

研 究

UDC 621.3.018

周波数オフセットの一方

安田嘉之* 吉村和幸* 斎藤義信*

ONE OF THE METHODS OF FREQUENCY OFFSET

By

Yoshiyuki YASUDA, Kazuyoshi YOSHIMURA and
Yoshinobu SAITO.

The experiment was made of an electronic frequency-offsetting apparatus converting a 5 MHz reference based on the Atomic time scale (AT) to the one whose integrated value approximates the time scale UT2. The apparatus is capable of any plus and minus offset of the 5 MHz reference from 0 to $\pm 500 \times 10^{-10}$ in steps of 50×10^{-10} . It consists of three main parts, i. e., a frequency multiplier obtaining a high frequency reference of 100 MHz, a low frequency reference signal generator, and two stages of phase-locked frequency converters mixing the high and low frequency references, filtering, and frequency-dividing to the offset output of 5 MHz.

The frequency stability of the offset output relative to the 5 MHz reference is approximately as follows: 1×10^{-11} for the averaging time of one second, $2 \sim 3 \times 10^{-12}$ for 10 seconds, 3×10^{-13} for 100 seconds, and 1×10^{-13} for 1000 seconds.

Because of its high short- and long-term stability, it may be used for very precise measurement such as reception of VLF standard frequency transmission or frequency comparison between high quality quartz crystal oscillators and atomic frequency standards.

1. 緒 言

物理的時間尺度または周波数の単位としては、国際的に原子周波数標準が採用されており、暦表時系 (ET) と一致させるためにセシウム原子の $F=4$, $m_f=0$ と $F=3$, $m_f=0$ の間の遷移周波数を $9\ 1\ 9\ 2\ 6\ 3\ 1\ 7\ 7\ 0$ Hz (原子時系 AT) と暫定的にきめている。したがって標準電波も原子周波数標準により周波数と時刻信号を発射するのが自然であるが、そのようにすると標準電

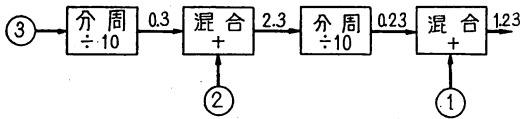
波の示す時刻信号と世界時、すなわち、自転時 (UT 2) の示す時刻との間にくいちがいを生ずる。一方 UT 2 は天体観測などに必要であるから、大多数の国の標準電波はその発射周波数を故意に基準値からオフセットし、その積算値である時刻信号が UT 2 に近似するようにしている。そのオフセット値は 50×10^{-10} の整数倍とし、毎年のオフセット値は国際報時局 (BIH) が決定することになっている。最近のオフセット値は 1963 年 -130×10^{-10} , 1964, 65 年 -150×10^{-10} , 1966 年は -300×10^{-10} である。このように ET または AT と UT 2 の二つの異なる時系が共存している現状では、相互に高精度で変換するための周波数オフセット装置が必要であ

*標準課

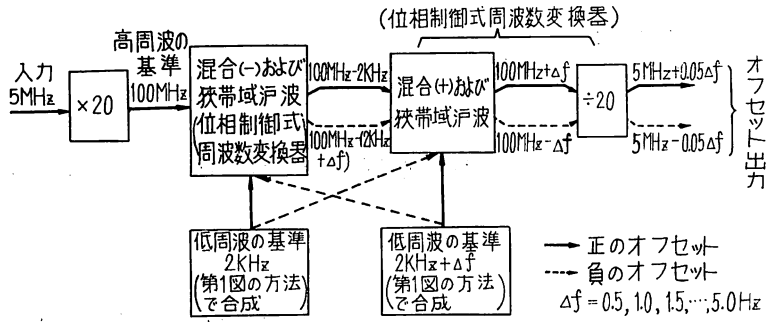
る。たとえば、オフセットされたVLF標準電波を受信してATによる標準器と周波数比較する場合、あるいはその逆の場合がそれである。また単にAT, UT 2相互間の変換だけでなくその微小で正確なオフセットを利用し、広く周波数の精密計測に利用することができる。

