

## 研 究

UDC 621.3.018.41.089.68/621.396.91

## VLF 3 周波による時刻同期実験 (I)

加藤清治\* 安田嘉之\* 東吉夫\*\*\* 岡沢治夫\*

中島政雄\*\* 高野栄太郎\*\* 斎藤義信\*\*

(昭和 45. 11. 27 受理)

## EXPERIMENTS ON THE TIME SYNCHRONIZATION ON THREE VLF's (I)

By

Seiji KATO, Yoshiyuki YASUDA, Yoshio AZUMA, Haruo OKAZAWA

Masao NAKAJIMA, Eitaro TAKANO, and Yoshinobu SAITO

Preliminary experiment on the time synchronization by VLF was made to verify the possibility of the proposed system with three carriers on 20 kHz, 20.080 kHz and 20.081 kHz as high precision. Beat frequencies of 80 Hz and 1 Hz are used for resolving the carrier period ambiguities of some integral multiples of 50  $\mu$ s. A pair of carriers, 20 kHz and 20.081 kHz, and the remaining carrier of 20.080 kHz are alternately transmitted for 0.5 s' duration. They are separated in a receiver by a switch synchronized with the transmitted waves and then converted to respective continuous waves by servomechanism. The short-term stability of positive-going zerocross points of the beat signals of 80 Hz and 1 Hz shows that the system is capable of resolving the carrier period ambiguities and hence of obtaining the time signals of about 10  $\mu$ s precision, though the experiment was made in good condition of CN ratio and the examination of the effect of propagation and so on remains to be carried out.

## 1. ま え が き

従来、高精度周波数の較正、時刻信号の同期には一般に短波標準電波 JJY が利用されている。短波標準電波の送信源においては周波数および時間間隔 ( $n$  秒) はオフセット値に対してそれぞれ  $\pm 1 \times 10^{-10}$  および  $\pm n \times 10^{-10} s \pm 1 \mu s$  以内に維持されているが、これが受信されたときの短波標準電波は電波伝搬路の変動のためあって、おおよそ周波数で  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  程度、時刻信号で 1 ms 程度の同期精度しか期待できない。また受信周

波数、時刻、場所などを特に設定し、E 層伝搬だけの利用に限っても時刻同期精度は数十  $\mu s$  程度<sup>(1)</sup>であった。

一方長波帯の標準電波として 40 kHz による送信が開始されて以来、国内における周波数較正の高精度化が実現し、昼間数時間の平均で  $10^{-11} \sim 10^{-10}$  の周波数比較校正ができるようになった。また時刻信号の伝送は搬送波をオンオフする方法で現在行なわれているが、長波帯では送信アンテナ系の帯域幅が狭く急峻な立上りの時刻信号を得ることが困難なため同期精度は 0.5 ms 程度<sup>(2)</sup>である。このような狭帯域の制約のもとで、長波または超長波帯電波の安定な伝搬特性を利用し、 $\mu s$  程度の時刻同期が期待できる方式として相互に周波数の近接した

\* 周波数標準部周波数標準値研究室    \*\* 同部標準電波課    \*\*\* 宇宙開発事業団

複数搬送波による方式が提案され<sup>(3)(4)</sup>、主として米国における実験では2周波方式<sup>(5)(6)</sup>(たとえば20 kHzと19.9 kHzを10秒交互に発射する方式)が行なわれ、その後3周波切換方式となつて、現在WWVL局から19.9, 20および20.9 kHzを順次10秒間ずつ発射する方式が実施されている。

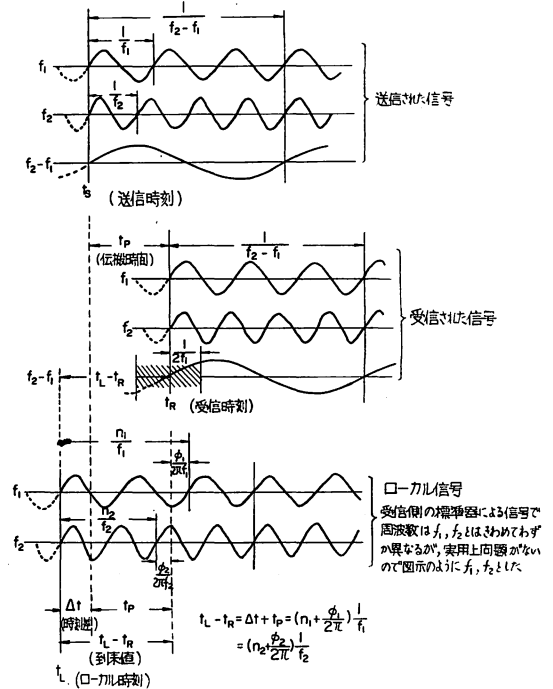
今回当所で実験された方式は20, 20.080および20.081 kHzの3周波切換方式であるが、その特徴は(1)1sおよび12.5 msの時刻信号が得られること(米国の方式では10 msおよび1 ms)、(2)適当な送・受信方法により低速度の電信業務にもほとんど支障なく適用できることである<sup>(7)</sup>。たとえば20 kHzと20.081 kHzをマーク時に、20.080 kHzをスペース時にマーク時よりも低レベルで発射し、受信機で20 kHzだけを選択する。

この方法では20 kHzと他の周波数との差周波数80 Hzおよび1 Hzをゲートとし、受信20 kHz信号に含まれる高精度の時刻信号をとり出すものである。実用化の過程として、(1)この方式の可能性を得るためには、ゲートとする差周波数信号の安定性を中心に検討し、このほか(2)機器の改善、(3)伝搬の影響などを考慮して今後の実用化対策を進めなければならない。

今回は(1)について一応の成果を得たので実験の方法、結果について報告することにする。

### 2. 複数搬送周波数による時刻同期方法の原理

まず、二つの搬送周波数による方法を第1図に示す。長波および超長波標準電波の受信位相の安定度がきわめて高いことは周知のとおりであるが、これを時刻比較に用いようとする場合、単一の搬送周波数 $f_1$ だけを用いたのでは受信機で測定されるのは図示のように受信された信号とローカル信号の位相差 $\phi_1$ に対応する時刻差 $\phi_1/2\pi f_1$ だけであり、ローカル時刻 $t_L$ と受信時刻 $t_R$ の差、すなわち到来値 $t_L - t_R$ はわからない。これを知るために $f_1$ に近接した搬送波 $f_2$ を用い、 $f_1$ および $f_2$ の正方向ゼロ交差点を送信時刻 $t_S$ に一致させる。また $f_1, f_2$ の合成波のエンベロープに対応する差周波数 $f_1 - f_2$ の正弦波信号についても同様であると仮定する。すなわち $t_S$ に関する情報はこの $f_2 - f_1$ が運ぶわけである。伝搬の際、位相速度の周波数特性が無視できると仮定すれば受信された $f_1, f_2$ および $f_2 - f_1$ の位相関係は送信時と同じである。したがってローカル時刻 $t_L$ と受信された $f_2 - f_1$ の正方向ゼロ交差点(すなわち $t_R$ )との時刻差を測定すれば $t_L - t_R$ を知ることができる。 $t_L - t_R$ の測定値における変動は3.5に述べる



