テレビジョン映像搬送波の高精度周波数源としての利用検討

正会員 大内 智 晴^{†*}

Studies on Television Video Carrier Frequency for Precise Frequency Source

Chiharu Ohuchi[†]

Abstract Many TV stations use Rubidium atomic frequency oscillators (Rb OSC) to generate the chrominance sub-carrier frequency (F_{sc}). F_{sc} is widely used for practical frequency distribution and comparison. Compared to other frequency standards, F_{sc} has more advantages vis-a-vis complexity of instrumental equipment and measuring time. On the other hand, more and more video carrier frequencies (F_v) of TV stations are stabilized by the Rb OSC, and the F_v can be used for new frequency standards.

This paper compares F_v and F_{sc} for frequency stability and accuracy. Experiments show F_v stability is about 5 to 20 times superior to, but less accurate than F_{sc} which is periodically calibrated. It is clear from this study that F_v has priority for use as a highly accurate practical frequency standard with periodical calibration.

1. ま え が き

現在、多くのテレビジョン (TV) 放送局では、映像同期信号の基準信号源にルビジウム原子発振器 (Rb 発振器) を使用している。そこで Rb 発振器を使用している TV 放送を受信し、その色副搬送波周波数 (f_{sc}) を仲介して離れて置かれた発振器相互の周波数を比較すること (周波数比較) や、 f_{sc} を高精度の基準周波数源として発振器や周波数カウンタの較正等に利用すること (周波数分配) は、標準電波などに比べ、短時間の測定で高い精度が期待できることから、各方面

で広く行われている^{1)~4)}。現在東京タワーから放送される TV 放送波の f_{sc} は、ほぼ 1×10^{-10} 以上の周波数精度となっている。また、その値も定期的に測定・公表されているので⁵⁾⁶⁾、周波数の絶対値をより正確に求めることも可能になっている。

ところが近年、多くの TV 放送局で、TV 放送の映像搬送波 (f_v) の基準信号源にも Rb 発振器が使われるようになってきたことから⁷⁾⁸⁾、 f_v による周波数比較や周波数分配の可能性が出て来た⁹⁾。

本論文は、 f_v を f_{sc} に代る基準周波数源とすることを提案する。まず、 f_v を用いれば f_{sc} によるよりもさ

キーワード：テレビ放送、映像搬送波、色副搬送波、周波数安定度、周波数精度

1990 年 12 月 3 日受付、1991 年 8 月 19 日再受付

[†] 郵政省 通信総合研究所 (〒184 小金井市貫井北町 4-2-1, TEL 0423-27-7495)

* 現在、宇宙開発事業団 (〒105 港区浜松町 2-4-1, TEL 03-5470-4388) に出向中

[†] Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications (4-2-1, Nukui-kita, Koganei shi, Tokyo 184, Japan)

* Proceed to National Space Development Agency of Japan (Hamamatsu-cho, Minato-ku, Tokyo 105, Japan)

らに高い精度が期待できることを示し、次に実際に TV 放送の f_v および f_{sc} を測定して、その周波数安定度と確度を測定した結果を論じる。最後に実用化のための検討を行う。

2. f_v と f_{sc} の比較

2.1 f_v と f_{sc} の安定性の検討

基準周波数源の優劣は、その安定度で判断される。そこで、TV 変調波から取出される f_v と f_{sc} の振幅比を求め、これより安定度を評価する。

TV 映像信号は直流を含む信号であるため、解析的に変調波の搬送波成分や側波帯成分を求めることが困難である¹⁰⁾。そこで、図 1(a) に示す映像信号の変調波形を考える。すなわち水平走査線ごとに映像信号の局性を反転させた、直流分を含まない信号で 100% AM 変調したとする。このようにしても、図 1(b) の区間 A は通常の TV 信号変調波形と変わらない。ここで振幅 0.5 の線が変調信号の中心であり、無変調時の搬送波の振幅 (A_c) である。