周波数のオフセットを行う方法には、たとえばレゾルバ型の移相器の廻転による電気、機械的方法と電子回路による方法がある。前者ではレゾルバの特性（周波数特性、直線性など）、減速機構（一般に非常に低速廻転）などで精度が制限され、短時間の安定度は低いが、構成が比較的簡単であるから、長期間連続使用し、長時間の平均値を利用するような場合に適している。これに対し後者では短時間の安定度は前者に比較してはるかに高いことが期待されるが、やや複雑、高価になる傾向がある。後者の例として、米国NBSで行われている方法⁽¹⁾は、印加直流電圧によって遅延時間が変化するような遅延線路にオフセットしようとする信号波を入れた状態で、一定時間に適当な個数のパルスを加え、それにより信号波から所望のサイクル数を除去したのち狭帯域濾波、分周、混合などの過程を経て、負のオフセット（ $0 \sim 500 \times 10^{-10}$, 50×10^{-10} ステップ）を実現する方法である。オフセット出力のスペクトル純度はその方式からみてあまり高くないが、全固体化されており、信頼度も高いのでUT 2に近似した時刻信号の発生のほか多くの応用があると報告されている。

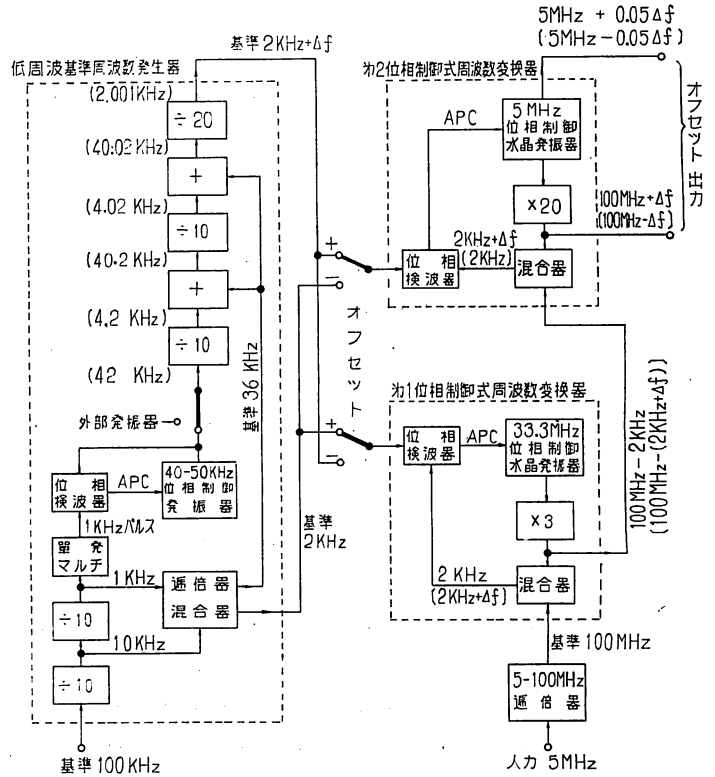
今回試作の周波数オフセット装置は電子回路で周波数合成を行う方式で、短期および長期の安定度はもちろん、信頼度も高いことを目標とし、応用面を広げるため正負のオフセット（ 50×10^{-10} ステップで $0 \sim \pm 500 \times 10^{-10}$ ）を行うこととし、オフセット値の連続的な変化の方法についても考慮した。周波数合成の基本的方



第1図 周波数合成の基本的な方法



第2図 周波数オフセットの原理



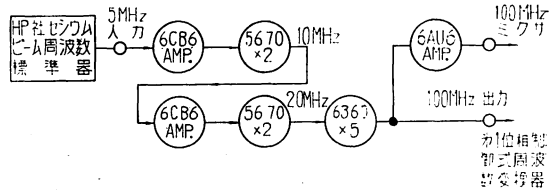
第3図 周波数オフセット装置、 $\Delta f = 0.5, 1.0, \dots, 5.0 \text{ Hz}$, ()内は $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ の場合を示す。図は正のオフセットの場合を示す。()内は負のオフセットの場合の周波数値を示す。

法は第1図のごとく、分周（ $\div 10$ ）と混合（ $+$ ）という基本操作の繰り返しで、商品化されている周波数合成器の大多数はこの方式によっている。また倍周（ $\times 10$ ）と混合（ $+$ ）も原理的にはこれと同等である。したがって第1図の数字1, 2, 3などに対応する10個の周波数から、 50×10^{-10} ステップのオフセットを実行するには、このような基本操作を7回と分周（ $\div 2$ ）または倍周（ $\times 2$ ）の操作1回が必要である。しかしオフセット装置の場合是一般の周波数合成器と異なり、“0”が多数ならぶので、分周、混合操作を7回以上も繰返すよりも、通倍により（“0”の多数ならんだ）高い周波数の基