第1図 2周波数による時刻決定方法の原理

ように $f_1$ および $f_2$ 自身の位相変動よりもはるかに大きい、適当回数の測定により求めた $t_L - t_R$ の推定精度が $f_1$ 波の半周期、すなわち $1/2f_1$ 以内であれば図から明らかなように

$$t_L - t_R = \left( n_1 + \frac{\phi_1}{2\pi} \right) \frac{1}{f_1} \tag{1}$$

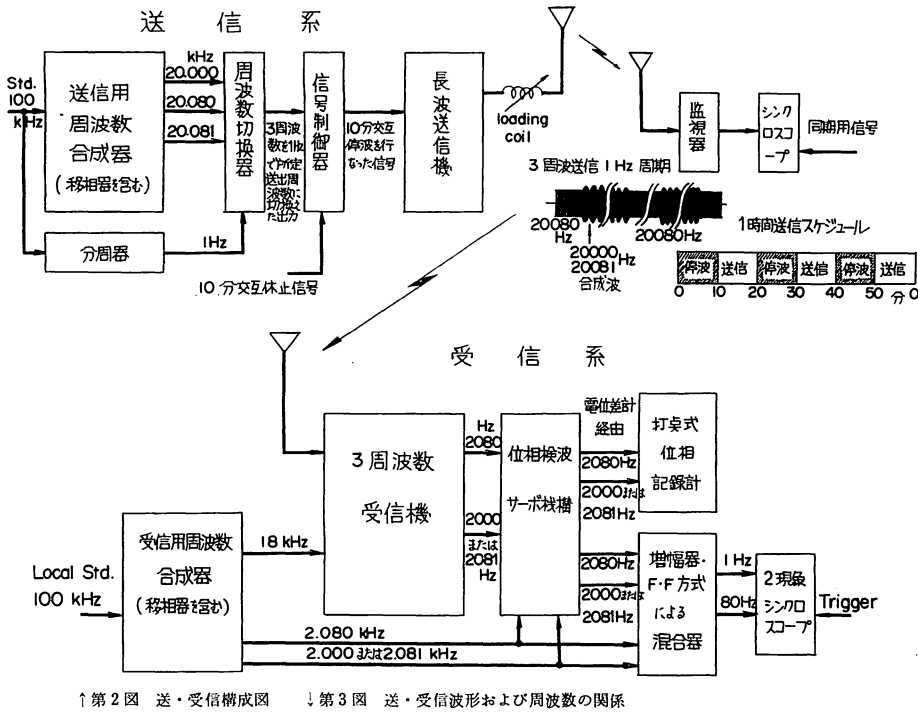
の関係を用いて搬送波 $f_1$ のサイクル数 $n_1$ を決定することができ、 $t_L - t_R$ を $\phi_1/2\pi f_1$ の測定と同じ精度で求めることができる。すなわち、受信した $(f_2 - f_1)$ の信号から適当なゲート信号を作りこれによって受信時刻 $t_R$ に対応する搬送波 $f_1$ の正方向ゼロ交差点を受信時刻信号として抽出すれば精度の高い時刻同期ができる。

第1図から明らかなように

$$t_L - t_R = t_P + \Delta t \tag{2}$$

ただし、 $t_P$ は送受信点間の伝搬時間を表わし、 $\Delta t$ はローカル時刻と送信時刻の差 $t_L - t_S$ に等しい。(2)式で $t_P$ が既知の場合 $t_L - t_R$ を測定することにより時刻差 $\Delta t$ が、また $\Delta t$ が既知(ポータブル・クロックなどを使用)の場合 $t_P$ がそれぞれ求められる。 $t_P$ がいったん決めればそれ以後は $t_L - t_R$ の測定だけで $\Delta t$ を求めることができ、ポータブル・クロックなどを再び用いる必要はない。

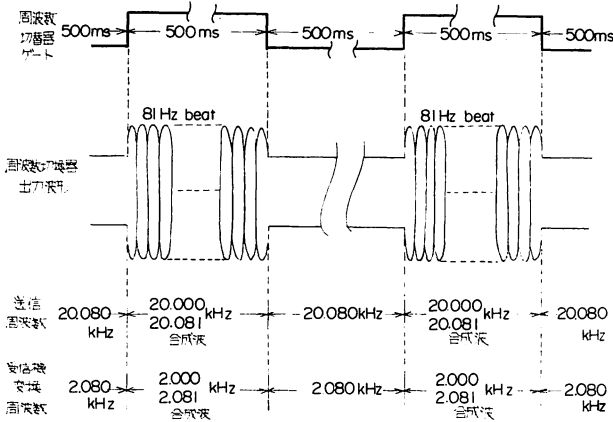
今回の実験では $f_1 = 20$  kHz,  $f_2 = 20.080$  kHz およ



↑第2図 送・受信構成図 ↓第3図 送・受信波形および周波数の関係

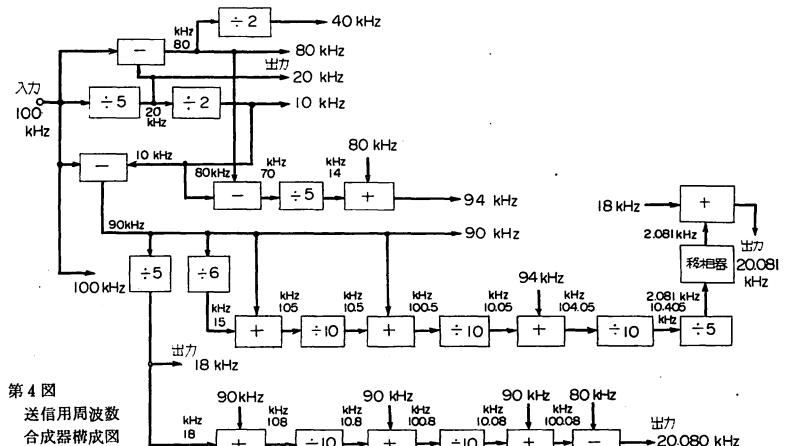
してえられた高精度の 80 Hz 時刻信号からさらに同じ精度の 1 Hz 信号を抽出するためのゲートとして用いるので、受信された 1 Hz 信号の上述と同様の意味での変動許容値は 80 Hz の半周期、すなわち  $1/2(f_2 - f_1) = 6.25 \text{ ms}$  である。

