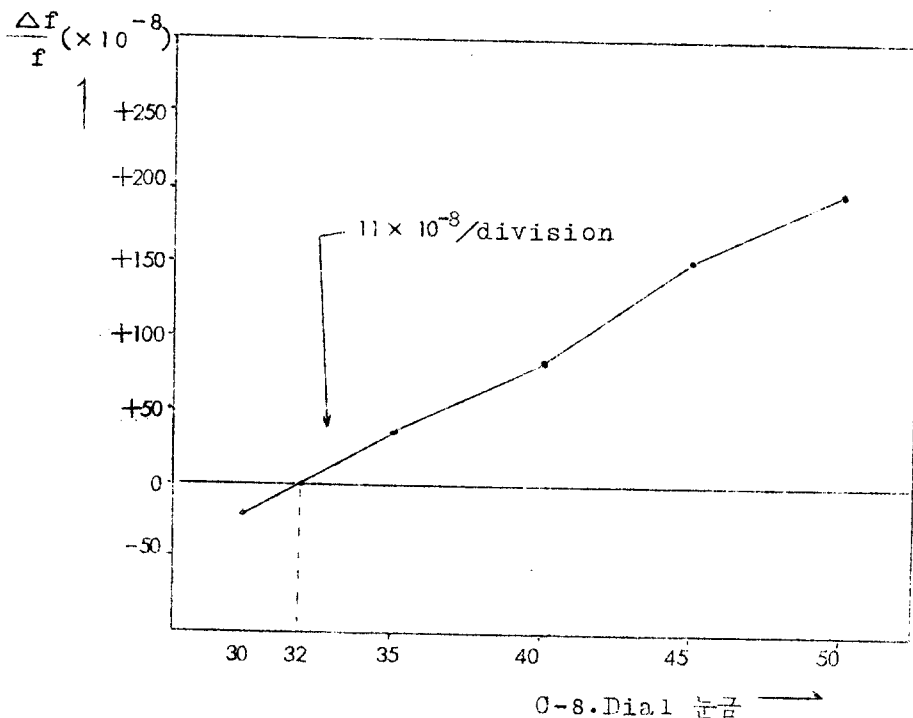
측정방법은 " C - 8 " dial 눈금을 교정한 후 24 시간 동안의 시각 변화율을 구하여 이 dial 눈금과의 상호관계를 구하여 보았다.



(제 8 도) X - tal의 발진회로도

예비 측정때의 dial 눈금은 50 이었고 이때의 $\Delta t/t$ 는 약 2×10^{-6} 이었으므로 5 단위씩 Dial 수자를 내려가면서 측정하여 가장 변화율이 적은 "C-8" dial 눈금치를 택하였다. 이때의 측정자료는 (도표 3)과 같으며 이것을 그래프로 나타내면 (제 9도)와 같다.

(제 9도)의 그래프에서 볼 수 있듯이 dial 눈금치와 $\Delta f/f$ 치는 거의 직선적으로 비례함을 알 수 있다. 눈금이 30 인 때는 $\Delta f/f$ 의 값이 (-)로 내려가 변환점을 이루었으므로 확도가 Zero 에 접근하는 눈금은 30 과 35 사이에 존재하게 되며 비례식을 적용하면 32라는 값이 나온다.



(제 9도) C-8 DIAL 눈금변화에 의한 $\frac{\Delta f}{f}$ 의 변화

구분 날자	시 간	TIME DELAY	측정간격 (t)	Δt	$\frac{\Delta t}{t}$	C - 8 DIAL 눈금	비 고
3월 17일	11:40	31 ms			198×10^{-8}	50	
" 18 "	9:40	150.8 "	22h	$+ 119.8 \text{ ms}$ 2	152×10^{-8}	45	
" 19 "	9:40	223 "	24h	$+ 72.2 "$	83.8×10^{-8}	40	
" 20 "	9:40	254.2 "	24h	$+ 31.2 "$	36.1×10^{-8}	35	
" 21 "	9:40	237.4 "	24h	$- 16.8$	-19.5×10^{-8}	30	
"		~ 3월 21 일	13:00정전 ~				정전으로 Time Delay 0에 동기
" 21 "	14:20	0					
" 22 "	9:40	2.6 ms	19h20m	2.6 ms	3.75×10^{-8}	32	

(도 표 3)

이 그래프에서의 기울기, 즉 dial 한눈썹당 $\Delta f/f$ 의 변동 값은 $11 \times 10^{-8}/\text{division}$ 으로 10^{-8} 까지 정밀 교정하기가 매우 어려움을 알 수 있다.

dial 눈썹을 30에서 32로 교정한 후 측정한 $\Delta f/f$ 의 값은 (4) 3.74×10^{-8} 으로 제워상에 나타난 10^{-8} 까지 교정 할 수 있었다.

4.4 비교측정 자료 및 분석

단파는 외계의 영향을 많이 받으므로 비교 측정시 오실로스코프에 나타나는 수신전파의 time tick를 잡음성분과 구별하기가 매우 힘들었으며 또한 수회의 정전으로 일관성 있는 장기 측정을 하지 못하였다.

그러나 무정전 상태에서 가장 측정기간이 길었던 3월 22일부터 4월 4일까지의 측정 data를 가지고 분석하여 보고자 한다.