準を作り、それに端数として第1図の方法による低い周波数の基準を混合する方がはるかに簡単で性能的にも有利と思われる。そして混合と濾波には位相制御(水晶発振)式周波数変換器が適当である。高安定度の位相制御のためには位相検波は高い周波数帯で行うことが望ましいが、今後の全固体化の際の増幅の容易さも考慮して高い周波数の基準を100MHzとした。低周波の基準周波数としては2kHzのほかに $2\text{kHz} + \Delta f$ ($\Delta f = 0.5, 1.0, \dots, 5.0\text{Hz}$)を作り、第2図のごとく、2段の位相制御式周波数変換器を用いて目的のオフセット値を得る。このような方法がこの装置の特色といえる。

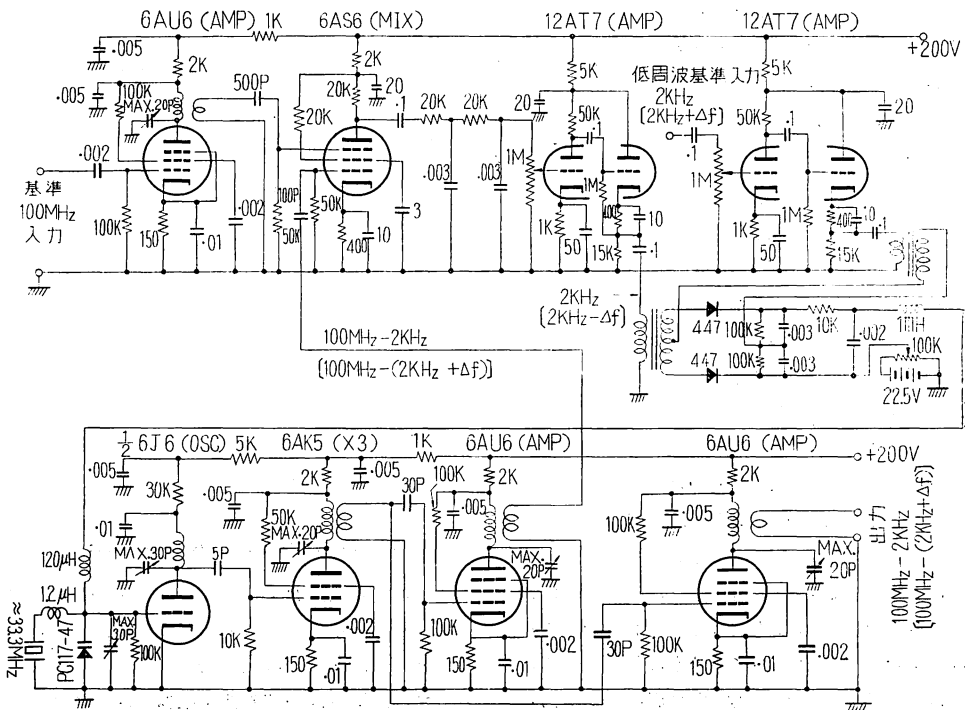
2. 実験装置

装置は第3図のごとく、5~100MHz 通倍器、二つの位相制御(水晶発振)式周波数変換器、およびオフセット値をきめる低周波基準周波数発生器で構成されている。まず、5MHz 入力信号を上記の通倍器により100MHz に通倍し、これを低周波基準周波数発生器からの2kHzとを基準周波数信号として、第1位相制御式周波数変換器に入れる。図示の33.3MHz 位相制御水晶発振器はその3通倍波が100MHz-2kHzに等しくなるように位相制御される。次に、この100MHz-2kHz 信号

