精密周波数の応用

正員 大浦 宣徳 東京工業大学
 正員 吉村 和幸 通信総合研究所
 正員 作間 英一 計量研究所

1. はじめに

精密周波数源には、発振周波数の確度と安定度を第一義とする一次周波数標準器と周波数安定度を第一義とする実用周波数標準の二つの側面がある。一次周波数標準器は、セシウムビーム形原子発振器であり、秒がその発振周期に基づいて定義されている。一次標準器の周波数を通倍してレーザの周波数と周波数チェーンを構成し、各種レーザの周波数が決定できるまでになってきた。その結果、真空中の光の速さを定義することにより、長さ標準を周波数安定化レーザで置き換えることが可能となった。ここでは、長さ標準用のレーザを始めとして、幾つかの分野における精密周波数を応用した技術について解説する。

2. テレビジョン・放送における精密周波数⁽¹⁾

テレビジョン放送の難視聴地域解消のために多数の放送中継所が建設され、放送衛星が打ち上げられている。しかし、中継所を数多く建設しても、利用できるチャンネル数は限られているので、受信地域において受信者や他の無線局に妨害を与えないチャンネルの組み合わせを選択しなければならない。このように、限られたチャンネルを同一サービスエリア内で混信を少なく有効に利用するために、通常同一チャンネルの搬送周波数を ± 10 kHz オフセットして送信するオフセット・キャリア方式と呼ばれる方法が採用されている。混信による画面上の縞模様をなくする方法として、送信搬送周波数を $10,010 \pm 5$ Hz あるいは $20,020 \pm 5$ Hz 以内の周波数ずれに収まるように安定化して送信する精密周波数オフセット方式が用いられている⁽²⁾。更に受信妨害を少なくする方法として、全く同一の周波数を用いるテレビジョン同期放送が実現されようとしている。

"Applications of Precision Frequencies". By Nobunori Oura, Member (Tokyo Institute of Technology), Kazuyuki Yoshimura, Member (Communications Research Laboratory), and Eiichi Sakuma, Member (National Research Laboratory of Metrology).

特集

解説

またカラーテレビジョンでは、カラー信号の送出にあたってカラー副搬送波 (3.57954 MHz) を3種の色信号で変調している。送信側と受信側で同一の色彩を常に再現するためには、カラー副搬送周波数の変動を少なくしなければならない。このような高い周波数安定度を長期にわたってしかも発振波の位相とびがなく、維持できるのは各種の原子発振器のみである。原子発振器は容積が大きく、高価であったが、最近のルビジウム原子発振器は、小形のもので容積1リットル程度で、周波数安定度も 1×10^{-11} /月以下で比較的安価なのでテレビジョン放送の搬送波、カラー副搬送波および文字放送⁽³⁾の原発振器としてテレビジョン放送網に用いられている。現在東京地区で四つのテレビジョン放送局が終日ルビジウム原子発振器を使用して放送している。これらの放送局のうちの3局のカラー副搬送波の周波数偏差と同期パルスの発射時刻の測定結果が毎月の通信学会誌に掲載されているので、これらの局のカラー副搬送波は安定な周波数源としても利用できる。以前は、多元放送時の同期信号発生源としてルビジウム原子発振器が使用されたが、現在ではフレームシンクロナイザを用いて原子発振器を使用しない局もあるので、上記の放送局の全国放送であっても中継放送の電波を利用する場合は放送局にフレームシンクロナイザを使用しているかどうか確かめる必要がある。

3. 通信網における精密周波数⁽⁴⁾

1960年代には、高安定水晶発振器を原発振器とする周波数分割方式のいわゆる多重搬送電話が開発されて現在も使用されている。最近では、データ通信をはじめとし、通信のあらゆる面にデジタル化が進められている。デジタル通信では、デジタル方式の特長を生かして、精密な同期信号を発生し、これに同期して信号の伝送、交換を行う方式がとられている。この場合、精密周波数を発生する発振器を各局にそれぞれ設置し、各発振器が独自に同期信号を発生する独立