送信は第2図および第3図に示すように 20 kHz と 20.081 kHz の合成波と 20.080 kHz とを切換えて行な

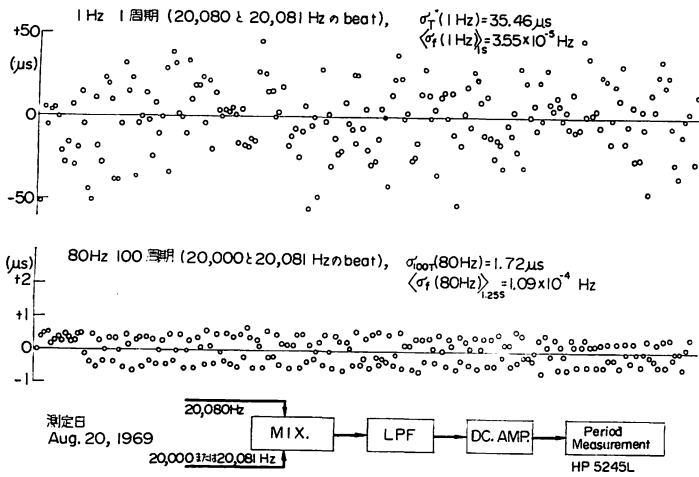


い、受信側では受信 3 周波数を変換して 2000 Hz, 2081 Hz および 2080 Hz とし、これら受信波形から上記の送信順序に同期したスイッチを作り (第9図)、これによりまず 2000 Hz と 2081 Hz の合成波と 2080 Hz を分離し、以後各波について狭帯域フィルタ、位相追尾機構を用いて受信 3 波にそれぞれ同期した正弦波を作りこれらによって 80 Hz および 1 Hz のゲート信号を得るものである。

び  $f_3 = 20.081 \text{ kHz}$  の 3 周波数を用いた。20.080 kHz を用いたのは送信アンテナ系の帯域幅の問題 (第6図参照) と電源周波数およびその高調波による妨害をさけるためである。差周波数  $f_2 - f_1 = 80 \text{ Hz}$  は搬送波  $f_1 = 20 \text{ kHz}$  から 80 Hz 時刻信号を抽出するためのゲートとして用い、受信された 80 Hz 信号の正方向ゼロ交差点の推定値における変動の許容値は上述のように  $1/2 f_1 = 25 \mu\text{s}$  である。 $f_3 - f_2 = 1 \text{ Hz}$  はこのように



第4図 送信用周波数合成器構成図



第5図 送信用周波数合成器の周波数安定度

### 3. 送・受信系機器の概要

#### 3.1. 送信用周波数合成器と付属機器

本実験の送信系の構成は第2図のとおりである。実験用周波数として 20 kHz を選定したので送信用周波数合成器は第4図の構成とし、入力は標準 100 kHz、出力は 20.000 kHz、20.080 kHz および 20.081 kHz である。周波数切換器は送信用周波数合成器の出力周波数 20.080 kHz と 20.000 kHz および 20.081 kHz の合成波とを 1 Hz 周期で切換え、10分交互停波回路を経て送信入力とした。送・受信波形および周波数の関係は第3図に示すとおりである。

送信用周波数合成器の出力周波数安定度を第5図に示したが、出力周波数相互の beat 周期測定では 20.080 kHz と 20.081 kHz の beat 1 Hz で1周期の標準偏差  $\sigma_T(1Hz) = 35.46 \mu s$ 、したがって1秒平均周波数の標準偏差  $\langle \sigma_f(1Hz) \rangle_{1s} = 3.55 \times 10^{-5} Hz$ 、20.000 kHz と 20.080 kHz の beat 80 Hz で 100 周期の標準偏差  $\sigma_{100T}(80Hz) = 1.72 \mu s$ 、したがって  $\langle \sigma_f(80Hz) \rangle_{1.25s} = 1.09 \times 10^{-4} Hz$ 、また 20.000 kHz と 20.081 kHz の beat 81 Hz で  $\sigma_{100T}(81Hz) = 1.32 \mu s$ 、 $\langle \sigma_f(81Hz) \rangle_{1.23s} = 8.69 \times 10^{-5} Hz$  であった。

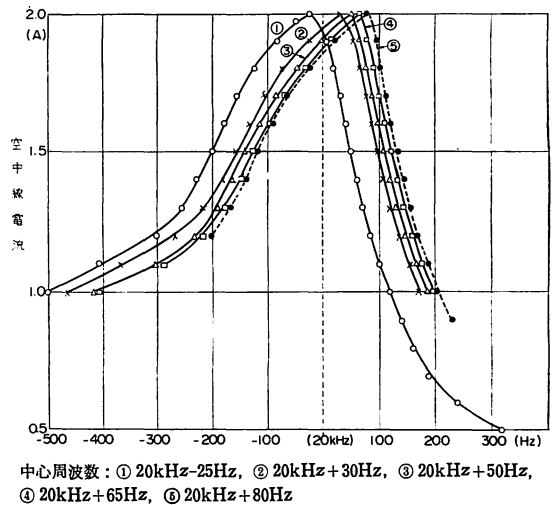
#### 3.2. 送信機および付属機器

本実験には 20 kHz 実用化試験局用既設送信機を利用した。送信波形の改善のために電力増幅段の動作点を A 級とし、送信機の保安上特に送信空中線の loading coil の焼損を防ぐため送出電力を減少し、10分交互に停波を実施した。loading coil の周波数特性は第6図のとおりで、送信3周波数が同振幅となるよう loading coil の

共振点④を移動し、20.065 kHz に調整した。送信機系のおもな位相変動は loading coil の温度上昇による共振点の移動と判断され、10分交互送信の始めと終りとで 0.3~0.5 μs (20 kHz) の差があり、温度の日周および季節変化によってもこの値は変わるものと思われる。

#### 3.3. 受信用周波数合成器

本器は受信側の比較用標準周波数発生のための周波数合成器で構成は第7図のとおりである。入力 100 kHz を受け受信周波数変換用 18 kHz および同期用周波数の 2000 Hz、2080 Hz、2081 Hz をそれぞれ出力としている。第8図に示



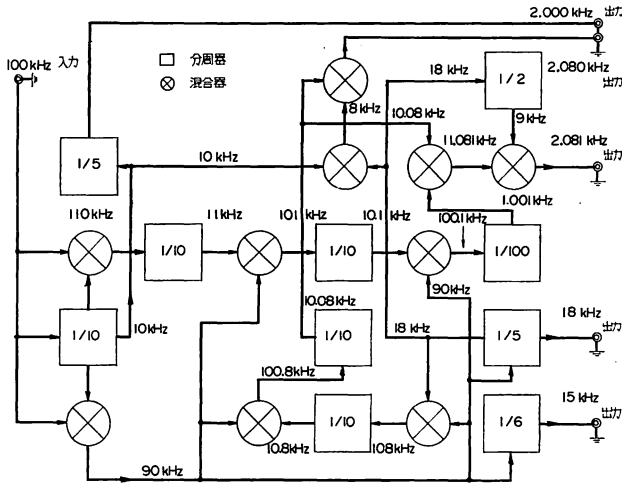
第6図 Loading coil 周波数特性

ように出力周波数の安定度は 2080 Hz と 2081 Hz の beat 1 Hz の周期測定で1周期の標準偏差  $\sigma_T(1Hz) \approx 25 \mu s$ 、したがってこれら相互の周波数安定度  $\langle \sigma_f(1Hz) \rangle_{1s} \approx 2.5 \times 10^{-5} Hz$  である。