図 1(a) の通り、カラーバースト部の振幅は 40 IRE である。一方、映像信号の最大振幅は 160 IRE である。ゆえに、全体を変調度 100% で変調すれば、図 1(b) に示すようにカラーバーストの変調度は 25% になる。また、変調波の振幅が最大になるのは同期信号尖頭部で、その振幅は $2A_c$ である。ここで、振幅 A_c の搬送波に、色副搬送波を変調度 m_a で AM 変調すると、その側波帯の振幅は $m_a \cdot A_c / 2$ となる¹¹⁾。これより、同期尖頭部の振幅 (E_{sync}) とカラーバースト成分の振幅 (E_b) の比は、

$$\begin{aligned} E_{sync} : E_b &= 2A_c : m_a \cdot A_c / 2 \\ &= 2A_c : 0.25 \cdot A_c / 2 = 16 : 1 \end{aligned} \quad (1)$$

図 1 擬似映像信号(a)とその変調波形(b)
Artificial video signal (a) and its modulated waveform (b).

となる。このことから、映像変調波の同期信号尖頭部である水平および垂直同期パルス部分の f_v を抜き出して利用すれば(同期尖頭方式)、同じくカラーバースト部を抜き出す f_{sc} よりも 16 倍大きな信号を得ることができる。ここで、TV 変調波中の f_{sc} は単側波帯で送られているから、TV 信号を復調することによる SN 比の変化はない。よって f_{sc} に比べて f_v の方が、電圧比で 16 倍 SN 比が高くなっている。周波数の安定度は、信号強度とその周りの位相雑音の関係で決まるから¹²⁾、SN 比が高いことは周波数安定度が高いことを意味する。

次に、変調波を水平走査周波数よりも帯域幅が狭い帯域通過フィルタ(BPF)に通して搬送波を抽出し、リミッタにより f_v を再生する方式(リミッタ方式)について考える。この方式では、図 1 の A 区間の平均振幅を取出すことになるので、BPF の出力レベルは映像信号の内容に応じて変化する。そこで代表的な平均映像振幅(APL)について f_v の平均振幅を求め、SN 比の検討を行う。なおリミッタは、出力の振幅を一定にする増幅器であり、入出力の SN 比は変化しない。

まず、1 フレームの映像信号中で同期信号尖頭レベル、ペダスタルレベル(図 1(a)の振幅 0 [IRE] のレベル)および映像信号レベルが占める時間率を計算し、次に TV 変調波におけるそれらのレベルに対応する振幅を求めて 1 フレーム期間について平均すれば、表 1 の(1)欄の通り同期尖頭値に対する各 APL 時の TV 変調波平均振幅が求められる。表 1 の(2)欄は、各 APL 時の TV 変調波平均振幅と、カラーバースト成分の振幅を比較した結果である。このように、リミッタ方式では同期尖頭方式に比べて振幅が小さくなるが、なお f_{sc} に対して 12.3~4.5 倍の差があり、 f_v の方が周波数安定度が高いことがわかる。

2.2 マルチパス妨害に対する検討

受信 TV 信号にマルチパス(ゴースト)妨害がある場合について考える。同期尖頭方式では、 f_v の検出

表 1 TV 変調波の平均振幅とカラーバースト成分との振幅比
Ratio of mean amplitude to color burst component in TV modulated signal.

映像信号振幅 (APL) (%)	(1) TV 変調波の平均振幅*	(2) カラーバースト成分との振幅比
0	0.771	12.34
50	0.526	8.42
100	0.281	4.50

* 同期尖頭値を 1 とする

図 2 f_v 同期発振器の系統図
Block diagram of F_v synchronized oscillator.

部における妨害波のレベルは希望波と妨害波の同期信号部分が一致したときに最大となり、その割合は受信入力の DU 比と等しくなる。またその他の場合には DU 比よりも小さくなる。すなわちゴースト妨害による f_v の SI 比と受信入力の DU 比の関係は、

$$(S/I)_{f_v} \geq (D/U) \quad (\text{同期尖頭方式}) \quad (2)$$

となる。一方、リミッタ方式では、TV 信号の 1 レーム期間を平均すれば SI 比は DU 比と等しくなる。よって、

$$(S/I)_{f_v} = (D/U) \quad (\text{リミッタ方式}) \quad (3)$$

となる。

次に f_{sc} について考える。TV 信号では、カラーバーストよりも映像信号中の色副搬送波の方が振幅が大きい場合がある。このような映像がゴーストになると、 f_{sc} 検出部の SI 比は受信入力の DU 比よりも小さくなる。すなわち、

$$(S/I)_{f_{sc}} < (D/U) \quad (4)$$

である。また一般に TV の変調信号は絶えず変化しているので、カラーバーストと、ゴースト波の色副搬送波との合成位相も絶えず変化する。この点も f_v に比べて f_{sc} の安定度が劣る原因になる。