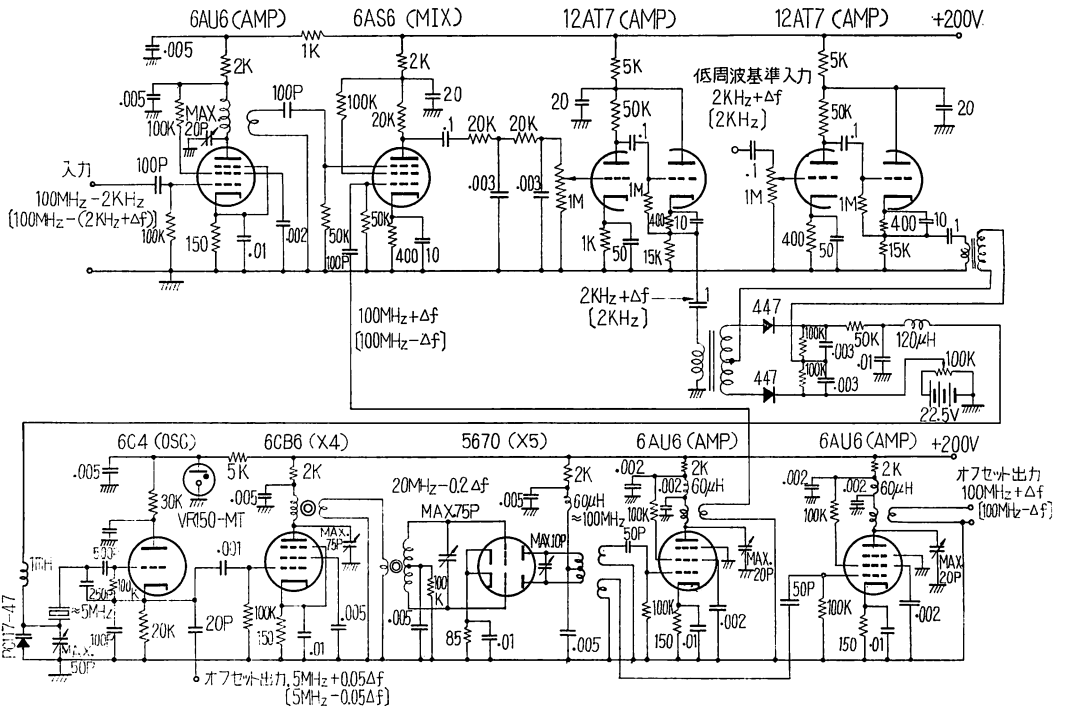


第4図 5~100MHz 通倍器

と低周波基準信号発生器からの $2\text{kHz} + \Delta f$ ($\Delta f = 0.5, 1.0, \dots, 5.0\text{Hz}$)とを基準周波数として、第2位相制御式周波数変換器に入れ、第1の場合と全く同様の方法で5MHz 水晶発振器の位相制御を行い、この水晶発振器の出力周波数がオフセット出力となる。すなわち、 $5\text{MHz} + \Delta f$ 出力端子には $5\text{MHz} + 0.05\Delta f$ 、100MHz 出力端子には $100\text{MHz} + \Delta f$ の信号を得る。以上は正のオフセット値の場合であるが、負の場合は上の記述の中で“2kHz”と“ $2\text{kHz} + \Delta f$ ”をそっくり入れかえればよい。すなわち、二つの低周波基準信号のどちらを先に使うかによりオフセット値の正負がきまり、正負をふくめてオフセット値の変更の際、2個の水晶発振器を再調整する必要は全くない。第4図は上記の5~100MHz 通倍器の構成⁽²⁾を示す。5MHz 入力信号は全実験を通じ、ヒューレットパッカード社のセシウムビーム周波数標準器を使用し、第3図の基準100kHz、およびカウン