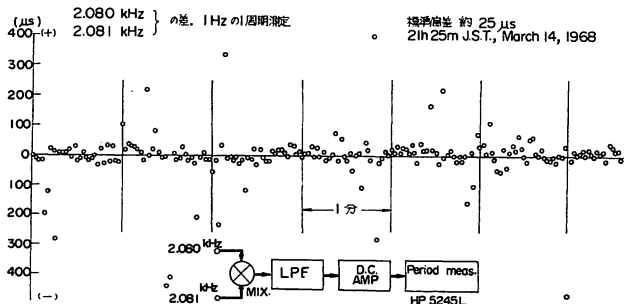
#### 3.4. 時刻同期用受信機および付属機器

本受信機の構成を第9図に示す。送信周波数を受信し受信用周波数合成器の出力 18 kHz と混合、2 kHz 帯に周波数変換して3周波数のうち 2000 Hz を周波数切換用のゲート信号として周波数の選別に用い(第3図)、それぞれが所要の狭帯域濾波器回路を経て単独受信周波数出力となる。

受信機で受信変換された各周波数 2000 Hz、2080 Hz、2081 Hz と local 基準周波数 100 kHz を入力とする受信用周波数合成器の対応する出力周波数とでそれぞれ位相検波を行ない、その出力でサーボ機構を駆動し受信側



第7図 受信用周波数合成器構成図



第8図 受信用周波数合成器の周波数安定度

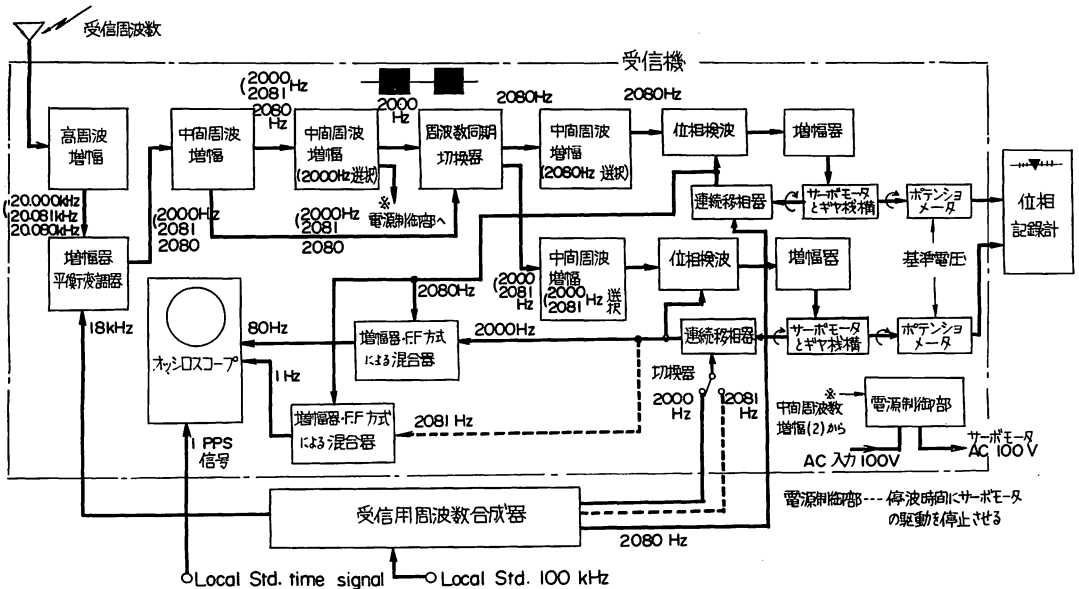
の信号の位相を制御して、受信した信号の位相に追尾させ受信搬送波に同期した出力周波数 2000 Hz, 2080 Hz および 2081 Hz を得るとともに位相追尾量を打点式位相計に記録する。位相記録計 (full scale=500 μs, 2000 Hz の1周期) に記録された位相追尾量は Local Standard と受信搬送波との位相差 (時刻差) の変化量を示していることになる。第9図から明らかなように位相記録計の full scale 500 μs は受信周波数の 20 kHz では 50 μs に相当する。上記の同期出力 2080 Hz と 2000 Hz または 2081 Hz とを混合器に入れその出力 80 Hz または 1 Hz を前述のようにゲート信号として 20 kHz 搬送波の位相に同期した時刻を確認する。

受信機内での3周波受信増幅段、周波数同期切替回路の帯域幅は共振周波数 2000 Hz で 300 Hz (-6 dB), 狭帯域フィルタ(第9図中間周波増幅, 2000 Hz, 2081 Hz 選択) 特性は 20°C において 6 Hz (-3 dB) である。

### 3.5. 時刻同期測定方法について

本実験は精密時刻同期が目的であるが、その前提として精密な周波数および位相の同期が必要で、受信側において同期された周波数の安定が欠かせない条件である。

今回の時刻同期方法は受信周波数相互の beat (1 Hz, 80 Hz) を利用して 20 kHz 搬送波にお



第9図 受信系構成図

る 50 μs の整数倍の不確かさを解消する方法である。  
受信する 2 信号をそれぞれ

$$e_1 = E \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \quad (3)$$

$$\text{および } e_2 = E \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \quad (4)$$

とし、 $\phi_1$  および  $\phi_2$  の変動の標準偏差を  $\sigma_{\phi_1}$  および  $\sigma_{\phi_2}$ 、これらによるエンベロープの遅れ (group delay) の変動の標準偏差を  $\sigma_{td}$  とすれば

$$\sigma_{td} = \frac{\sigma_{\phi_2} - \sigma_{\phi_1}}{2\pi(f_2 - f_1)} \quad (5)$$

もし  $\phi_1$  および  $\phi_2$  の変動が相互に無関係であり、かつ

$$\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = \sigma_{\phi} \quad (6)$$

と仮定できる場合は

$$\sigma_{td} = \frac{\sqrt{2} \sigma_{\phi}}{2\pi(f_2 - f_1)} \quad (7a)$$

$$= \sqrt{2} \frac{\sigma_{\phi}}{2\pi f_1} \frac{f_1}{f_2 - f_1} \quad (7b)$$

となる。(7b)式における  $\sigma_{\phi}/2\pi f_1$  は搬送波  $f_1$  における位相変動  $\sigma_{\phi}$  による時刻変動であり、 $f_1/(f_2 - f_1)$  は搬送波  $f_1$  と beat 波の周波数比でこの分だけ拡大されることを示している。group delay  $t_d$  を  $N$  回測定し、その平均を  $\bar{t}_d$  とすれば  $\bar{t}_d$  の標準偏差  $\sigma_{\bar{t}_d}$  は次式のようになる。

$$\sigma_{\bar{t}_d} = \frac{\sigma_{td}}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