同期方式 (Plesiochronous), 主局の同期信号に従属局が同期し、更にその同期信号に下位従属局が同期する従属同期方式および局どうし相互に同期を行う相互同期方式とがある⁽⁵⁾。アメリカの地球規模の位置決め衛星 (Navstar/GPS) には、衛星にルビジウムあるいはセシウム原子発振器を搭載した独立同期方式が用いられている。この方式は監視制御が容易であるが、局数が多くなると高価な発振器を多数用いるため経済的ではなくなる。そのため、公衆電気通信では、国際通信には独立同期方式を前提にして、国内通信では従属同期方式が用いられている⁽⁴⁾。主局には、周波数精度 1×10^{-11} のセシウム原子発振器を設置し、これに従属のルビジウム原子発振器を同期させ、このルビジウム原子発振器に、更に下位従属局の水晶発振器を同期させている。セシウム原子発振器は、主発振器であるためその異常動作は網全体に波及する。そのため主発振器は常時運転している3台の発振器で構成され、あるアルゴリズムで相互に周波数を監視し合い、常に正常な発振出力が維持できるようになっている⁽⁶⁾。

4. 宇宙技術による精密時刻比較

近年、周波数標準器 (原子時計) の性能の向上に伴い、ロラン C 電波の仲介などの地上技術の方法では、時刻比較精度や比較距離などの点で不十分になった。そのため、人工衛星や VLBI (超長基線電波干渉計) による宇宙技術の方法が用いられるようになり、精度の点で 1~3 けた向上している。

宇宙技術による精密時刻比較の方法としては、静止通信衛星による双方向伝送方式、放送衛星、気象衛星、航法衛星などからの電波による仲介方式がある⁽⁷⁾。VLBI では、電波星からの電波を仲介にしていると考えてよい。宇宙技術による方法では比較距離が汎地球的であり、また電離層や大気の通過距離が地上技術の方法に比べ著しく短くなるため、比較精度の大幅な改善が可能になる。特に、静止衛星による双方向伝送方式では、伝搬途上の変動が双方向で相殺されるため、1~2ns の精度が得られる。また、VLBI では、数百 MHz の受信帯域幅のため、0.1ns を実現している。前者に対する我が国の実験例としては、アメリカの応用技術衛星 ATS-1 による国際比較、通信衛星 CS/CS-2 による国内比較などがあり⁽⁸⁾、またインテルサット衛星を利用した国際比較の計画が NBS (アメリカ国立標準局) を中心に進められている。

放送衛星、気象衛星、航法衛星などによる仲介方式は、地球局が小形で安価であり、しかも 10ns 程度の精度が得られるため、最もよく用いられている。我が

国の実験例としては、それぞれ BS/BS-2, GMS, GPS によるものがある⁽⁸⁾。特に、アメリカの世界測位システム GPS は、現在国際比較の主な手段として用いられ、国際原子時 TAI の決定などに貢献している。

次に、時刻比較原理を簡単に述べる⁽⁹⁾。A 局が、衛星などにおいて時刻 t_{e1} に送信された電波を遅延時間 τ_A の後に受信して自局の時計で測定し、到達時刻 t_{rA} を得たとする。

$$t_{rA} = t_{e1} + \tau_A \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式は A 局の時計面で表されている。

仲介方式では、真に同じ時刻に送信された同一の電波を B 局でも受信するから (共通視界法)、見掛けの送信時刻の差がすなわち、AB 両局の時計の差になる。

$$\Delta t = t_{e1} - t_{e2} = (t_{rA} - \tau_A) - (t_{rB} - \tau_B) \dots\dots (2)$$

一方、双方向伝送方式では、 t_{e1} は A の時計でみた B 局の、 t_{e2} は B の時計でみた A 局のそれぞれ送信時刻になるが、各局はそれぞれ自局の時計でみて同一の時刻 t_e に送信する。従って、A 局の時計の方が Δt だけ進んでいるものとする、

$$t_{rA} = (t_e + \Delta t) + \tau_A \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$t_{rB} = (t_e - \Delta t) + \tau_B \quad \dots\dots\dots (4)$$

これから、

$$\Delta t = [(t_{rA} - \tau_A) - (t_{rB} - \tau_B)] / 2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式右辺は、伝搬途上の遅延の差になっており、双方向の電波がほぼ同一の経路を通り、周波数もほぼ同じであれば、大幅に相殺される。