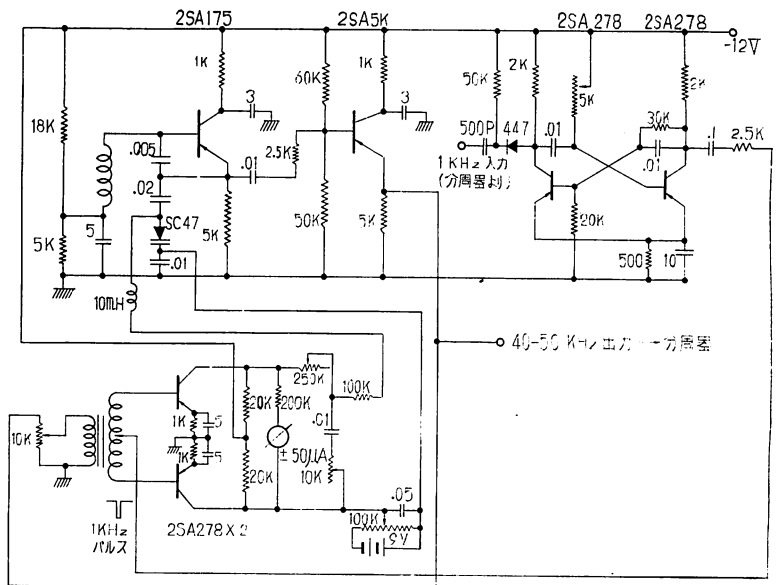


第5図 第1位相制御式周波数変換器 []内は負のオフセット値の場合を示す



第6図 第2位相制御式周波数変換器 []内は負のオフセット値の場合を示す

タの基準周波数（周期測定の際の時間基準）などもすべてこれから誘導したものをを用いた。第1および第2位相制御式周波数変換器の回路の詳細をそれぞれ第5および第6図に示す。低周波基準周波数発生器は第3図に示すように、基準100kHzから1kHzまでの分周器、40~50kHz位相制御発振器、およびそれにつづく分周器、混合器などで構成されている。40~50kHz位相制御発振器の回路構成を第7図に示す。正弦波自動発振器出力と1kHzパルスの所望の高調波で位相検波を行い、その直流出力を可変容量ダイオードに加えてAFCを行う。したがって、この発振器は40~50kHzの範囲で1kHzごとの基準周波数信号を発生するが、この発振器出力の第2あるいは第3高調波などによる、いわゆる高調波動作により0.5kHzあるいは0.333kHzごとの基準信号なども発生できるが、現状では0.5kHzの場合以外は信頼度は低い。この基準信号から低周波基準2kHz+dfの合成には第1図の方法を用いた。40~50kHz位相制御発振器の周波数、2kHz



第7図 40~50kHz位相制御発振器(2SA5Kは2SA58とする)

+dfの値、およびオフセット値の相互関係を第1表に示す。表示のオフセット値以外に、さらに微細なオフセット値、あるいは連続的なオフセット値などが必要な場合は、第3図の“外部発振器”端子により40~50kHz位相制御発振器のかわりに、それぞれの目的に適した発

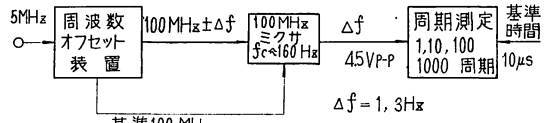
第1表 低周波基準周波数発生器各部の周波数とオフセット値との関係

40~50 kHz 位相制御発振器 周波数 (kHz)	基準周波数 $2\text{kHz} + \Delta f$ (kHz)	オフセット値 ($\times 10^{-10}$)		
		5 MHz出力 (Hz)	100MHz出力 (Hz)	
40	2.0000	0	0	0
41	2.0005	± 50	± 0.025	± 0.5
42	2.0010	± 100	± 0.050	± 1.0
43	2.0015	± 150	± 0.075	± 1.5
44	2.0020	± 200	± 0.100	± 2.0
45	2.0025	± 250	± 0.125	± 2.5
46	2.0030	± 300	± 0.150	± 3.0
47	2.0035	± 350	± 0.175	± 3.5
48	2.0040	± 400	± 0.200	± 4.0
49	2.0045	± 450	± 0.225	± 4.5
50	2.0050	± 500	± 0.250	± 5.0

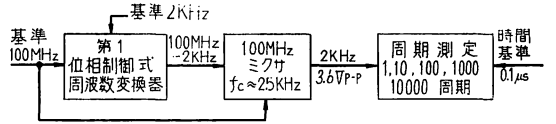
振器を使用する。

3. 実験結果

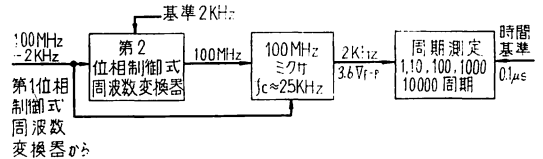
オフセット装置の周波数安定度，およびこれに影響をおよぼす各部の安定度の測定には周期測定法を用いた。すなわち，被測定信号の周波数 f を基準信号の周波数 f_0 より低周波のビート周波数 $f_B = f - f_0$ に変換し，これをカウンタで周期測定（一般に N 周期測定）する。測定時間 τ は従って $N \cdot T_B$ ($T_B = 1/f_B$ はビート信号の周期) に等しい。 τ の測定値（個数は特に明記の場合