第 2 節複数搬送周波数による時刻同期方法の原理で述べたように、80 Hz beat の場合を例にとると

$$3 \sigma_{\bar{t}_d} < 25 \mu\text{s} \quad (9)$$

でなければならないことがわかる。

次にエンベロープの利用法として

- (1) エンベロープの節 (位相反転点),
- (2) FLIP—FLOP 位相計の反転点 (写真 1, 2 参照),
- (3) ビート (正弦波) のゼロ交差点

などの利用が考えられる。(1)の方法は当初の計画であったが(3), (4)式における等振幅  $E$  の安定性が要求されるほかに  $\sigma_{td}$  が大きい場合、ブラウン管上で節点を確認することが困難である。(2)の方法では反

転点の確認は(1)に比べてはるかに容易であるが FLIP—FLOP の安定性、分解能などの問題が残る。(3)の方法は(1)と本質的に同じであるがカウンタで連続測定ができる点で(1), (2)より優っている。今回の  $\sigma_{td}$  の評価にはこの方法を用いた。

実験時に FLIP—FLOP 位相計による同期時と非同期時 (停波時) における 80 Hz, 1 Hz の反転点を連続写真撮影したものをそれぞれ写真(1)および(2)に示した。これらは標準 1 秒トリガーで反転点を拡大掃引し、垂直軸を上から下へ移動して撮影したもので、この場合の反転時刻の変動は唸周波数の位相変動を示すものであり、この測定時における  $S/N$  は 20 dB 程度 (雑音電界強度平均 40 dB) で受信機内の周波数同期切換器が不安定な動作を行なっていることも考えられる。反転点の変動は 1 Hz の場合 2ms, 80 Hz で  $\pm 100 \mu\text{s}$  程度である。

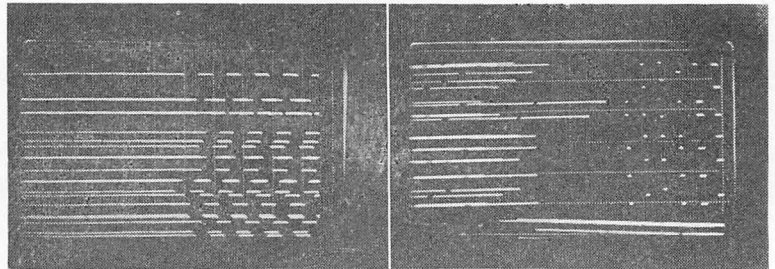


写真 1 (a)左 80 Hz Epoch (非同期時), 掃引 100 μs/cm 30 秒露出  
1 (b)右 80 Hz Epoch (同期時), 掃引 200 μs/cm 30 秒露出

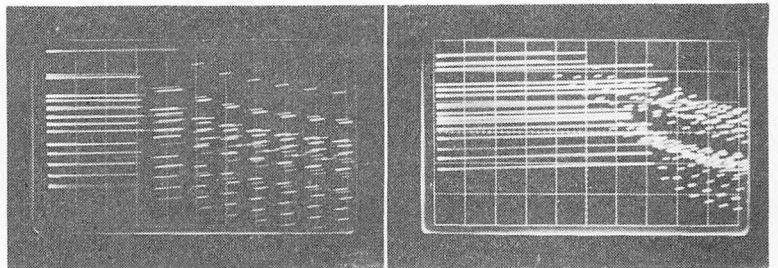
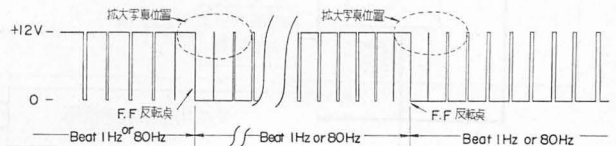


写真 2 (a)左 1 Hz Epoch (非同期時), 掃引 1 ms/cm 30 秒露出  
2 (b)右 1 Hz Epoch (同期時), 掃引 2 ms/cm 30 秒露出  
写真 1, 2. F, F 位相計による位相反転点の測定



(注) Beat 周期 1 Hz または 80 Hz の節点を F, F 位相計で検出した説明図。写真は F, F 位相計の位相反転点を拡大、掃引し、上部基線部分を垂直に移動して 1 秒 1 回の掃引で撮影した。

### 4. 送・受信状況

#### 4.1. 送信状況

送信機施設の概略は、3周波送信実験時における機器内定数の不確かさはあるが

空中線実効高  $h_e \approx 34\text{m}$

放射抵抗  $R_r \approx 8.2 \times 10^{-3} \Omega$  (接地型長波空中線)

放射電力  $P_r \approx 0.2\text{W}$  ( $I=5\text{A}$ )

空中線能率  $\eta \approx 0.011\%$

である。

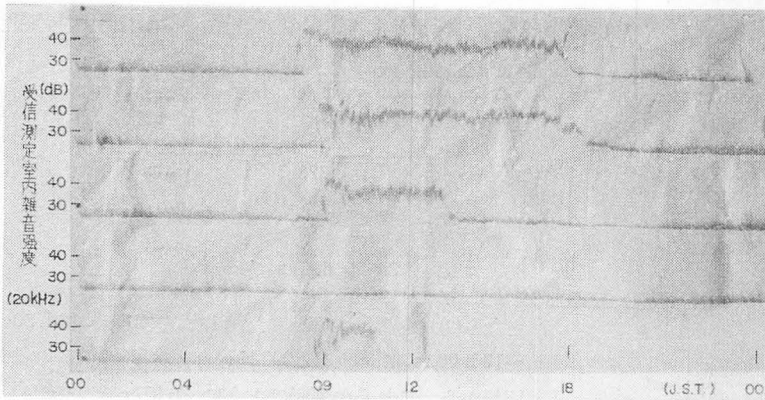
#### 4.2. 受信状況

受信実験は小金井送信点—国分寺受信点間、距離 3km で行なった。国分寺での受信電界強度は 66 dB (庁舎屋上、受信空中線設置場所で測定、電界強度測定器中間周波数 10 kHz, 中間周波数帯域幅 -6 dB で 86Hz) であり受信空中線はループ・アンテナを使用した。受信機設置場所の標準測定研究室において前記の電界強度測定器(平均値検波)を用いて測定した雑音強度の日周変動は第10図のとおりで、同一構内で他に多くの機器が

