

V-1. ローカル系位相安定度の改善

小宮山牧児*

IMPROVEMENT OF FREQUENCY STABILITY OF LOCAL OSCILLATORS

By

Bokuji KOMIYAMA

1. ローカル発振器の周波数安定度

V L B I 局のローカル発振器に必要とされる条件として、次の3点が挙げられる⁽¹⁾。

- (1) 同期をとるための時刻信号が得られ、かつ、それが数マイクロ秒以内で合っていること。
- (2) 約5時間にわたる観測時間（数個の電波源を含む一連の実験をするときに必要となる。）で、時刻信号のオフセット誤差が $\pm 10^{-9}$ 秒以下であること。これが満足されていると、一つのV L B I 局で記録された信号の相対的なタイミングは、すべて、同じ初期値オフセット誤差をもつことになる。
- (3) 位相変動が十分小さいこと。通常1分内外であるコヒーレンスタイム内で、平均して少なくとも1 rad 以下であること。

以上の条件のうち、(1)の点については、これから述べる高安定信号源については、現在の周波数合成技術と、ロランC電波等を用いれば容易に達成できるので、ここでは、主として(2)と(3)の条件に関することを述べる。

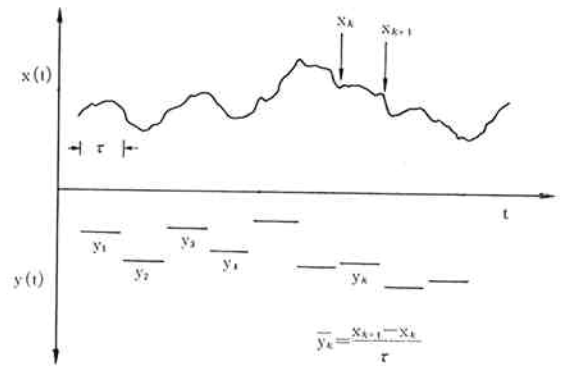
2. 周波数安定度の定義

信号源の出力波形は、(1)式で表すことができる。

$$v \equiv A_0 \cos [2\pi\nu_0 t + \varphi(t)]. \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 A_0 : 振幅, ν_0 : 中心周波数, $\varphi(t)$: 瞬時位相である。

位相値及び周波数変動成分を ν_0 で規格化したものを $X(t), y(t)$ とすると、



第1図 対の発振器間の規格化された位相変動 $X(t)$ 、及びこの位相変動の τ 秒平均から計算した規格化された周波数変動のシュミレーション。

$$X(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi\nu_0} \quad \dots\dots(2)$$

$$y(t) = \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi\nu_0} = \dot{X}(t) \quad \dots\dots(3)$$

となる。周波数カウンタで測定されるのは、第1図にあるように、常に平均周波数であるので、 $y(t)$ の τ 秒平均値 \bar{y}_k は、次式で支えられる。

$$\bar{y}_k \equiv \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt = \frac{X(t_k+\tau) - X(t_k)}{\tau} \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 $t_{k+1} = t_k + T$, $k=0, 1, 2, \dots$ で T は τ 秒測定の繰り返し周期である。通常、第1図にあるように、 $T = \tau$ (測定に空き時間が無い。)として求めた、

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \right\rangle \quad \dots\dots(5)$$

を Allan 分散と呼び、時間領域における周波数安定度の定義として用いられている。ここで、 $\langle \rangle$ は無限時間平均を示す。

前節1.で述べたようにV L B I では、時刻信号の誤差がしばしば問題となる。(2)式からわかるように、 $X(t)$ は、(1)式の信号から得られる時計の誤差そのも

*周波数標準部周波数標準値研究室

ので、単位は秒である。時刻 t_0 における τ 秒後の $X(t)$ の推測誤差 $\hat{X}(t_0+\tau)$ として、現在の t_0 における時刻誤差 $X(t_0)$ に、時間の変化率から導かれる補正量を加えて推測する方法が度々用いられている。すなわち $\hat{X}(t_0+\tau)$ は、次式で $X(t)$ の過去の歴史と関係づけられる。

$$\hat{X}(t_0+\tau) = X(t_0) + \tau \frac{X(t_0) - X(t_0 - T)}{T} \dots\dots(6)$$