第8図(C) 基準 100MHz 対出力 100MHz ± Δf



第8図(D) 基準 100MHz 対 100MHz-2kHz



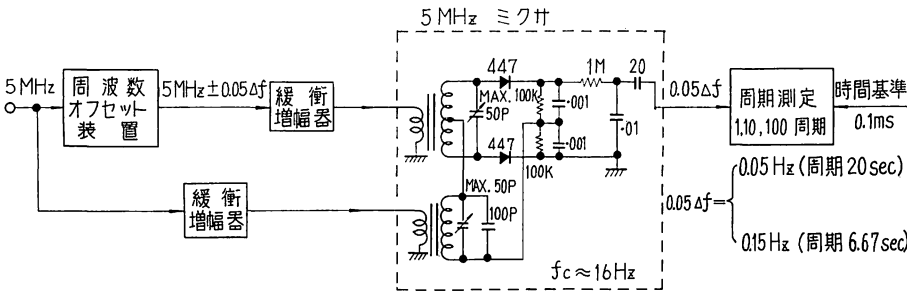
第8図(E) 100MHz-2kHz 対 100MHz

第8図 オフセット装置および各部の周波数安定度の測定方法

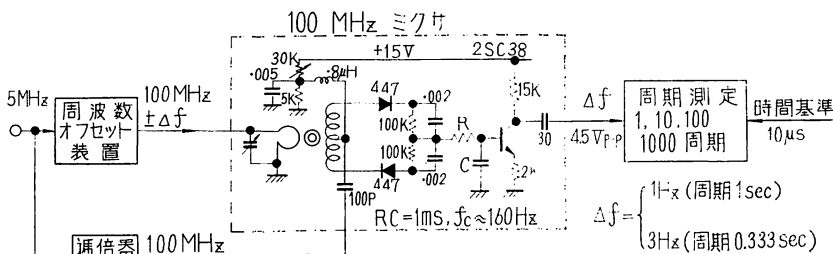
を除き 100個) に最小 2 乗法により直線をあてはめ，それからの変動の rms 値を $\Delta\tau$ とし，被測定信号の周波数変動の rms 値 Δf をとすれば，

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_B}{f} \cdot \frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{\Delta\tau}{T_B^2} \quad (1)$$

(1)式における $\Delta f/f$ ，すなわち，rms 値で表わした周波数変動率を周波数安定度の定義として採用する。周波数安定度の測定法を一括して第8図(A)―(E)に示す。

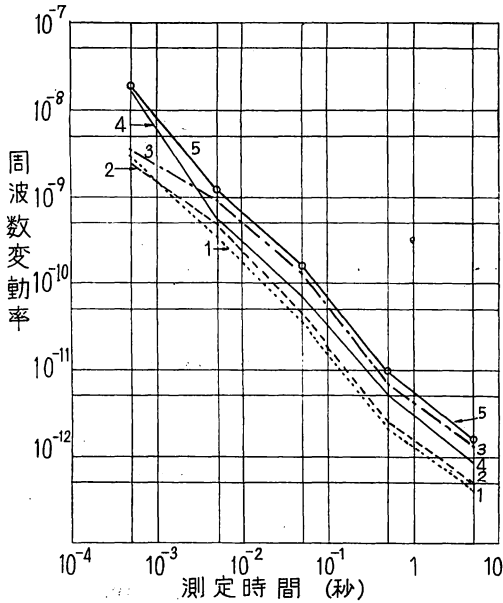


第8図(A) 入力 5MHz 対出力 5MHz ± 0.05 Δf



第8図(B) 100MHz 対出力 100MHz ± Δf

低周波基準 2 kHz および $2\text{kHz} + \Delta f$ の安定度はこれらの信号を直接カウンタに入れて多周期測定する。第9図曲線 1 および 2 はそれぞれ 2 kHz および 2.001 kHz の場合で，これらの安定度の影響がそのまま 100MHz 帯の信号の安定度に移されるものと仮定して図示してある（2個の位相制御式周波数変換器により，これら低周波基準信号の速い周波数変動成分は減衰するが，この装置の場合，測定時間 10msec 程

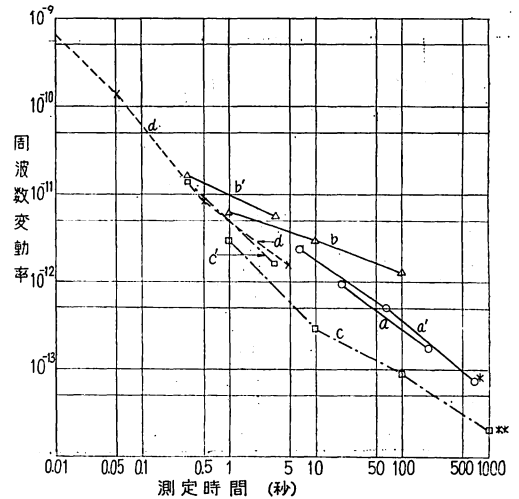


1. 基準 2kHz, 2. 基準 2.001kHz, 3. 第 1 位相制御式周波数変換器,
4. 第 2 位相制御式周波数変換器
5. $\sqrt{(2)^2+(3)^2+(4)^2}$ (オフセット装置の基準 100MHz に対する安定度推定曲線)