5. 位置決め・航法における精密周波数

近年、周波数標準器 (または原子時計) および精密時間計測技術を最もよく応用しているものに測位、測距がある。これは、距離がその間を伝わる電波または光が要する時間を計測して求められることによる。送信側と受信側が独立の場合、伝搬時間の精密計測には両者の時計間の時刻同期が必要になる。ロラン C やオメガ電波航法システムの各送信局、世界測位システム GPS の各衛星および地上モニタ局、VLBI 観測局などは原子時計を保有して時刻を維持し、システムの時計間の同期をとっている。

現在、原子時計の周波数安定度は、短時間平均で $10^{-11} \sim 10^{-12}$ (水素メーザでは、百~千秒平均で 10^{-14} 以下)、長時間平均で $10^{-13} \sim 10^{-14}$ である。また、正確さ (精度) は商用 Cs 時計で 10^{-11} 、一次 Cs 周波数標準器で 10^{-13} 以下が実現されている。従って、長期安定度が 10^{-13} の時計では、誤差は 1 日で約 10ns、

距離にして 3 m になる。VLBI では、水素メーザを用いて 0.1 ns, 3 cm 以下の精度を達成している。周波数精度は、それに等しい相対距離誤差を生じるから、例えば 10^{-8} の精度では 10^5 km の距離に対し、1 m の誤差になる。それゆえ、原子時計を使えば精度の影響は深宇宙追尾の場合を除いて無視できる⁽⁹⁾。

現在、一般に利用されている電波航法システムとしては、ロラン C やオメガなどの地上システムと、GPS や NNSS (海軍航法衛星システム) などの衛星航法システムがある。ソビエトには GPS に類似した GLONASS というシステムが運用されているといわれる。近い将来、ロラン C や NNSS は GPS に一本化される予定である。GPS は全世界をカバーし、比較的安価で小型な受信機による受信だけで高精度が得られるから、不特定多数のユーザが利用できる最も近代的な航法システムである。ここでは、紙面の制約上 GPS についてのみ簡単に紹介する。

GPS はアメリカの軍事衛星航法システムであり、高度 2 万 km の円軌道 (周期 12 時間) に 18 個以上の衛星を配置し、常時どこからでも三次元測位ができることを目的にしている (1992 年ごろ完成)⁽¹⁰⁾。衛星には原子時計が搭載され、複数の衛星を扱うため共通の GPS TIME が維持されている。衛星からの測距信号 (1.57 GHz/1.23 GHz) には、衛星軌道や時計補正パラメータなどの情報が重畳されている。公称精度は C/A コード (1.57 GHz) 利用で約 100 m, P コード (2 周波) で約 16 m である。

測位、測距の原理は、(1) 式を GPS TIME の時計面で表すことにより得られる。

$$t_{rA} - \Delta t_A = (t_{es} - \Delta t_s) + \tau_A \dots \dots \dots (6)$$

遅延時間 τ_A を幾何学的距離 D によるものと、それ以外の τ_A' に分けると、(6) 式は

$$D/c + \Delta t_A = (t_{rA} - t_{es}) + \Delta t_s - \tau_A' \dots \dots \dots (7)$$

但し、 Δt_A は GPS TIME に対するユーザ時計の進み、 t_{es} は衛星 s の時計面でみた送信時刻、 Δt_s はその進みである。

τ_A' には、電離層、大気圏、受信機での遅延、相対論効果による遅延が含まれ、精密な補正が必要である⁽⁹⁾。また、距離 D は、衛星位置 (x, y, z) とユーザ位置 (X, Y, Z) から計算できる。衛星位置は衛星から送られてくる軌道 6 要素により計算できる。

三次元測位では、(7) 式の左辺に四つの未知数が含まれるから、観測方程式が四つ必要になり、四つの衛星を同時に観測するか、または 1 個の衛星を四つの異なる位置で観測する必要がある。これらの場合、ユー

ザの時計は高安定水晶発振器でよい。

6. 安定化レーザと長さ標準

長さ標準には 1960 年から 1983 年まで、Kr ランプの可視光の波長が用いられ、その現示精度は 4×10^{-9} であった。しかし、レーザの周波数安定化技術の向上と、光周波数測定技術の発展により、1983 年にメートルの定義は更に現示精度の高い定義に改訂された。