$T=\tau$ とするのが一般的であるが、このとき推測の2乗誤差は、

$$\langle [X(t_0+\tau) - \hat{X}(t_0+\tau)]^2 \rangle = 2\tau^2 \sigma_y^2(\tau) \dots\dots(7)$$

となる。したがって、時刻安定の尺度として $\sigma_x^2(\tau)$ を次式で定義できる。

$$\sigma_x^2(\tau) \equiv \tau^2 \sigma_y^2(\tau) \dots\dots(8)$$

ただし、式(7)と比較してわかるように、この尺度は実際

の誤差より、半分ほど楽観的な尺度である。式(8)を、前項1.の(2)の条件に当てはめると、 $\tau=18000$ 秒で $\sigma_x=10^{-9}$ 秒であるから、必要とされる周波数安定度は 5.5×10^{-14} となる。

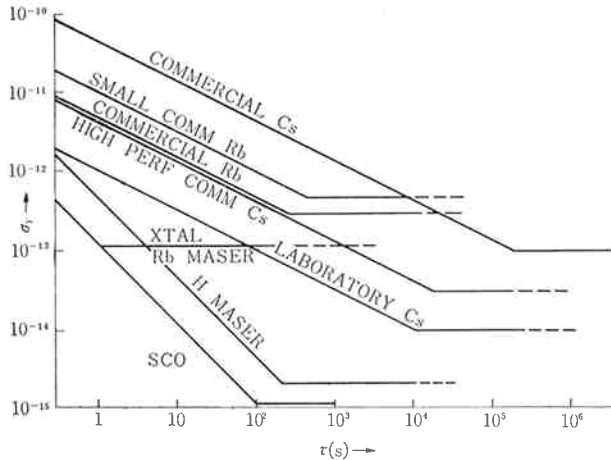
また、位相ゆらぎ $\overline{\Delta\phi^2}$ は、次式で予測できる。

$$\overline{\Delta\phi^2} = 4\pi^2 \nu_0^2 \sigma_x^2(\tau) = 4\pi^2 \nu_0^2 \sigma_y^2(\tau) \dots\dots(9)$$

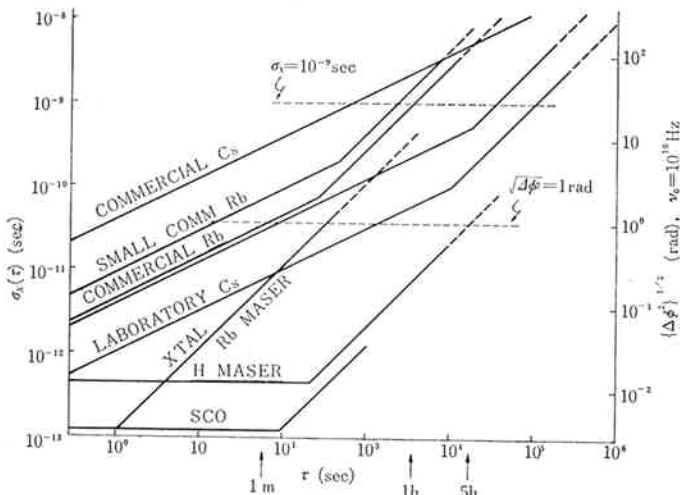
(9)式は、受信する電波源の周波数が大きくなると、 $\sqrt{\Delta\phi^2} < 1 \text{ rad}$ を満足させる条件が厳しくなることを示している。

3. 高安定信号源の概略

等2図に、各種高安定信号源の周波数安定度を示す。この図から、 τ の短い領域では、水晶発振器とSCO(超伝導空洞安定化発振器)、そしてRbメーザが優れており、 τ の中ぐらいの領域では、水素(H)メーザと



第2図 各種周波数標準の周波数安定度 (文献(4)より引用)



第3図 各種周波数標準の時刻及び位相のゆらぎ。

第1表 現在利用できる周波数標準の特性 (文献(4)より引用)