第 9 図 低周波基準周波数および位相制御式周波数変換器の周波数安定度

度以上では上の仮定にほぼ満足されると考えてよい)。2.003kHz についての測定結果もほとんど 2.001kHz の場合と同じであることを確認した。第 1 および第 2 位相制御式周波数変換器のそれぞれの入力 (高周波) 基準信号に対する周波数安定度の測定結果を同図の曲線 3 および 4 に示す(測定法第 8 図(D)および(E))。測定法から明らかのごとく、曲線 3 の第 1 位相制御式周波数変換器の安定度の測定値には低周波基準 2kHz の変動の影響が含まれるが、曲線 4 の第 2 変換器の場合はその変動は相殺される (前述のごとき測定時間の範囲で)。したがって曲線 2, 3 および 4 の各値の 2 乗和の平方根である曲線 5 はオフセット装置の基準 100MHz に対する安定度の推定値を示すものと考えてよい (それぞれの変動が相互に無関係と仮定)。

第 10 図はオフセット装置の安定度を示すもので、曲線 a および a' はオフセット値がそれぞれ 100×10^{-10} および 300×10^{-10} の場合、入力 5MHz に対する 5MHz オフセット出力の周波数安定度を示し、この装置の安定度を代表するものである (測定法第 8 図(A))。曲線 b および b' はそれぞれオフセット値 100×10^{-10} および 300×10^{-10} の場合のこの装置の 100MHz 出力の安定度の測定値を示し、第 8 図(B)の測定法から明らかのごとく、測定のための 5~100MHz 通倍器の位相変動の影響



- a 5MHz 入力対 5MHz+0.05Hz (測定法第 8 図(A))
- a' 5MHz 入力対 5MHz+0.15Hz (")
- b 100MHz 対 100MHz+1Hz (測定法第 8 図(B))
- b' 100MHz 対 100MHz+3Hz (")
- c 基準 100MHz 対 100MHz+1Hz (測定法第 8 図(C))
- c' 基準 100MHz 対 100MHz+3Hz (")
- d 第 9 図曲線 5 に同じ
- * データ数 46, ** データ数 36

第 10 図 周波数オフセット装置の周波数安定度

が追加され、測定時間 10 秒以上では曲線 a, a' に比較してかなり大きい。曲線 c および c' は同じオフセット出力、すなわち、100MHz+1Hz および 100MHz+3Hz の基準 100MHz に対する安定度を示し、第 9 図の曲線 5 (第 10 図では曲線 d) に対応するものである (測定法第 8 図(C))。曲線 c と曲線 a および a' の間に、測定時間約 10 秒以上で、かなり大きな差が見られるが、その原因として装置内部の 5~100MHz 通倍器 (第 3 図) および測定のための 5MHz 緩衝増幅器の位相変動が考えられる。5~100MHz 通倍器の位相変動は測定時間 10 秒で 10^{-13} ~ 10^{-12} 程度^{(2), (3)}とみてよいから、10 秒付近における曲線 a, a' と c, および a, a' と b の差は一応妥当と思われる。これに反し、測定時間 0.3~0.5 秒で曲線 b' と c' が近接していることから、上記の位相変動の原因としては温度、フリッカ雑音などが有力と思われる。

以上のように、とびとびのオフセット値ではなく、オフセット値を連続的に変化させたい場合に要求精度がさほど厳格でないならば、40~50kHz 位相制御発振器のかわりに、外部の発振器を使用することができる。この場合、オフセット値のばらつきよりも発振器の周波数変化によるオフセット値の変化が重要となる。第 3 図から

明らかなごとく、外部発振器 (40~50kHz) の 1 Hz の周波数変化は $2\text{kHz} + \Delta f$ の低周波基準では $5 \times 10^{-4}\text{Hz}$ の変化となり、100MHz帯における混合過程を考慮するとオフセット出力で 5×10^{-12} の変化に相当する。したがってオフセット値の要求精度に応じて外部発振器の周波数確度および安定度の規格をきめることが必要である。第11図はオフセット値 100×10^{-10} の場合、オフセット出力 $5\text{MHz} + 0.05\text{Hz}$ におけるオフセット誤差 (実

4. 結 言

(1) 周波数通倍による高周波の基準信号と、一般的な合成方法による低周波基準信号とを2段の位相制御式周波数変換器に加えることにより実験室における使用段階ではあるが、電子回路による周波数のオフセットを安定に行うことができた。

(2) 装置のオフセット値の周波数安定度は測定時間により大略次のごとくである。

- 1秒 : 1×10^{-11}
- 10秒 : $2 \sim 3 \times 10^{-12}$
- 100秒 : 3×10^{-13}
- 1000秒 : 1×10^{-13}

なお、長時間使用の場合、オフセット値の傾向的变化は5~10時間の実験の結果では 1×10^{-13} 程度以下であった。

(3) 装置の安定度は5~100MHz通倍器、位相制御式周波数変換器、および低周波基準の安定度に依存するが、現状では5~100MHz通倍器の影響が大きく、温度およびフリッカ雑音がその主要因と思われる。