1960 年に発明されたレーザは、その後、周波数安定化技術が向上し、赤外から可視にわたる光領域で、周波数安定度および再現性において、原子発振器と並ぶ安定な周波数源になった。波長精度の高いレーザ、特に長さ標準用ガスレーザの周波数安定化には、メタン分子や沃素分子などの飽和吸収線が基準として使われる。基準となるガスを特別に清浄にしたセルに数 Pa 封入し、レーザ共振器の中または外部に置く。内部に置いた場合、レーザ光が十分強いと吸収が飽和し、レーザの発振周波数幅の中に非常に幅の狭いスペクトル線 (数 MHz ~ 数百 kHz) が観測される。このスペクトル線の一次または三次微分曲線を周波数弁別曲線としてレーザの共振器を制御し、周波数を安定化している。制御系の最適な設計を行うことで、 10^{-11} から 10^{-13} もの高い周波数安定度と、 10^{-12} ~ 10^{-13} の再現性が得られている⁽¹¹⁾。炭酸ガスレーザの場合、炭酸ガスを封入したセルの側面から蛍光スペクトル線を観測し、そのスペクトル線上のディップを利用する方法もある⁽¹²⁾。

一方、1960 年代後半からレーザ周波数の精密測定技術が開発された。すなわち光領域で働く通倍・混合器が開発され、レーザ周波数のビートダウンを行う周波数チェーンにより⁽¹³⁾、Cs 一次周波数標準を基準として、各種レーザ線の絶対周波数が順次測定された。通倍・混合器として、5 THz まではショットキーダイオードやジョセフソン点接触ダイオードが、それ以上では MIM (特に W-Ni) 点接触ダイオードが用いられている。更に結晶による通倍を利用することで 580 nm, 約 520 THz までの絶対周波数の測定が可能となった⁽¹⁴⁾。

1972 年には、メタンの吸収線で安定化した He-Ne レーザ 3.39 μ m 線の周波数の絶対測定が行われ、その波長が Kr 長さ標準を基準にして決定された。測定より得られた周波数と波長から求めた光速の値は、従来の測定値より 100 倍精度の良いものだった⁽¹⁵⁾。その後の各国標準研究所による光速の測定結果はよい一致を示し、周波数測定技術の信頼性と、光速の普遍性を裏付けた⁽¹⁶⁾。光速の測定精度は長さ標準の波長精

表 1 メートルの定義を現示するために CGPM によって推奨されている安定化レーザ

No.	レーザの名称	吸収分子	周波数 (MHz)	真空波長 (fm)	不確かさ (3σ)	吸収セルやレーザの使用条件
1.1	メタン安定化ヘリウムネオンレーザ	CH ₄	88,376,181.608	3,392,231,397.0	$\pm 1.3 \times 10^{-10}$	内部または外部メタンセル, CH ₄ ガス圧 ≤ 3 Pa, 共振器内一方方向の平均放射束密度 ≤ 10 W/m ² , 波面曲率 ≥ 1 m, 逆行波のパワーの不平等度 $\leq 5\%$
1.2	よう素安定化色素レーザまたは周波数2通倍ヘリウムネオンレーザ	¹²⁷ I ₂	520,206,808.51	576,294,760.27	$\pm 6 \times 10^{-10(3)}$	内部または外部よう素セル, コールドフィンガー温度 $6^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$
1.3	よう素安定化ヘリウムネオンレーザ (633nm)	¹²⁷ I ₂	473,612,214.8	632,991,398.1	$\pm 1 \times 10^{-9}$	よう素セル内蔵, セルの壁温 $16^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ の間, コールドフィンガー温度 $15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 共振器内一方方向平均放射束 $15\text{mW} \pm 10\text{mW}$, 周波数変動幅 (p-p) $6\text{MHz} \pm 1\text{MHz}$
1.4	よう素安定化ヘリウムネオンレーザ (612nm)	¹²⁷ I ₂	489,860,355.1	611,970,769.8	$\pm 1.1 \times 10^{-9}$	内部または外部よう素セル, コールドフィンガー温度 $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$
1.5	よう素安定化アルゴンレーザ	¹³³ Ar	582,490,603.6	514,673,466.2	$\pm 1.3 \times 10^{-9}$	内部または外部よう素セル, コールドフィンガー温度 $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