※ S C Oについては、近い将来実現できる値を示した。

	価 格 (K \$)	大 き さ (l)	重 さ (lb)	消 費 電力(W)	周 波 数 安 定 度		
					$\tau=1$ s	floor	ドリフト (per day)
X-tal	0.7~3	1	1	3	10^{-11}	10^{-11}	10^{-10}
Rb (gas cell)	3.5~8	1	2	15	10^{-11}	10^{-12}	10^{-12}
Cs (tube)	15	20	40	30	10^{-11}	10^{-13}	10^{-14}
H (maser)	100	100	90	20	10^{-12}	10^{-14}	10^{-14}
※ S C O	20	100	100	100	10^{-13}	10^{-16}	10^{-13}

S C Oが断然優れており、非常に長期の τ の領域ではCs優れている。Rb標準(ガスセル型)は、 τ のいかなる領域でも、特に優れてはいないが、第1表に示すように安定度、価格、大きさの組合せで評価したときは優れている。第3図は、第2図のデータを用いて計算した $\sigma_x(\tau)$ を示している。また、 $\nu_0=10$ GHzとしたときの $\overline{4\phi^2}$ のスケールも同時に示してあるが、これは通信等の周波数合成によって、元の $\sigma_y(\tau)$ は劣化しないものとして計算している。この図から本章1.のV L B Iに必要な条件を余裕をもって満足しているのは、Laboratory Cs, Hメーザ、それに長期の τ についてのデータは得られていないが、S C Oの三つであることがわかる。

第1表は、今日、利用できる高安定発振器の安定度と物理的特性を表示したものである。floorとあるのは、第2図にあるように、すべての発振器はフリッカFMのために σ_y が τ に無関係に一定になるが、この領域の σ_y の値である。ここで注意しなければならないのは、第2図では、各種標準に対して、安定度以外の諸条件を無視して得られた最高の安定度が示されているということである。一方、第1表のデータは、他の動作条件と安定度を込みにして得られた値である。したがって、第1表の値は同じ機種では必ず実現できる。S C Oについてのデータは、近い将来実現可能な値を示したものである。

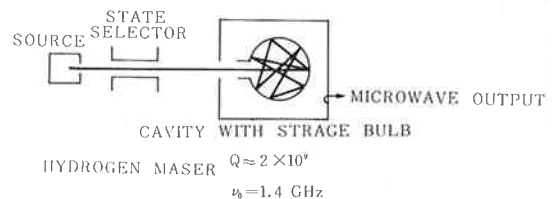
第1表と、第1図から、高安定信号源の選択は実際の実験上の要求により、種々の要素を考慮して、注意深く行う必要があることがわかる。例えば、短期及び長期にわたり非常に良い安定度を得たいときは、価格、大きさ、重量等の制限が無いとすると、水晶発振器とCs標準の組合せが優れている。このように、システムとして取り扱うことは、設計上強力な問題解決手段となり、技術的には、システムの個々の素子の性能を損なうことなく実現できる。

4. ローカル発振器として有望な周波数標準

前項3.で述べたように、V L B Iに必要な条件を十分に具備している標準として、Hメーザ、Laboratory Cs, S C Oがあるが、Laboratory Csは1次標準器として設計されているので実用面では一般的ではない。ここでは、今日既に利用できるHメーザと、今後、ローカル発振器として極めて有望なS C Oについて詳しく述べてみる。

4.1 Hメーザ

Hメーザは、第4図に示すように、むしろ単純な装置



第4図 Hメーザ原理図(文献(5)より引用)

である。水素分子のRF放電によって生じた水素ビームが6極マグネットにより準位を選択され、テフロンコーティングを施した石英の蓄積バルブに入る。このバルブがマイクロ波空洞の中に入っている。ここで、空洞損失が十分小さく、準位選別された水素ビームの強度が十分大きいと自励発振が生じ、マイクロ波を発生する。このマイクロ波が、水晶発振器を水素発振周波数にlockするために用いられる。HメーザのQ値は、従来の周波数標準の中で最も高く、典型的には 2×10^9 である。これが、Hメーザの周波数安定度が、第2図にあるように格段に良い理由である。