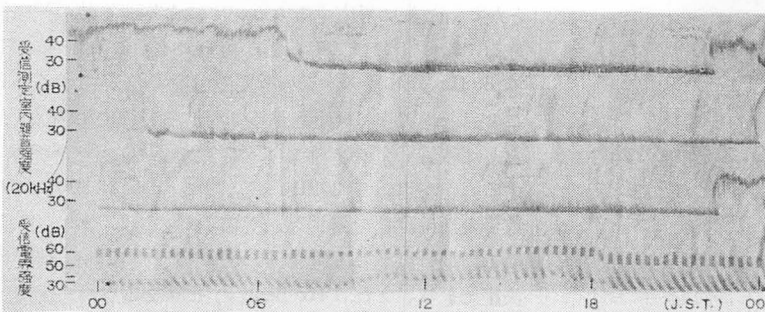
動作している時間帯では平均で 40 dB 以上あり、また記録紙上に現われない pulse 性雑音は 60~70 dB 以上にも達する。夜間および休日における雑音の平均値は 20~30 dB であった。第11図、第12図は雑音と受信位相安定度との関係例を示している。第11図の17時前後で位相変動量がかなり違うが、これは機器動作中の時間帯の内外における雑音レベルの差 10~20 dB に対応するものと思われる。第11図は1970年7月の国分寺での受信実験結果であり、そのあと第9図中の周波数同期切換回路の改善を行ない、同年の9月の実験では雑音の影響は第12図のようになり減少し、比較的安定した受信位相が記録された。

### 5. 送・受信実験結果

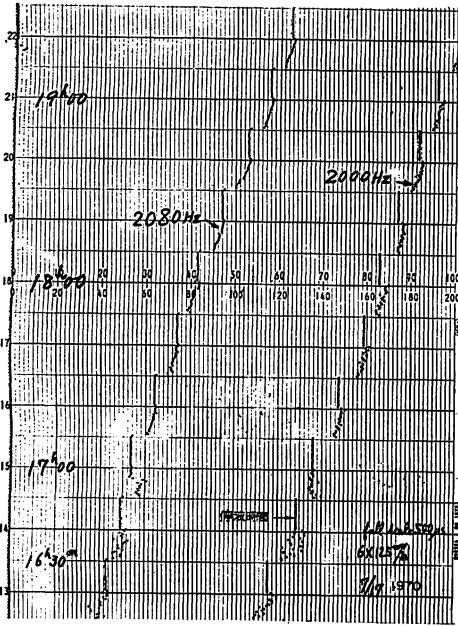
まず周波数標準部内の送、受信実験による位相比較結果を第13図(a)~(c)に示す。(a)と(b)は送信用周波数合成器から周波数切換器を経た信号を直接受信機に入れ、位相比較した記録で、(a)図では送、受信で共通のセシウム標準器を用い、同図(b)では送信側にセシウム標準器を、受信側に水晶発振器を用いたときの記録である。(a)図の同一発振器による結果は送、受信系のジッタが搬送波 20 kHz において 0.1  $\mu\text{s}$  あるいはそれ以下であることを示している。第13図以下のデータは 2 kHz 帯に変換して記録されているので、記録紙の全目盛り 500  $\mu\text{s}$ 、最小目盛りは 5  $\mu\text{s}$  であるが、この1目盛りは 20 kHz の変化に換算すれば最小 0.5  $\mu\text{s}$  に相当する。(b)図の打点式位相記録計の full scale での記録はこの系の直線性を示し、直線からの偏差は最大 1.5  $\mu\text{s}$  程度である。(c)図は送信機—空中線經由での受信結果で直線性は約 1  $\mu\text{s}$ 、短時間のジッタは(b)図よりもやや大きい程度である。第14図は 3.5 の(3)の方法を用いて国分寺で測定した、beat 80 Hz のゼロ交差点の同期および非同期(停波)時における安定度を示している。基準秒信号は  $R_b$  標準器の 1 pps. 信号を用い、これを start 信号とし、2000Hz と 2080 Hz との beat 80 Hz (正弦波)を stop 信号としてカウンタで時間間隔を測定した。Local 基準発振器に



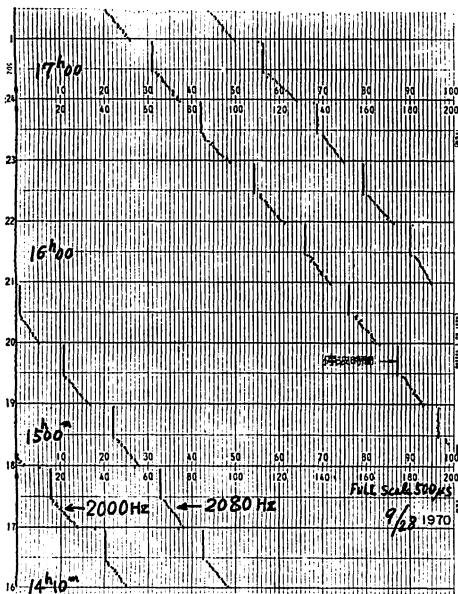
(上)受信測定室内における noise は同一構内で他に多くの機器が動作している時間帯にいちじるしく増加し、その他の時間帯(休日を含む)には特に noise の増加はない (Oct. 1~5, 1970)



(下)研究所構内での noise 日周変動は日中より夜間に増加する (Sept. 25~28, 29, 1970)  
第10図 研究所(国分寺)における受信室内雑音日周変動と構内における受信電界強度測定



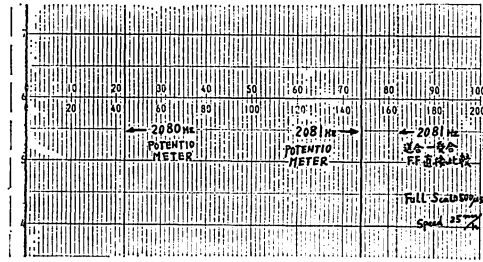
第11図 送信系(Cs)→受信系(Xtal)における受信位相比較



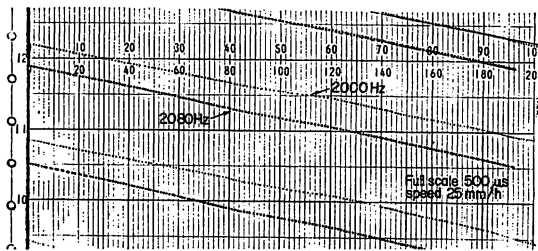
第12図 送信系(Cs)→受信系(Xtal)における受信位相比較  
(July 1970 (第11図)以後受信周波数切替回路改造により安定した)

は水晶発振器 Hp 105 A, 出力 0.1, 1, 5 MHz を用いた。各時間帯における測定値の標準偏差はそれぞれ図中に示してある。またこれら測定値の分散状況をヒストグラムで第15図に示した。