(a) 측정 자료

기 간: 1969. 3.22 ~ 1969. 4. 4 (13일간)

장 소: 정밀 주파수 측정실

표준전파: 일본 JJY 8MHz

측정자료는 (도표 4)와 같다. 이 기간중 2회의 공휴와 1회의 수신상태 불량으로 총 3회 측정을 하지 못하였다.

(b) 자료 분석

JJY 8MHz, 수신 표준전파와의 상대적인 시각 변화율 $\Delta t/t (= \Delta f/f)$ 의 측정값을 그래프로 나타내면 (제10도)의 점선(点線)과 같이 된다.

이 그래프에서 볼 수 있듯이 $\Delta f/f$ 의 값은 불규칙하지만 대략적으로 날짜에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉 주파수 drift율은 (-)로 향하고 있다. 이 측정값을 통계적으로 분석하기 위해서 최소자승법칙을 사용 하였다.

X - tail의 원기의 고화율 (ageing rate)을 일정하다고 보고, 날짜를 독립변수 X_i 로 하고 매일 매일의 $\Delta f/f$ 값을 Y_i 로 취하면 우리가 구하고자 하는 $\Delta f/f$ 의 일변화 (日變化) 곡선은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Y = \alpha x + \beta \dots\dots\dots (1)$$

(여기서 α 는 $\frac{\Delta f}{f} \text{ day}$, 즉 ageing rate 임)

지금 측정한 도수분포 (X_i, Y_i)를 가지고 $Y = \alpha X + \beta$ 를 구하기 위해서

$$S = \sum_{i=1}^n \{ Y_i - (\alpha X_i + \beta)^2 \} \dots\dots\dots (2)$$

(2)식이 최소가 되는 α, β 를 정하면 된다. (여기서 S는 잔차 (殘差)라고함)

S를 최소로 하기 위해서는 S를 α 및 β 로 편미분한 $\partial S / \partial \alpha$, $\partial S / \partial \beta$ 가 각각 영이되는 α, β 의 값을 구하면 족하다.

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = -2 \sum_{i=1}^n \{ Y_i - (\alpha X_i + \beta) \} X_i = 0 \dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^n \{ Y_i - (\alpha X_i + \beta) \} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

JJY 8MHz

구분 날자	시 간	운 도	TIME DELAY (ms)	측정시간격	Δt (ms)	$\frac{\Delta t}{t}$	비 고
3월 22일	9:40	12 °	2.6ms				
" 23 "		~공 휴~					
" 24 "	13:30	17 °	12.3ms	51h50m	9.7	5.2×10^{-8}	
" 25 "	9:40	14 °	15.4 "	20h10m	3.1	4.28×10^{-8}	
" 26 "	9:40	16 °	19.1 "	24h	3.7	4.27×10^{-8}	
" 27 "	9:40	15 °	22.3 "	24h	3.2	3.7×10^{-8}	
" 28 "	9:40	15 °	25.1 "		2.8	3.24×10^{-8}	
" 29 "		~ Missed	~				수신상태불량으로 측정불
" 30 "		~ Missed	~ (공휴)				
" 31 "	9:40	17 °	35.1ms	72h	10.	3.85×10^{-8}	
4월 1 "	9:40	15 °	38 "	24h	2.9	3.36×10^{-8}	
" 2 "	9:40	16 °	41.2 "	24h	3.2	3.6×10^{-8}	
" 3 "	9:40	16 °	44.2 "	24h	3	3.48×10^{-8}	
" 4 "	9:40	16 °	47.3 "	24h	2.9	3.36×10^{-8}	

(도표 4) 측정자료 (X-tal) VS. JJY 8MHz

$$\therefore \begin{cases} \alpha (\sum x_i^2) + (\sum x_i) \beta = \sum x_i y_i \dots\dots\dots (5) \\ \alpha (\sum x_i) + n\beta = \sum y_i \dots\dots\dots (6) \end{cases}$$

이 (5) 식과 (6)식을 연립방정식으로 풀어 α, β 를 구하면 된다.

실제 측정값을 가지고 윗식에 의해서 구한 방정식은 다음과 같다.

$$Y = -0.15 \times 10^{-8} X + 4.675 \times 10^{-8}$$

이것을 그래프상에 나타내면 (제 10 도)의 실선(實線)과 같으며 α , 즉 평균 고화율은 $(-)$ $1.15 \times 10^{-9}/\text{day}$ 임을 알 수 있다.