航空機等の移動する物体からの反射波により、ゴーストが急激に変動するフラッタ妨害では、ゴースト波の強度や遅延時間が時間的に変化する。そのため DU 比および希望波と妨害波の合成位相が時々刻々変化する。このため f_v および f_{sc} の安定度が劣化する。この場合にも、(2)～(4)式の関係から f_{sc} は f_v より強い妨害を受ける。

2.3 考 察

TV 信号中の f_v と f_{sc} の受信信号強度について比較を行った結果、 f_v の方が最高 16 倍 SN 比が高く、周

波数再生における安定度が高いことがわかった。また、ゴーストやフラッタなどのマルチパス妨害がある場合にも、 f_v の方が SN 比が高く、安定度が高いことがわかった。次に、実際に TV 放送波を受信して周波数安定度の測定を行った結果を示す。

3. 周波数安定度の測定

3.1 測定方法

図 2 は、 f_v 測定系の系統図である。測定方式はリミッタ方式である。図 2 において、受信した TV 放送波は周波数変換部で中間周波数帯 (IF) に周波数変換され、帯域通過フィルタとリミッタにより f_v を再生する。一方、周波数変換に用いた局部発振周波数は、電圧制御水晶発振器 (VCXO) の出力から作られる 2 MHz の高調波により周波数変換され、フィルタで 5.5 MHz 成分が取り出される。これを再生された f_v と混合して局部発振周波数の偏差や変動を取除いたうえで VCXO を同期させると、 f_v の周波数偏差や変動だけが含まれた 10 MHz の出力が得られる。本測定系の特徴は、実際の局部発振周波数に関係なくその変動成分のみを 5.5 MHz に移し換えるところにある。これにより、局部発振周波数を変えるだけで任意のチャンネルを測定することができ、多数の放送波を長期間測定するのに便利である。

f_{sc} の測定には、図 2 に示すように周波数変換部の出力を分岐して復調し、映像信号を取出してゲンロック発振器で f_{sc} を再生する。しかし f_{sc} の周波数は 3.579545……MHz であり、測定に際し取扱いが不便である。そこで VCXO を用いて f_{sc} に同期した 10 MHz を作り、これを測定する。以下 f_v および f_{sc} の測定は、すべてこれら 10 MHz について行う。

図3 f_v および f_{sc} の位相測定結果
Measured phase fluctuation of F_v and F_{sc} .

図4 f_v および f_{sc} の周波数安定度
Frequency stability of F_v and F_{sc} .

測定は、東京タワーから送信されるTV放送を東京都小金井市の通信総合研究所で受信し、 f_v および f_{sc} に同期した10 MHzを、セシウム周波数標準から作られる高安定な10 MHzと位相比較することにより行った。位相比較器の出力はAD変換して計算機に取り込み計算により安定度を求めた。放送波の伝搬距離は約24 kmである。測定した放送局は1, 3, 4, 6, 8, 10, 12チャンネルの計7局で、1回の測定時間は、各チャンネルについて f_v, f_{sc} 各々15分である。

3.2 測定結果

図3は、同じ日に測定した10チャンネルの f_v および f_{sc} の位相測定例である。実際の測定結果には、放送波とセシウム周波数標準との周波数差に相当する1次傾斜が含まれるが、ここではそれを除いて表示している。図3から明らかなように、 f_v の方が雑音が少ない。また f_{sc} の測定結果には、測定開始直後の部分などに、航空機によるフラッタ妨害がみられるが、 f_v の測定結果には現れていないことから、SN比が高いことがわかる。