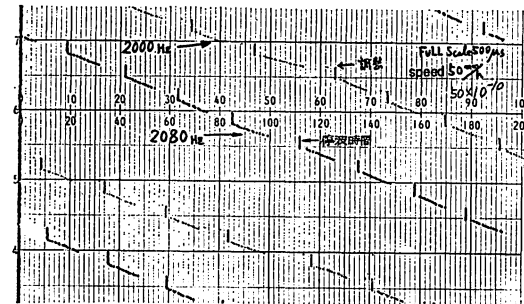
同期時における分布は正規型と仮定し, 同期時における  $\sigma_{id}(80 \text{ Hz}) \approx 39 \mu\text{s}$ , 測定個数  $N=322$  であるから(8)式により



第13図(a)  
送信用周波数合成器 (Cs)→受信系 (Cs) における受信位相安定度測定 (小金井)



第13図(b)  
送信用周波数合成器 (Cs)→受信系 (Xtal) における受信位相記録の直線性測定 (小金井)



第13図(c)  
送信用周波数合成器 (Cs)→送信機系→受信系 (Xtal) における受信位相比較 (小金井)  
(送信系で10分交互の停波を行なっている)

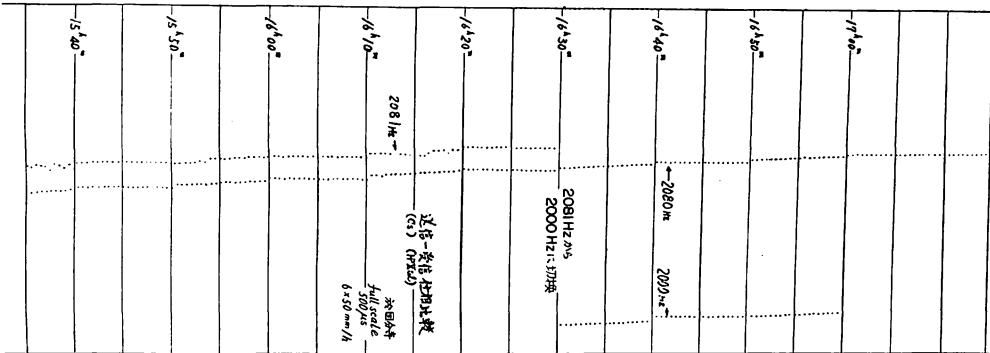
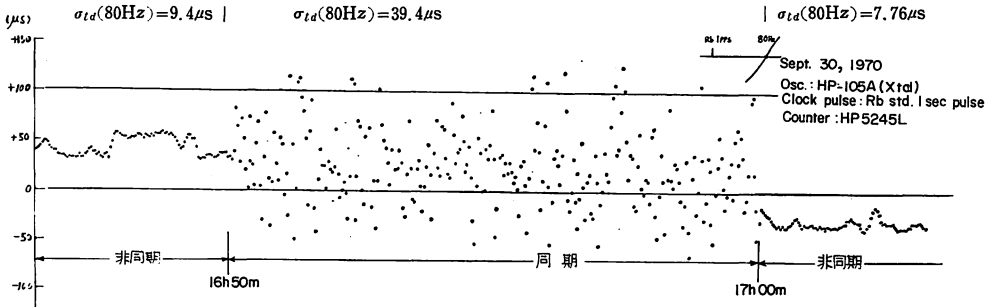
$$\sigma_{id} \approx \frac{39}{\sqrt{322}} \approx 2.2 \mu\text{s}$$

したがって

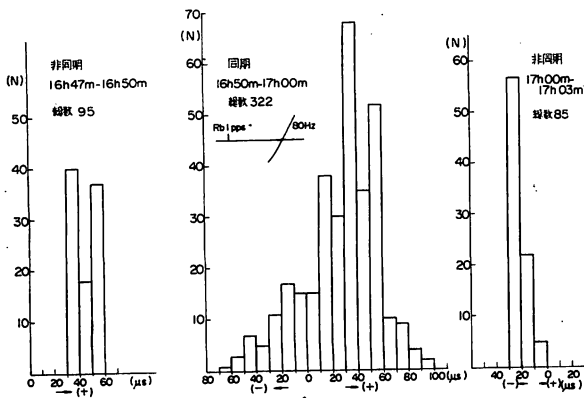
$$3\sigma_{id} \approx 6.6 \mu\text{s} < 25 \mu\text{s}$$

となり(9)式を満足する。また第14図の同期時 16 h 50 m ~ 17 h 00 m における 2000 Hz および 2080 Hz の位相記録から, これらの変動はともに 20 kHz 帯で考えて標準偏差は 0.1  $\mu\text{s}$  程度でありこれと  $f_1=2 \times 10^4 \text{ Hz}$ ,  $f_2-f_1=80 \text{ Hz}$  を(7b)式に代入すれば  $\sigma_{id}(80 \text{ Hz}) \approx 35 \mu\text{s}$  となり, これに対応するカウンタによる測定値の標準偏差約 39  $\mu\text{s}$  とほぼ等しい値が得られる。このようにして 80 Hz のゼロ交差点が所要の精度で決定できるから, この点と送信時に規定される 3 周波信号の位相関係 (たとえば秒信号発射時刻において 3 信号の位相を全部零とする) とを用いて 20 kHz 搬送波における 50  $\mu\text{s}$  の整数倍の不確かさを解消し, 受信時刻の 12.5 ms (80 Hz の 1 周期) 以下の数値を 20 kHz 搬送波と同じ精度で決定できる。また 1 Hz beat のゼロ交差点の安定度も 3.5 の終りに述べた条件,  $3\sigma_{id}(1 \text{ Hz}) < 6.25 \text{ ms}$  (第2節参照) を満足するので結局受信時刻の 1 秒以下の数値





第14図  
(2000 Hz と 2080 Hz の beat) の 80 Hz の同期・非同期時における安定度



第15図 (2000 Hz と 2080 Hz の beat) 80 Hz のゼロ交差点の同期・非同期時における安定度 (Sept. 30, 1970)

を  $\mu s$  の精度で決定できることになる。以上から第14図における  $\sigma_{td}(80 \text{ Hz}) \approx 39 \mu s$  の変動は搬送波の受信時刻の変動  $0.1 \mu s$  に相当するが、この変動の主要な原因につき検討する必要がある。第14図の非同期(停波)時における  $\sigma_{td}(80 \text{ Hz})$  は受信用周波数合成器の出力周波数相互の beat(80Hz) の位相変動であるが、これを 20 kHz 搬送波の位相変動に換算すると(7b)式により標準偏差  $\sigma \approx 0.02 \sim 0.03 \mu s$  となる。なお第8図における受信用周波数合成器の相互安定度の値から換算すると標準偏差  $\sigma \approx 0.001 \mu s$  となり、前述の値とはかなり違うが、測定時期が相当ずれており、今回の実験に際しては特に調整を行っていないためと思われる。

送信用周波数合成器も同様に換算すれば標準偏差  $\sigma \approx 0.001 \mu s$  となり周波数合成器は送受ともこの場合あまり問題とならない。