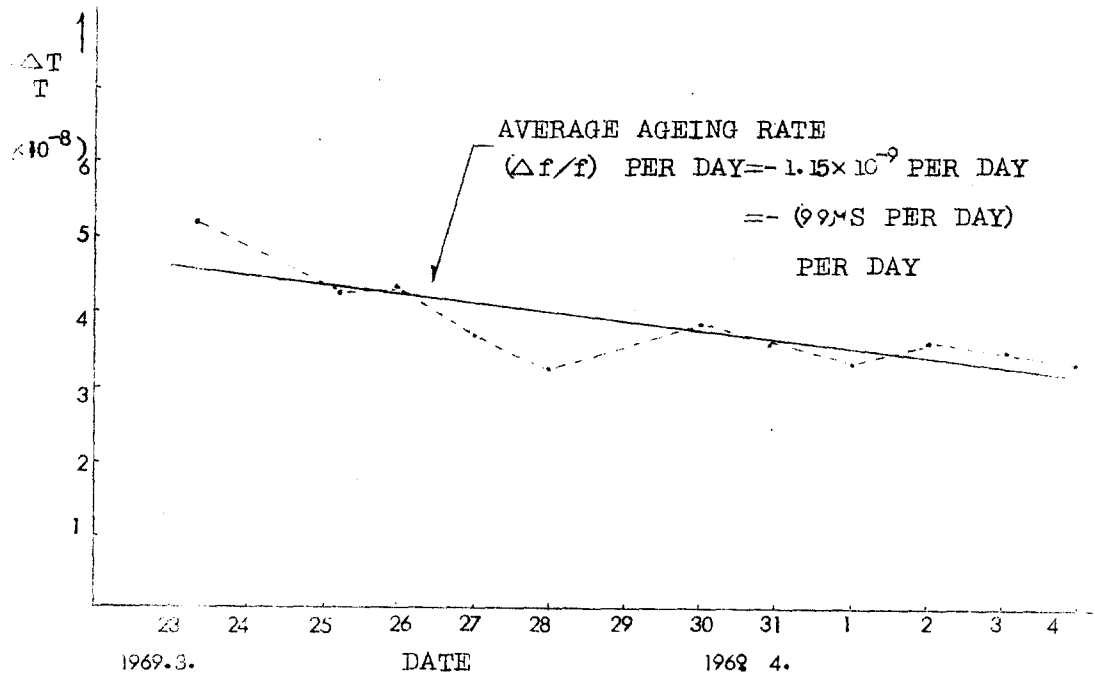
그러므로 X - tal의 확도를 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 이내로 유지하기 위한 주파수 교정주기는 약 80일이 된다.

원기의 정확한 고화특성을 알기 위해서는 적어도 40일간을 계속 측정하여야 하나 정전등 여러가지 조건때문에 13일간 밖에 계속 측정하지 못하였으므로 오차가 다소 포함되었으리라 생각 된다. 13일간의 평균 $\Delta f/f$ 의 값은 약 $+4 \times 10^{-8}$ 으로 원기의 제원상에 나타난 10^{-8} 내에서 동작하고 있다.

(C) 전리층의 영향

단파를 수신하여 비교측정을 하여오고 있으므로 전리층 상태에 따라서 비교측정값에 가장 큰 영향을 미치고 있다.

즉 전리층 높이의 변동 및 E, F 양층반사에 의한 fading 등에



(제 10.5) JJY (8MHZ) 와의 상대적인 원기의 평균 고화율

의하여 큰 주파수 편차를 일으키게 된다. 또한 주기성잡음, WWVH 및 BPV의 동일 주파수 내에서의 강한 혼신등으로 인하여 독취정도(読取精度)의 불량등도 측정값에 큰 영향을 미쳤다.

실제 전리층의 변화상태를 분석하기 위해서는 안양과 동경의 중간지점(1회 반사파로 가정)에 있어서의 전리층 높이의 관측, 전리층에 대하여 영향을 받게 받는 VLF 수신기 및 1차 표준기인 원자주파수 표준원기등에 의하여 비로서 가능하나 현재는 이러한

시설이 없으므로 표준전파의 전파(伝搬) Mode 나 전파지연시간의 측정 및 계산등은 할 수가 없고 주로 타국의 자료집 및 연구보고서등을 참조하여 대략적인 오차범위를 구하여 보고자 한다. 전리층은 계절, 시간에 따라 수시로 변화하나 이상(異常)현상이 발생하지 않는한 f층의 높이는 대략 200 ~ 300 km 사이에서 변화하고 있음을 당 연구소의 전리층 관측자료나 타국의 자료에 의해서도 알 수 있다.

(제 11 도)는 일본 산천(YAMAGUCHI)에서의 1968 년 10 월 한달 동안의 전리층 관측자료의 평균치 이다. 여기서도 볼 수 있듯이 f 층의 평균 일변화는 250 km 를 기준으로 하여 ± 50 km 임을 알 수 있다.

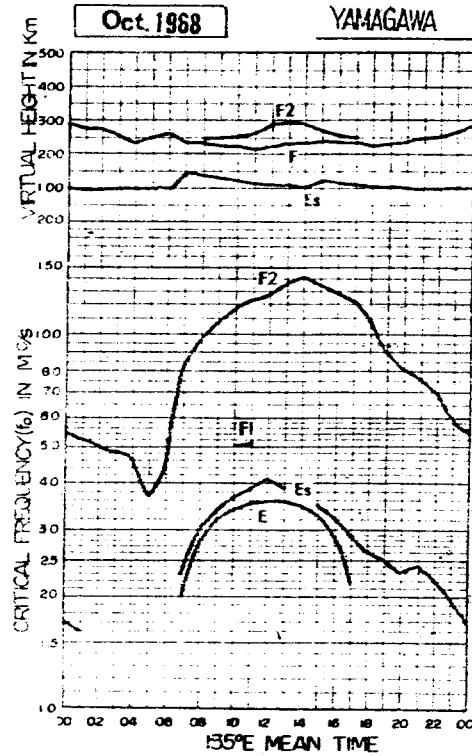
안양과 동경간에 있어 F층을 1 회 반사하여 도달한다고 가정하고 전리층의 높이가 200 ~ 300 km 이내에서 변화한다면 전파지연시간의 변동치를 (도표 1)에서 구하던

$$\Delta d = 4361 - 4071 = 290 \text{ ns}$$

가 된다.