次に、 f_v および f_{sc} の周波数安定度を定量的に評価

する。周波数の安定度は、(5)式または(6)式の2標準標準偏差で表される^{12)~14)}。

$$\sigma_Y(\tau) = \sqrt{\left\langle \frac{[\phi(k+1) - \phi(k)]^2}{2(2\pi\nu\tau)^2} \right\rangle} \quad (5)$$

$$\sigma_Y(\tau) = \sqrt{\left\langle \frac{[\phi(t+2\tau) + \phi(t) - 2\phi(t+\tau)]^2}{2(2\pi\nu\tau)^2} \right\rangle} \quad (6)$$

$\phi(k)$: 角周波数変動量

$\phi(t)$: 瞬時位相

ν : 公称角周波数

τ : 平均化時間

$\langle \rangle$: 無限時間平均

ここで、(5)式は周波数測定、(6)式は位相測定による場合で、両者は等価である。平均化時間(τ)は、周波数の測定では周波数カウンタの測定時間(ゲート時間)である。また、測定は時間を置かずに続けて次々に行われるものとする。

図4は、1および10チャンネルの測定データより求めた f_v および f_{sc} の周波数安定度である。他のチャンネルについてもほぼ同様の測定結果が得られている。これより、 f_v は平均化時間10秒で 1×10^{-11} の安定度となっている。この値は、標準電波やロランCあるいは f_{sc} など、現在使われている電波による周波数分配方法の中で最も安定度が高い¹⁾。図4より、 f_v の方が f_{sc} よりも5~20倍程度安定であることがわかる。ここで、 f_v と f_{sc} の安定度の差が理論値を上回るのは、番組やカメラの切替で f_{sc} の位相や周波数が変わる場合があることや、マルチパス妨害で f_{sc} の安定度が劣化するためと考えられる。また f_v の方が、測定ごとのばらつきが少なくなっていることも同じ理由によると考えられる。

以上の測定結果から、 f_v は f_{sc} よりも安定度が高いことが明らかになった。なお図4で f_v と f_{sc} の2標準標準偏差は f^{-1} の傾きをもっている。このことは、 f_v および f_{sc} が白色周波数変動していることを示している。この場合の2標準標準偏差 $\sigma_Y(\tau)$ の値は、通常の標準偏差 σ と等しい¹²⁾。

4. 周波数確度の測定

4.1 測定方法

周波数確度は、図2の測定系から出力される f_v および f_{sc} に同期した10 MHzと、国家標準のセシウム周波数標準から作られた9.99 MHzを混合してビート周波数である10 kHzを取り出し、それをセシウム周波数標準を基準タイムベースに用いた周波数カウンタで測定することにより求めた。これより、 f_v および f_{sc} の周波数は、国家標準の確度で測定される。また

表 2 f_v および f_{sc} の周波数精度
Frequency accuracy of F_v and F_{sc} .

チャネル*		精度 ($\Delta f/f$) ($\times 10^{-10}$)		
		1986年4月10日	1988年3月19日	1990年9月3日
1	f_v	2.65	3.818	1.367
	f_{sc}	-0.681	-0.155	0.400
3	f_v	2.63	3.810	1.446
	f_{sc}	-0.100	-0.140	0.501
4	f_v	27.8**	-12.80**	-0.030
	f_{sc}	0.003	-0.078	-0.050
6	f_v		2.576	3.373
	f_{sc}		1.149	0.180
8	f_v	-21.2	-23.95	-0.057
	f_{sc}	0.373	0.828	0.256
10	f_v	4.37	6.610	1.535
	f_{sc}	0.023	0.146	0.134
12	f_v		453.0**	-517.09**
	f_{sc}		3047.0**	-4769.94**

* 東京タワーからの放送.

** ルビジウム発振器を使用していない.

測定には、表示分解能が 10 桁/秒のレシプロカル方式の周波数カウンタを使用した。これにより 1 秒間の測定で 1×10^{-12} の周波数偏差まで測定でき、被測定信号の安定度と比べて十分な精度である。