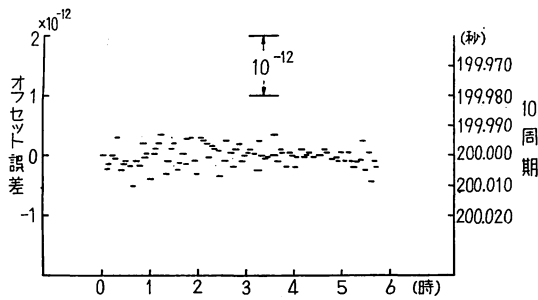
(4) 50×10^{-10} ステップ以外に 25×10^{-10} ステップのオフセットも可能である。これら以外に、中間の値を得るため40~50kHz位相制御発振器のかわりに外部の発振器を使用する場合は発振器の周波数較正、安定度の確認が必要であるが、オフセット誤差 1×10^{-11} までは可能と思われる。

(5) 装置の応用としてはA T (E T) → U T 2 の変換以外に短期間安定度の高いことを利用し、長波受信装置の試験、水晶発振器および原子周波数標準器の短期および長期安定度の測定、また簡単な周波数合成器と併用して精変 $10^{-13} \sim 10^{-11}$ の周波数精密調整など、精密計測に広い応用が考えられる。

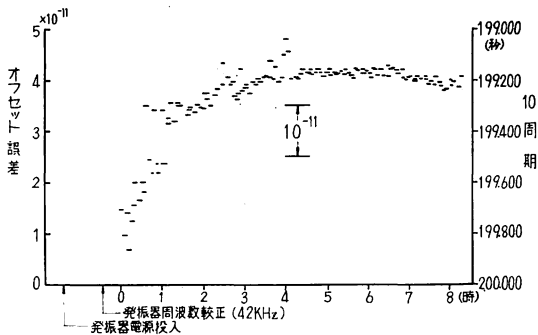
(6) 将来改良すべき点としては、まず装置の全固体化および長期間使用の場合の装置の信頼度をさらに向上させることが必要である。5~100MHz通倍も固体化により、安定度の向上が期待できる⁽⁴⁾。また、連続的なオフセット値を得るための外部発振器の影響をさらに小さくする方法について検討するとともに、低周波基準の合成方法を再検討し、簡単、確実化により、装置の安定度、信頼度の向上をはかることが必要である。

謝 辞

おわりに、御鞭達、御指導いただいている湯原次長および佐分利課長に感謝の意を表するとともに、実習性として実験に協力いただいた九州電波監理局 前田忠治技



(A) 40~50kHz 位相制御発振器使用の場合



(B) 外部発振器使用の場合

第11図 オフセット誤差の時間的変化 (オフセット出力周波数 $5\text{MHz} + 0.05\text{Hz}$)

際のオフセット値と所望のオフセット値との差)の時間的変化を示すもので、同図(A)は40~50kHz位相制御発振器による通常の場合、(B)は外部発振器を使用した場合である。図の各点はビート周波数0.05Hzの10周期の測定値で200秒がオフセット誤差0に対応する。(A)の場合、オフセット誤差の多数個の平均値はほとんど0とみなせるが、(B)では発振器(真空管自動式、規格は確度1%, A.C. 10%変化に対し周波数変化 3×10^{-5} 以内)の電源投入1時間後に周波数較正を行い、さらに約30分後に測定を開始し、発振器自身の温度が一定になるまでにさらに約3時間を要したが(この間室温ほとんど一定)、その後、オフセット値はほぼ一定となった。図のごとく、オフセット値の変化約 4×10^{-11} は発振器の周波数変化の実測値と完全に対応した。

官、電子計算機の運用に当たられた方々、実験に協力いただいた計測係および標準値係の方々、ならびに標準課各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) J. Barnes, A. Wainright; "A Precision Pulse-Operated Electronic Phase Shifter and Frequency Translator," Proc. IEEE (Correspondence), 53, pp. 2143—2144, December 1965.
- (2) 安田嘉之, 原田喜久男, 佐分利義和, 小林正紀, 島田敏行; "周波数通倍器の位相変動," 電波研季報, 9, No. 40, January 1963.
- (3) 安田嘉之; "水晶発振器の短期間周波数安定度の測定," 昭和41年電気四学会連合大会 1746.
- (4) 宇都宮敏男, 吉村和幸; "可変容量ダイオードを用いた通倍の位相変動," 昭和41年電気四学会連合大会 1336.