실제 비교측정을 할때 전리층상태가 양호한 경우 분해능이 약 40 ns 이내 이나 주기성(周期性)잡음, Fading 및 혼선이 심할 때는 분해능이 약 200 ns 까지 떨어지게 되므로 총 절대오차 값은 약 500 ns 가 된다.

그러므로 매일 매일의 시각 변화량 Δt 의 값에 ± 500 ns 의 오차를 포함하게 되므로 측정간격 t 를 24 시간으로 하면



(제 11 도) 일본 산천에서의 관측자료

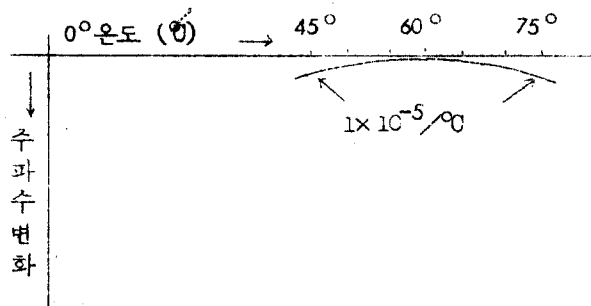
$\Delta t / t$ 의 오차 한계 R은 약 $\pm 0.6 \times 10^{-8}$ 이 된다.

이와 같이 비교측정값에 $\pm 0.6 \times 10^{-8}$ 의 오차를 포함하게 되므로 장기측정에 의하지 않고는 정밀한 원기의 ageing rate를 구할 수 없으며 측정기간이 짧을 수록 큰 오차를 포함하게 될 것을 알 수 있다.

4.5 온도 및 전원변동에 의한 영향

(a) 주위 온도에 의한 영향

수정발진자는 온도에 대하여 주파수 온도 특성이 매우 예민하며 (제 12 도)는 계원상에 나타난 원기의 주파수-온도 특성으로 주파수-온도계수는 $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 로 나타나 있다.



(제 12 도) X-tal의 주파수-온도 특성

원기실내의 온도변화를 보면 겨울철에는 일변화가 최대 20°C 여름철에는 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ 로 큰 온도 일변화를 나타내고 있으며 계절적으로는 약 30°C 의 온도변화를 나타나게 된다.

X-tal 이 비록 항온조에 들어 있으나 주위온도 변화에 따라

항온조 내부의 온도에 영향을 미치리라 생각된다. 최근 생산되고 있는 정밀 수정발진기는 거의가 2중 항온조에 장치되어 있으나 T-1100 A X-tal 타입은 단일 항온조내에 들어 있으므로 더욱 실내온도 변화에 큰 영향을 미치리라 생각되며 원기실내의 자동온도 조절장치가 필요하다.

(b) 전원전압에 의한 영향

제원상에 나타난 원기의 전압변동에 대한 주파수 특성은 선전압 10% 변화당 2×10^{-8} 으로 나타나 있다.

현재 원기실내에는 자동전압조절장치가 설치되어 있기 때문에 교류를 사용할 경우 전압변동은 거의 없으며 정전때 직류 32V를 사용할 경우 큰 문제점을 야기시키고 있다.

지금까지의 통계를 보면 안양에 있어서 월평균 약 4회의 정전이 일어나며 이때는 직류예비전원으로 동작하게 되나 Battery의 용량 부족으로 약 1시간밖에 사용할 수 없으므로 1시간 이상 정전시는 정지하게 되므로 항온조의 가열시간 등으로 인하여 큰 주파수 편차를 일으킨다.

또한 정전시 바로 직류로 절체되어 동작한다 하더라도 직류전압 강하가 심하여 30분 후에는 24V까지 떨어지며 따라서 INVERTOR에서 나오는 교류전압도 약 80 ~ 90V까지 내려간다.

그러므로 무정전 상태로 계속 동작시키기 위해서는 부동방식에 의한 계속적인 직류공급장치가 필요하다고 생각된다.

5. 원자표준에 의한 직접 비교측정

당 연구소에는 금년말(1969.10) 확도 및 안정도가 각각 $\pm 1 \times 10^{-11}$ 인 HP 5061 A 세슘·빔 원자주파수 표준원기가 도입되어 지금 성능 및 재특성을 파악중이다.

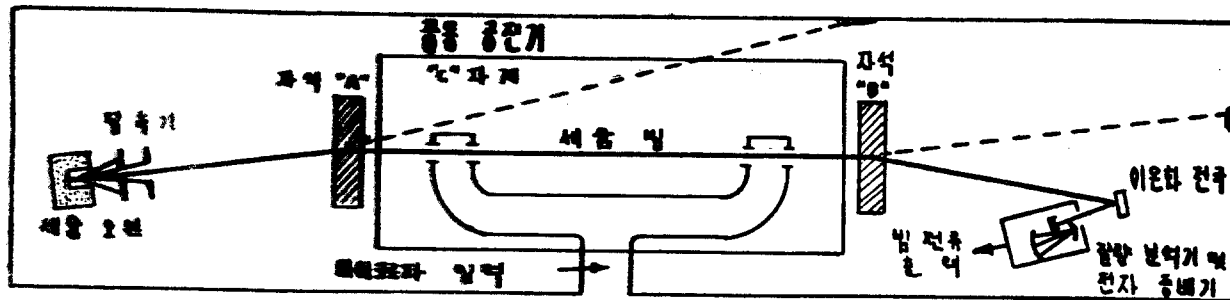
본장에서는 세슘·빔 원기의 원리를 간단히 설명하고, X-tal¹⁾의 직접위상비교측정을 하여 지금까지 일본 표준전파 JJY와의 비교 측정결과 얻었던 X-tal¹⁾의 확도를 확인하여 보았다.