4.2 測定結果

表 2 に、東京タワーからの TV 放送の f_v および f_{sc} を測定した結果を示す。ゲート時間 100 秒の測定を 5 回繰り返し、その平均を示している。6 および 12 チャンネルは 1987 年 4 月から測定を行っている。12 チャンネルの f_v および f_{sc} と 1988 年までの 4 チャンネルの f_v は、Rb 発振器を使用していないので、周波数精度が悪くなっている。表 2 より、 f_v および f_{sc} の周波数は極めて正確であることがわかる。例えば 1990 年 9 月 3 日の 10 チャンネルの f_v は、指定周波数の 205.25 MHz より、32 mHz 高くなっているにすぎない。なお、1986 年および 1988 年の 8 チャンネルの f_v は、Rb 発振器を使用しているが、他に比べて精度が異常に悪い。この点に関して当時調査を行ったが、原因は不明であった。

Rb 発振器による最近の f_v は、おおむね 1×10^{-10} 程度の精度を有しているが、平均的には f_{sc} の方がより正確である。これは、 f_{sc} については周波数の偏差が 1×10^{-10} を越えないよう、定期的に較正を行っているためである。Rb 発信器の周波数長期安定度は $2 \times$

図 5 f_v と f_{sc} の測定結果 (ゲート時間 10 秒)
Measured F_v and F_{sc} (gate time=10s).

10^{-11} /月程度であるので¹⁵⁾、 f_v についても半年に 1 回程度の較正を行うことで、 f_{sc} と同様に 1×10^{-10} 以上の周波数精度を維持できると考えられる。また現在 f_{sc} について行われているように、 f_v の値が定期的に公表されれば、測定結果を補正することができ、より正確な値を知ることが可能である。さらに、送信所の f_v 用発振器を、演奏所からの f_{sc} に位相同期して周波数精度を維持したり¹⁶⁾、電話回線を利用して周波数標準に合わせる¹⁷⁾ ことで、より高精度な実用周波数標準とすることが可能と考えられる。

表 2 は、ゲート時間 100 秒という比較的長時間の測定を繰返し行った結果であるが、実用的には 10 秒程度が、周波数カウンタによる測定の限度と考えられる。そこでゲート時間を 10 秒とし、10 チャンネルの f_v と f_{sc} を交互に連続して測定することを試みた。その結果を図 5 に示す。理論検討ならびに図 4 に示した安定度の違いから予想される通り、 f_{sc} に比べて f_v の測定結果にはばらつきが少ない。このことから、実用基準周波数源として、 f_v の方がよりすぐれていることが明らかである。

一例として、定期点検等で TV 中継局の送信周波数を指定周波数に合わせる場合を考える。対象とする中継局は、精密オフセット放送局および TV 同期放送局とする。またここでは、 f_v および f_{sc} の周波数精度は十分に高いものとする。精密オフセット放送では、 f_v を指定周波数の ± 2.5 Hz 以内に、また TV 同期放送では ± 0.05 Hz 以内に維持しなければならない。これは、10 チャンネルでは各々 $\pm 1.2 \times 10^{-8}$ および $\pm 2.4 \times 10^{-10}$ の許容周波数偏差である。

図 4、図 5 より、精密オフセット放送では f_v 、 f_{sc} のどちらを基準に用いても、10 秒間の測定で許容偏差に比べて十分な測定精度になる。一方、同期放送の場合は、10 秒間の測定では f_{sc} を用いると測定値のばら

つきが許容偏差と比べて無視できないので、より長時間の測定を行う必要がある。これに対し f_v を用いると、10秒間の測定で十分な精度を得ることがきる。このように、高精度の測定では基準信号源の安定性が重要である。

5. む す び

TV放送波の f_v と f_{sc} の周波数安定度について検討し、基準周波数源としては f_v の方が最高16倍受信SN比が高く、またマルチパス妨害の影響も受けにくいいため、すぐれていることを示した。また実際に測定を行い、 f_v の方が5~20倍安定な周波数を再生できることを示した。さらに、 f_v と f_{sc} の周波数確度を測定した結果、東京タワーからの放送の中で、Rb発振器による f_{sc} は 1×10^{-10} 以上、 f_v はおおむね 1×10^{-10} 程度の確度を持つことが明らかになった。なお本論文での f_v 測定は、リミッタ方式を用いている。残された課題は、同期尖頭方式による測定を行い、リミッタ方式よりも高い安定度が得られることを確認することである。