Hメーザの真空室の基礎的な設計は、ビーム系を含む1室と、蓄積バルブを含む1室の合計、2室からなる方式が伝統的である。一方、1室設計により、サイズの大大幅な縮小が可能になり、宇宙飛行用に用いられている。第1表のHメーザは、1室設計のものである。

Hメーザは将来、floorを 15^{-15} 以下にすることが可能である。サイズが、宇宙飛行用に現在利用されているものより、更に軽減できるかは疑問である。

4.2 SCO

SCOは最近研究、開発されている発振器で、原理図を、第5図に示す。これは、超伝導空洞共振器(SC)の値が、Q常温の空洞共振器と比較してはるかに大きくなり得ることに着目して、SCを周波数弁別器として用い、その誤差信号で、ガン発振器のようなマイクロ波帯の発振器をlockしたものである。

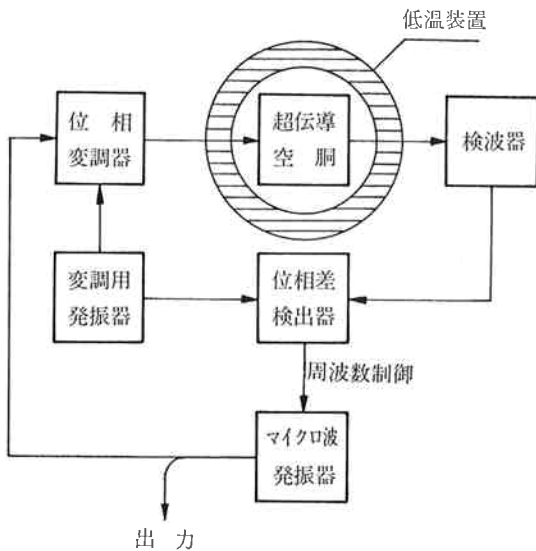
空洞共振器のQは、空洞壁の表面抵抗に逆比例する。マイクロ波帯では、超伝導体の表面抵抗は臨界温

度以下では、温度に対して指数的に減少するが、実際のSCでは、この性質は絶対零度まで保たれず、ある温度以下では、Qは飽和値に達する。現在のQ値の最高として、 1×10^{11} が報告されている⁽⁶⁾。Steinらは、負荷Qが 10^{10} 、中心周波数が8.9GHzのNbで製作したSCで、ガン発振器を安定化し、 $\tau = 10 \sim 1000$ 秒で、floorとして $\sigma_{\eta} = 6 \times 10^{-16}$ を得たことを報告している⁽⁷⁾。これは、現存する発振器の中で最も良い安定度である。

SCOは、第1表にもあるように商品としての設計が可能であり、 τ の比較的長い領域(10~100秒)では、最も安定度の良い発振器になるであろう。それゆえ、SCOは、VLBIでの利用はもとより、スペクトラム純度の良いことから、遠赤外領域における周波数逡倍、合成の信号源として大きな期待が寄せられている。

参考文献

- (1) W. K. Klemperer; "Long-baseline radio interferometry with independent frequency standards", Proc. IEEE, **60**, No. 5, p. 602, May 1972.
- (2) J.A. Barns, A.R. Chi, et al; "Characterization of frequency stability", IEEE Trans. on Instr. and Meas. **20**, 2, p. 105, May 1971.
- (3) 電気学会技術報告(II部)第41号, 昭和51年2月。
- (4) H. Hellwig; "A review of precision oscillators", NBS Technical Note 662 Feb. 1975.
- (5) H. Hellwig; "Atomic frequency standards: a survey", Proc. IEEE, **63**, p. 212, Feb. 1975.
- (6) S.R. Stein; "Application of superconductivity of precision oscillators", Proc. 29th Annual Symp. on Freq. Contr., p. 321, May 1975.
- (7) S.R. Stein and J. P. Turneaure; "Superconducting-cavity stabilized oscillators with improved frequency stability", Proc. IEEE, **63**, p. 1249, Aug. 1975.



第5図 SCO ブロック図