5.1 세슘·빔 원자주파수 표준원기

1967년 10월 불리서 파리에서 개최된 제 13차 국제도량형 총회에서 "주파수" 또는 "시"의 세도를 말위도써 세슘 원자의 양자역학적 진동을 사용하는 것이 정식 채택된 이상 엄밀한 의미에서의 1차 표준기는 세슘 원자주파수 표준기이다.

다른 원자 표준기에 의해서도 보다 양호한 정도(精度)가 기대되는 것도 있지만 그것은 정식의 1차 표준기는 아니다. 그러므로 세슘 원자표준기는 앞으로도 계속 연구 개량될 것으로 보이며, 이하의 현재 실용화되고 있는 세슘원기의 원리를 설명하고자 한다.

(제 13 도)는 이 표준기의 구성도로서 수정발진기의 주파수를 채배하여서 만든 마이크로파 전자계의 주파수가 세슘 133의 미세천이 주파수(Hyperfine transition frequency) 9.192GHz에 가까우면 마이크로파 신호는 한 미세에너지 상태에서 다른



(제 13 도) Cs Beam 원자주파수표준의 구성도

에너지 상태로 전이 시킨다.

지금 가해준 마이크로파의 주파수가 Cs 원자의 진동주파수와 정확히 일치하면 검출기의 출력은 영(零)이 되지만 주파수 편차가 생기면 이에 비례하는 성분이 검출기로 부터 나오며 이 성분은 수정발진기의 주파수를 자동제어하는데 사용된다.

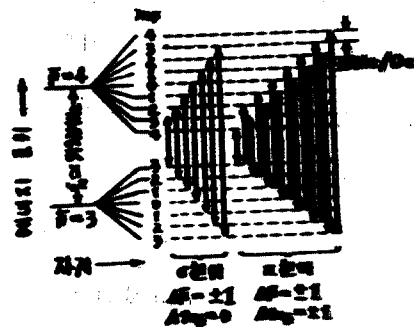
즉 Cs 원자의 진동수를 기준으로 하여 수정발진기의 주파수를 자동적으로 제어하는 방식이다.

우리들이 알고 있는 바와 같이, 특히 안정도에 주의를 기울이고

있는 소위 고안정 수정발진기는 단기간에 있어서는 10-11의 높은 주파수 안정도가 기대될 만큼 발달하여, 이 자체로써 주파수 실용표준으로써 사용되고 있지만 장기간의 주파수 안정도, 즉 경년 변화(經年變化)에 관하여서는 아직 만족할만한 값에 달하지 못하고 있다.

이 결점을 보충하기 위해서 영구 불변의 원자진동을 기준으로 하여 수정발진기의 경년변화를 자동적으로 보상하는 방법이 고안되었으며 이것이 곧 세슘 원자표준이라 보아도 좋다.

앞에서 말한 세슘 원자와 약 9 GHz의 마이크로파와의 관계는 (제 14도)의 세슘 원자의 에너지 준위도(準位圖)에 의해서 이해 할 수 있다.



(제 14 도) Cs 원자의 에너지 준위도

세슘 원자의 전자 Spin 은 $J = 1/2$, 핵 Spin 은 $I = 7/2$ 이므로 이 원자는 기저상태 (基低狀態)로서 $F = I \pm J$, 즉 $F = 4$, $F = 3$ 의 두개의 준위로써 분리되고 있다.

여기에 자계를 가하면 Zeeman 분리를 이르게, 이들은 자기양자수 (磁氣量子數) m_F 로 표시되는 9 및 7개의 준위로 분리된다. 여기에서 준위간 천이 (遷移)가 허락될 수 있는 것은 π 천이와 π 천이가 있지만 우리들이 주파수 표준을 위해서 이용하는 것은 π 천이중의 (F, m_F) 가 $(4, 0) \leftrightarrow (3, 0)$ 의 경우이다.

(제 13 도)와 같이 밀도 200 개/cm³ 나운 세슘원자의 빔은 매우 불균일한 자계를 가진 제 1 편향자석 "A"를 통과하며 여기서 강한 선별작용을 받는다.

자석 "A"를 통과한 Beam 은 일정한 거리 (수 10 cm) 떨어져 있는 두개의 공동 공진기를 통과하며 이때 가해진 마이크로파의 자계가 9.192 GHz 에 가까우면 $(4, 0) \leftrightarrow (3, 0)$ 준위간에 강한 천이를 이룬다.

이와 같이 두개의 공동 공진기를 통과한 원자, 빔은 제 2 편향자석을 통과하며 천이된 원자는 제 1 편향자와의 반대방향으로 편향되어 검출기에 집속된다.

이때 천이되지 않은 원자는 제 1 편향자석과 같은 방향으로 편향되어 검출되지 못한다.

검출기는 이온화전극 (Hot wire ionizer)으로 구성되어 있으며 여기에 부딪치는 원자를 이온화 시킨다. 이온화된 원자는 질

량분석기 (Mass Spectrometer)에서 속도분포를 제어 받은후
(헬타작용) 전자증배관 (Electron multiplier)에서 전류 증폭
된 후 출력으로써 얻을 수 있다.

이때 가해진 마이크로파가 세시움원자의 미세천이 주파수와 일치
하면 빔 전류는 최대치가 된다.