f_{sc} による周波数比較・分配はすでに多方面で利用されており、簡便性と実用性の点で優れた方法であるが、 f_v の安定度はこれをしのぎ、より高安定な周波数比較・分配の手段となりうるということがわかった。特に周波数カウンタを用いる測定では、ゲート時間は10秒程度が実用的な限界と考えられるから、高い測定精度を必要とする用途には f_v の利用が有利である。また f_{sc} では、番組の切り換え等で周波数や位相が変化する場合があり、測定には注意が必要であるが、 f_v にはこのような問題はなく、いつでも測定ができるという利点がある。一方、 f_v を利用するためには、 f_v をRb発振器で安定化した放送波が受信できなくてはならないことや、測定用の受信機を必要とすることが欠点としてあげられる。

今後 f_v についても定期的にその周波数を公表することや、 f_v 用のRb発振器を較正し、 f_{sc} と同等の確度を維持することが望まれる。

【参 考 文 献】

- 1) 佐分利, 安田, 小林, 佐藤: “TV信号を利用した時刻と周波数の精度比較”, 電波研季報, **18**, 99, pp. 433-444 (1972)
- 2) 佐藤, 小林: “標準周波数と時刻の供給 5. テレビ電波仲介による供給”, 電波研季報, **29**, 149, pp. 291-299 (1983)
- 3) 佐々木, 小川, 伊藤: “テレビジョン信号を利用した周波数の精密遠距離比較”, 信学論, **J66-B**, 9, pp. 1108-1114 (Sep. 1983)
- 4) 石川, 大内, 都竹, 小宮: “伝搬によるカラーサブキャリアの位相変動”, テレビ学技報, **7**, 33, RE83-60, pp. 7-12 (Dec. 1983)
- 5) “「TV同期パルスとカラーサブキャリアの測定値」について”, 信学誌, **65**, 3, pp. 327-378 (Mar. 1982)
- 6) 信学誌, ニュースのページ
- 7) 山田, 浅井, 長尾, 上村: “全固体化10kW VHFテレビ放送装置”, 1986年テレビ大全, 10-3, pp. 245-246
- 8) 宮本, 小坂, 池田, 坂本, 大久保: “無停波方式 全固体化UHF 10kW TV送信システム”, 1986年テレビ大全, 10-5, pp. 249-250
- 9) “特集 テレビジョン同期放送の実験”, 放送技術, **37**, 4, pp. 291-351 (Apr. 1984)
- 10) テレビジョン学会編: “テレビ送受信とその機器”, コロナ社 (1976)
- 11) S. Stein, J. J. Jones: “現代の通信回線理論”, 関, 野坂, 柳平(訳), 森北出版, pp. 141-158 (1970)
- 12) 吉村: “周波数安定度の定義”, 電気学会技報, **41**, pp. 8-54 (Feb. 1976)
- 13) D. W. Allan: “Statistics of Atomic Frequency Standards”, Proc. IEEE, **54**, 2, pp. 221-230 (Feb. 1966)
- 14) J. A. Barnes, A. R. Chi, L. S. Cutler, D. J. Healey, D. B. Leeson, T. E. McGunigal, J. A. Mullen Jr., W. L. Smith, R. L. Sydnor, R. F. C. Vessot, G. M. R. Winker: “Characterization of Frequency Stability”, IEEE Trans. Instrum. & Meas., **20**, 2, pp. 105-120 (May 1971)
- 15) 小林, 吉村, 森川: “周波数・時標準器 4. ルビジウム原子周波数標準器”, 電波研季報, **29**, 149, pp. 117-130 (1983)
- 16) 田村, 伊東, 林, 福岡, 長尾, 加藤: “全固体化50kW放送機システム”, 放送技術, **42**, 6, pp. 136-143 (June 1989)
- 17) 都竹, 太田: “テレビジョン電波を利用したルビジウム原子発振器の精密較正法”, 信学論, **J72-C-II**, 12, pp. 1159-1166 (Dec. 1989)

おうち ちはる
大内 智晴 昭和51年, 日本大学大学院理工学研究科修士過程修了。同年, 郵政省電波研究所に入所。以来, テレビジョン放送方式, 衛星放送の研究等に従事。現在, 宇宙開発事業団人工衛星開発本部に勤務。正会員。