次に連続性雑音の影響を調べるため伝搬による phase delay( $T_d$ ) の標準偏差を  $\sigma(T_d)$  とすれば<sup>(9)</sup>

$$\sigma(T_d) = \frac{\sqrt{B/1000}}{2\sqrt{2\pi f_1 C/N_{1\text{kHz}}}} \quad (10)$$

ただし  $B$  は受信機の帯域幅、 $f_1$  は搬送波周波数、 $C/N_{1\text{kHz}}$  は帯域幅 1 kHz 当りの  $C/N$  (電圧) 比である。上式に  $B=0.03 \text{ Hz}$  (時定数約 30秒)、 $f_1=2 \times 10^4 \text{ Hz}$ 、 $C/N_{1\text{kHz}}=2^*$  を代入すれば  $\sigma(T_d) \approx 0.015 \mu s$  となり、前記の  $0.1 \mu s$  に比し 1桁程度小さい。

また受信機における温度の影響を大まかであるが計算すると次のようになる。受信機同調増幅段における位相変動  $\Delta\phi$  は

$$\Delta\phi \approx 2Q \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \quad (11)$$

ただし  $Q$  は共振回路の  $Q$ 、 $\Delta\theta$  は周囲温度変化、 $\alpha$  は共振周波数の温度係数。

(11)式において  $Q=100$ 、 $\Delta\theta=0.1^\circ\text{C}$ 、 $\alpha=1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$  を代入して計算すると、位相変動  $\Delta\phi \approx 0.002 \text{ rad}$ 、20

\*4.2における電界強度測定器による  $C/N_{86\text{Hz}}=66-40=26 \text{ dB}$  (20倍)、 $C/N_{1\text{kHz}} \approx 6$ 、雑音の平均値指示を実効値に換算する際多少余裕を見て  $C/N_{1\text{kHz}} \approx 2$  とした。

kHz における時刻変動に直すと

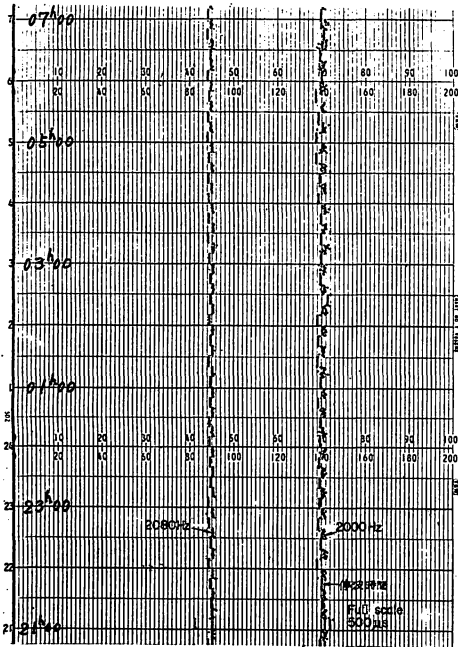
$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \frac{1}{f_1} = 0.016 \mu\text{s}$$

となりそれほど大きくない。

以上のことから狭帯域のメカニカル・フィルタの温度特性も問題となり得るが、周波数同期切替回路による分波の過程における雑音の影響が前記の同期時における変動 (0.1 μs) の主要因ではないかと思われる。なお前記の基準秒信号発生用の R<sub>0</sub> 発振器の出力を Local Standard として受信位相比較を行なった記録が第16図で、送信側セシウム標準器を基準として10時間受信の平均で 0~1×10<sup>-11</sup> 程度の周波数差しか認められなかった。

### 6. 結 言

今回の3周波数による送受信実験の結果を総合すると  
 (1) 電界強度 66 dB, 雑音レベル 20~40 dB (電界強度測定器中間周波数 10kHz, 中間周波数帯域 -6 dB で 86 Hz, 検波方式は平均値指示) における受信時刻同期10分間中の受信搬送波の安定度は約 0.1 μs で, 80 Hz および 1 Hz のゼロ交差点の安定度はそれぞれ 40 μs および 2 ms であった。したがってこれら 80 Hz および 1 Hz を用いて受信搬送波から高精度の時刻信号を選び出し精度 10 μs 程度の時刻同期の可能性が明らかになった。



第16図 送受信実験において送信系 (Cs) と受信系 (Rb) との受信位相比較 送信: 小金井 受信: 園分寺

- (2) 連続性および pulse 性雑音の受信系に及ぼす影響, 特に周波数同期切替器の動作およびサーボ系についてはさらに検討と改善の必要がある。
- (3) 短期のみならず長期の送受信系の安定度を向上させるため, 送受信機器の温度特性の再検討が必要であり, 同時に時刻同期を実現する具体的な方法の検討も緊急の課題と思われる。

### 謝 辞

本実験に際し終始指導いただいた佐分利周波数標準部長および鈴木標準電波課長に深く感謝する。また実験室, Rb 標準器など種々協力下さった宮島標準測定研究室長, 実験およびデータ整理に協力願った本間, 小宮山, 松浦各技官, 測定機器の運搬, 設置に協力願った大熊技官に厚くお礼申上げる。

### 参 考 文 献

- (1) 小林(三), 中島(政), 佐藤; JJY による国内時刻同期精度 (遠距離) について, 電波研季報 14, No. 72, May 1968.
- (2) Stone, R. R. Jr., Markowitz, W. and Hall, R. G., Time and Frequency Synchronization of Navy VLF Transmissions, IRE Transactions Instrumentation, pp.155—161, Sept. 1960.
- (3) Casselman, C. J. and Tibbals M. L., The Radix-Omega Long Range Navigation System, 1958 Proc. Second Nat'l Conv. Military Electronics, pp.385—389.
- (4) C. C. I. R. Doc. 57-E, Jan. 1959.
- (5) Fey, L. and Looney, C. H., Jr., A Dual Frequency VLF Timing System, IEEE Transactions, Instrumentation Measurement, IM-15, No. 4, pp.190—195, Dec. 1966.
- (6) Chi, A. R. and Witt, S. N., Time Synchronization of Remote Clocks using Dual VLF Transmissions, Proc. 20th Annual Symposium on Frequency Control, 1966.
- (7) C. C. I. R. Doc. 7-34-E, March 1968.
- (8) Morgan, A. H. and Baltzer, O. J., A VLF Timing Experiment, Radio Science, J. Res, NBS/USNC-URSI, 68D, No. 11, pp.1219—1222, Nov. 1964.

(9) Watt, A. D., Plush, R. W., Brown, W. W. and Morgan, A. H., Worldwide VLF Standard Frequency and Time Signal Broadcasting, J. Res. NBS, 65D, No.6, pp.617—627, Nov.—Dec.1961.

(10) 安田, 原田, 佐分利, 小林(正), 島田; 周波数通倍器の位相変動, 電波研季報 9, No.40, pp.30—49, Jan. 1963.