이 세시움 원자의 안정도와 깊은 관계를 가지고 있는 공진곡선
의 반치폭 (半值幅) Δf 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta f = 0.65 \alpha / L$$

여기서 α 는 Cs 원자빔의 최확치 (最確值) 속도, L 은 양 공동
공진기의 중심 간격이다. HP 5061 A에 있어서 Δf 는 약
550 HZ이며 공진곡선의 첨예도를 나타내는 Q는 1×10^{-8} 이상이
므로 수정 발진기의 최고기록치 보다 1단위가 높다.

5.2 X-tal #1과 CS #1의 비교측정

측정기간 ; 1969년 12월 4일 11시 ~ 5일 17시 (30시간)

표준원기

원기명 ; 5061 A 세시움 원자주파수 표준원기

확도 ; $\pm 1 \times 10^{-11}$

안정도 ; $\pm 1 \times 10^{-11}$

고화율 ; 없음

시제 (時系) ; UTC (-300×10^{-10})

씨 측정원기

원 기 명 ; T - 1100A 수정발진기형 표준원기

공칭 확도 ; $\pm 5 \times 10^{-8}$

고 화 율 ; $\pm 1 \times 10^{-9} / \text{day}$

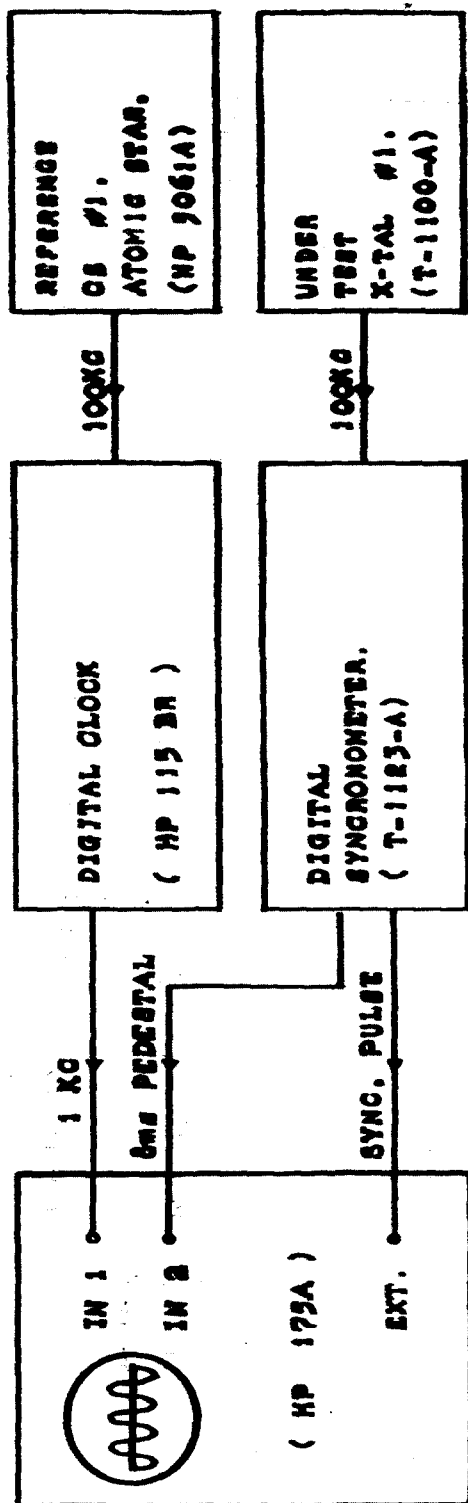
측정장치의 구성은 (제 15 도)와 같으며 측정방법은 4 - 2 절과 비슷하다. 즉 오실로스코프의 INPUT 1 에 JJY 표준전파대신 세시움빔 원기로 부터 나오는 1 KHZ 를 가하여 상대적인 위상비교 측정을 하였다.

외계의 영향을 받지않으므로 단파에 의한 비교측정때 보다 더 정밀하게 그리고 단기간내에 비교할 수 있었다. 측정간격은 1 시간으로 하여 총 30 시간 측정하였으며 이때 온도도 동시에 기록하였다.