(注) レーザ線以外に ⁸⁶Kr, ¹⁹⁸Hg および ¹¹⁴Cd スペクトルランプからの特定の放射も推奨されている

度により支配される。そこで、第 17 回度量衡総会 (1983 年) で、長さ標準は光速の値に基づいた定義に改訂された⁽¹⁷⁾。

新定義では「メートルは、1 秒の 299,792,458 分の 1 の時間に光が真空中を伝わる行程の長さである」とされ、定義を現示する以下の 3 方法を同時に勧告として採用した。

(1) 長さ l は光速 c と時間 t の測定から $l = c \times t$ で決める。

(2) 波長 λ は光速 c と周波数 f の測定から $\lambda = c/f$ によって決める。

(3) 真空中の光の波長または周波数が与えられている放射の 1 つを使う (表 1 参照)。

7. ま と め

一次標準器の周波数安定度にほぼ等しいような安定度をもつ精密周波数がテレビジョン放送をはじめとして、日常生活に深くかかわっていることをみてきた。更に高安定な発振器を求めて、新しい方式の原子発振器の原理が発表されたり研究が進められているので、それらの発振器の実現に伴って現在の応用技術の精度向上だけでなく基礎、応用の両面で全く新しい利用方法も提案されるであろう。(昭和 63 年 2 月 29 日受付)

文 献

- (1) 「精密周波数の応用技術」電気学会技術報告 (Ⅱ部) 252 号 (昭和 62)

- (2) 小野:「高安定周波数テレビ中継放送装置」NHK 技研月報 20, 2 (昭和 52-2)
- (3) 沢辺:「文字放送方式の概要」テレビジョン学会誌 40, 1, 5 (昭和 61)
- (4) 「精密周波数の応用技術」, 電気学会技術報告 (Ⅱ部) 252 号 p. 56 (昭和 62-6)
- (5) W. C. Lindsey, F. Ghazvinian, W. C. Hagmann, and K. Dessouky: "Network synchronozation" *Proc. IEEE* 73, 10, 1445 (1985)
- (6) 木原・十文字:「標準クロック発生装置の周波数監視アルゴリズム」, 信学誌 J 66-B, 1287 (昭和 58)
- (7) 吉村, 他:「GPS 衛星による国際時刻比較について」航空宇宙誌 35, 396, 43 (昭和 62)
- (8) K. Yoshimura, et al.: "Research Activities on Time and Frequency Transfer using Space Links" *Proc. IEEE* 74, 1, 157 (1986-1)
- (9) 吉村:「衛星による時刻同期および航法への応用」電気学会技術報告 (Ⅱ部) 252 号 p. 43 (昭和 62-6)
- (10) J. J. Spilker, Jr.: "GPS Signal Structure and Performance Characteristics" *Navigation*, 25, 2, 121 (Summer 1978)
- (11) 秋元:「レーザーの周波数制御と評価」レーザー研究 14, 11, 1 (昭和 61)
- (12) C. Freed & A. Javan: "Standing Wave Saturation in the CO₂ 10.9-μ Transitions Observed in Low-Pressure Room-Temperature Absorber Gas" *Appl. Phys. Lett.* 17, 1, 29 (1970)
- (13) 周波数チェーン: Cs 標準-マイクロ波-CH₃OH (70.5 μm, 4.25 THz)-CO₂ (10.2 μm, 29 THz)-He-Ne (3.39 μm, 88 THz) が計量所で計画されている。
- (14) C. R. Pollock, et al.: "Direct frequency measurements of transitions at 520 THz (576 nm) in iodine, and 260 THz (1.15 μm) in neon" *Opt. Lett.*, 8, 1, 133 (1983)
- (15) K. M. Evenson, et al.: "Speed of light from Direct Frequency and Wavelength Measurements of the Methane-Stabilized Laser" *Phys. Rev. Lett.* 29, 19, 1346 (1972)
- (16) 光速の値として $c = 299,792,458$ m/s が第 15 回度量衡総会 (1975 年) で採択された。
- (17) 17^e Comité Consultatif Pour la Définition du Mètre, 1983: 「国際単位系 (日本語訳)」訳: 計量研究所 (昭和 58) 日本計量協会