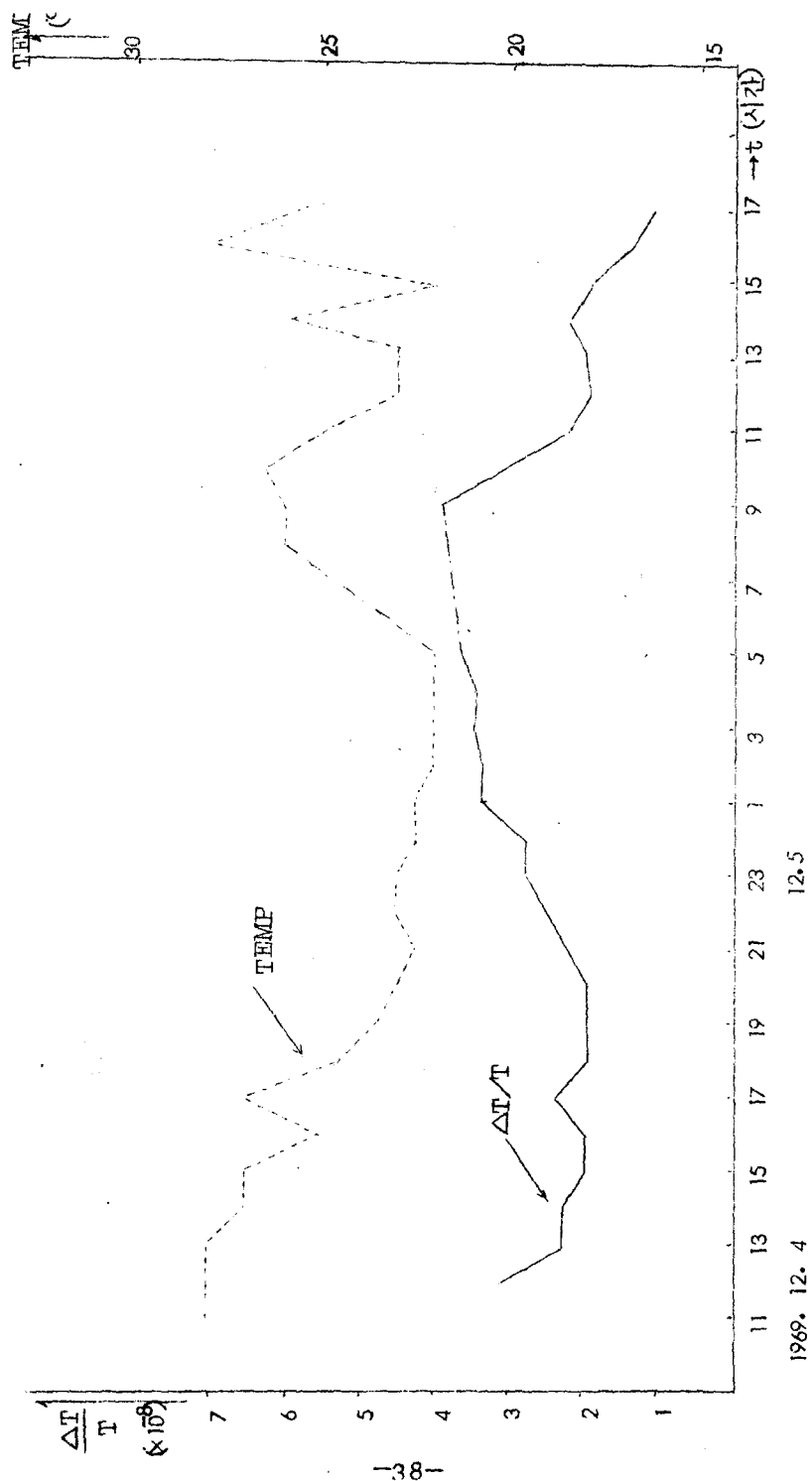
측정자료는 (도표 4)와 같으며 이것을 그래프로 나타내면 (제 16 도)와 같다. 이 그래프에서 볼 수 있듯이 X - tal #1 의 단기 안정도는 매우 불량하여 30 시간 동안에 총 3×10^{-8} 의 변화폭을 가지고 있으며 주간 및 야간에 있어 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

즉 실내온도가 내려감에 따라 약 3 ~ 4 시간 후에 X - tal #1 에 영향을 미쳐 $\Delta T / T$ 의 값이 (+)로 증가하며 온도가 거의 일정하면 안정도도 양호하게 됨을 볼 수 있다.

온도변화가 적은 12 월 4 일의 주간에 있어서 평균확도는



(제 15 도) 측정장치의 구성



날 자	시 간 (hour)	온 도 (°C)	TIME DELAY (μ S)	ΔT (μ S)	T (minute)	$\Delta T/T$
12월 4일	11시	28 °C	1790 μ S			
"	12 "	28 "	1900 "	110 μ S	60 분	3.06×10^{-8}
"	13 "	28 "	1980 "	80 "	"	2.22×10^{-8}
"	14 "	27 "	2060 "	80 "	"	2.22×10^{-8}
"	15 "	27 "	2130 "	70 "	"	1.94×10^{-8}
"	16 "	25 "	2200 "	70 "	"	1.94×10^{-8}
"	17 "	27 "	2280 "	85 "	"	2.36×10^{-8}
"	18 "	24.5 "	2350 "	70 "	"	1.94×10^{-8}
"	19 "	23.5 "	2420 "	70 "	"	1.94×10^{-8}
"	20 "	20 "	2490 "	70 "	"	1.94×10^{-8}
"	21 "	22.5 "	2570 "	80 "	"	2.22×10^{-8}
"	22 "	23 "	2660 "	90 "	"	2.50×10^{-8}
"	23 "	23 "	2760 "	100 "	"	2.78×10^{-8}
"	24 "	22.5 "	2860 "	100 "	"	2.78×10^{-8}
12월 5일	01 "	22.5 "	2980 "	120 "	"	3.33×10^{-8}
"	02 "	22 "	3100 "	120 "	"	3.33×10^{-8}
"	03 "	22 "	3225 "	125 "	"	3.47×10^{-8}
"	04 "	22 "	3350 "	125 "	"	3.47×10^{-8}
"	05 "	22 "	3470 "	130 "	"	3.61×10^{-8}
"	08 "	26 "	3910 "			

날 자	시 간 (hour)	온 도 ($^{\circ}\text{C}$)	TIME DELAY (μS)	ΔT (μS)	T (minute)	$\Delta T/T$
12월 5일	09 시	26 $^{\circ}\text{C}$	4050 μS	140 μS	60 분	3.89×10^{-8}
"	10 "	26.5 "	4160 "	110 "	60 "	3.06×10^{-8}
"	11 "	25 "	4240 "	80 "	60 "	2.22×10^{-8}
"	12 "	23 "	4310 "	70 "	60 "	1.94×10^{-8}
"	13:15	23 "	4400 "	90 "	75 "	2.00×10^{-8}
"	14 시	26 "	4460 "	60 "	45 "	2.22×10^{-8}
"	15 "	22 "	4530 "	70 "	60 "	1.94×10^{-8}
"	16 "	28 "	4580 "	50 "	60 "	1.39×10^{-8}
"	17 "	25.5 "	4620 "	40 "	60 "	1.11×10^{-8}

($\pm 2 \times 10^{-8}$ 으로 안정도가 양호하게 나타났으며 야간에 있어서도

12월 5일 01시부터 09시까지는 평균 ($\pm 3.5 \times 10^{-8}$ 으로 안정함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 보면 실내온도가 $3 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 변화함에 따라

$\Delta T/T$ 의 값은 약 1.5×10^{-8} 의 변화폭을 가지고 있으며

X-tal #1의 온도에 대한 안정도가 매우 불량함을 알 수 있다.

또한 12월 4일 11시부터 5일 11시까지 24시간 동안의 평

균 확도는 ($\pm 2.8 \times 10^{-8}$ 으로 JJY에 의한 비교 측정값과 어느

정도 일치한다.

6. 결 론

X-tal 1 (T - 1100 - A) 수정발진자형 주파수 표준원기의 제특성을 파악하기 위해서 지금까지 일본의 표준전파를 수신하여 계속 비교측정을 하여 왔다.

잡음, 정전파 fading, 잡음, 혼신등으로 인한 비교측정의 곤란등으로 소기의 신뢰할만한 결과는 얻지 못하였다. 그러나 세시움, 빔 원자 주파수 표준원기의 도입으로 단기(30시간)간에 걸쳐 측정한 결과 단파대의 측정값과 거의 일치하는 10^{-8} 이내의 확도로 동작하고 있었으며 주파수-온도특성이 불량함을 알 수 있었다. 이상의 측정결과를 요약하면 아래와 같다.

(a) 표준단파와의 비교측정 결과

(1) 표준단파 수신에 의한 X-tal 1의 정밀 주파수 교정은 약 1주일이 요하며 대략 10^{-8} 정도로 교정할 수 있으나 원기의 주파수 교정용 다이알을 조정할 때 한눈썹당 약 11×10^{-8} 으로 변화하므로 희망하는 $\Delta f / f$ 값으로 정확히 조조정하기는 극히 어렵다.

(2) 비교측정 때의 총 오차한계(전리층의 영향 및 판독오차)는 $\pm 0.6 \times 10^{-8}$ 으로 3월 22일부터 4월 4일까지의 평균 확도는 $(4 \pm 0.6) \times 10^{-8}$ 이며 대략적인 평균고화율(Average Ageing Rate)은 $(-11.15 \times 10^{-9} / \text{day})$ 이었다.

(3) 원기의 확도를 $(\pm) 5 \times 10^{-8}$ 이내로 유지하기 위한 주파수

교정주기는 대략 80 일 이다.

- (4) 안양과 동정간의 대원거리는 약 1136 km 로 주간에 있어 표준단파의 통로는 1 회 반사파로 생각되며 F층이 $200 \sim 300 \text{ km}$ 내에서 변화한다면 전파지연시간의 상대적인 변동치는 $290 \mu\text{s}$ 가 된다.

(b) OS#1 과의 직접 비교측정 결과

- (1) 24 시간 동안의 평균 확도는 $(+3.5 \times 10^{-8})$ 으로 단파매의 측정결과와 거의 일치함을 확인 할 수 있었다.

- (2) X-tal#1 은 주파수-온도 특성이 매우 불량하여, 주간에 있어 평균확도는 $(+2 \times 10^{-8})$ 에 반하여 야간에는 $(+3.5 \times 10^{-8})$ 으로 나타났다. 즉 실내온도가 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ 변화함에 따라 $\Delta f / f$ 의 값은 약 1.5×10^{-8} 의 변화폭을 가지고 있었다.

이상의 결과로 부터 보면 X-tal#1 의 확도를 작년도의 10^{-7} 보다 한단위가 높은 10^{-8} 으로 유지 할 수 있었으며 원기를 계속 안정하게 운용하기 위해서는 실내의 자동온도 조절장치 및 예비 전원의 확충이 시급하다고 하겠다.

앞으로 계속 OS#1 과의 정밀 비교 측정에 의해서 보다 정밀하게 X-tal#1 의 제특성을 파악코자 한다.

참 고 서 적

- (1) Frequency and Time Standards. HP application Note 52.
- (2) Atomic Standards of Frequency and Time. The Physics Teacher, September 1966.
- (3) 最近の 周波数標準. 電気学会雑誌 第87巻 第966号)
- (4) JJY によつて 国内時刻同期精度(遠距離)について. 日本電波研究季報 Vol 14, No 72.
- (5) 電離層 伝はん波の 周波数 変動に関する一實驗結果. 日本電波研究季報 Vol 8. No 34.
- (6) 無線工學 ハンドブック
- (7) 電子周波数 標準と秒の再定義. 応用物理 第36巻 第10号
(1967)
- (8) 時の科學. コロナ社