量子電圧標準による遠隔校正 (e-trace) への期待

解説

キーワード

標準供給体系, ジョセフソン電圧標準, 遠隔校正, 周波数基準, GPS

吉田 春雄

産業技術総合研究所

1. はじめに

電圧標準を例にとると、国家標準としての電圧標準から二次標準供給機関を経て産業界に供給されるとおよそ2桁以上も精度が劣化する。図-1にその供給体系を示す。企業内に供給された標準も企業内一次標準器から二次標準器を経て製造現場で使用するワーキングスタンダードまで階層構造をなし、精度もその都度劣化する。そのほかの標準量についても類似であると言ってよい。

この体系の問題点は、1) 時間的制約 (リアルタイム性がないこと)、2) 空間的制約 (上位の基準のある場所での校正作業が必要)、3) 階層的制約 (階層が下がるごとに精度が劣化すること) である。いままではそれで十分に機能を果たしてきたが、通信技術と情報処理技術により多くの技術課題が時間と空間の問題を克服しつつある現在、標準供給体系がこのままでは時代にそぐわなくなるのではないかという危機感がある。しかし、最近になって米国でSIMnetと称する遠隔校正の研究がかなり進みつつあるということを知った。SIMはInteramerican Metrology Systemからとったもので、netはinternetを介した校正という意味である。SIMnetは現段階では通常の測定技術とインターネット技術を組み合わせたもので米国内を対象にしているが、これを拡張して世界を対象にしたWORLDnet構想もあるようである。日本でも、これを受けて産業技術総合研究所の中で遠隔校正技術研究のプロジェクトが新年度から発足しようという気運にある。通信技術を介して測定の前後にリアルタイムで校正することができれば、測定精度向上にとってどんなに素晴らしいかというのは測定にたずさわる者の夢である。本稿では、その夢の実現への期待を電圧校正を例にとって具体的に述べてみたい。

2. 遠隔校正の検討

すでに時間・周波数標準は遠隔校正に関して長い歴史がある⁽¹⁾。他の物理量も周波数に関係づけられれば遠隔校正の可能性がでてくるものと期待できる。ここでは電圧校正を例にとって、基準となる周波数と、巨視的量子効果の一つであるACジョセフソン効果と、通信技術による条件設定という手段によって電圧の遠隔校正の可能性と問題点を考えてみよう。

図-1 電圧標準の供給体系

2.1 量子化電圧標準の意義

標準体系は、七つの基本単位とその組み立て単位からなる国際単位系 (SIユニット) で国際的に統一されようとしている。電圧は基本単位からの組み立て単位であるが、最近の電圧標準は端的に言えば周波数から電圧に変換する巨視的量子効果 (ACジョセフソン効果) によって実現されており、量子化電圧は次のようなきわめて簡潔な式で表わされる⁽²⁾。

$$V_n = nf/K_{J-90} \quad \text{--- (1)}$$

ここで V_n は次数 n の量子化電圧、 n は整数、 f はジョセフソン接合に照射するミリ波周波数、 K_{J-90} は1990年から世界中で統一につかわれているジョセフソン定数協定値 ($=2e/h=483,597.9 \text{ GHz/V}$)⁽³⁾ である。被校正対象の電圧にもっとも近い量子化電圧を選んで基準電圧とするが、(1)式からわかるようにその正確さはジョセフソン接合に照射するミリ波周波数の正確さに比例する。この原理を実現するジョセフソン電圧標準の構成ブロック図を図-2に示す。動作を簡単に説明すると、ブロック図の左半分はジョセフソン接合に照射するミリ波源 (ガン発振器) の周波数安定化 (Cs (セシウム) 原子周波数基準源をもとにした位相同期回路) 部である。周波数を安定化したミリ波を中央部に配置してある液体ヘリウム中のジョセフソン接合アレーに照射すると、(1)式で示される量子化電圧が発生する。その量子化電圧の中で最も被校正電圧に近い次数を選択し、その量子化電圧と被校正電圧の差分を平衡検出器で検出し、その差が出来るだけ小さく ($0.5 \mu\text{V}$ 以下) になるようにミリ波周波数

Expectation of the e-trace on Quantum Voltage Standard System.
By Haruo Yoshida (National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology).

図-2 量子化電圧標準装置の構成図

を制御し平衡させる。液体ヘリウム温度のジョセフソン電圧と室温の被測定電圧をつなぐ信号線の熱起電力をキャンセルする手順をふみながら、統計的に意味のある回数の測定を繰り返し、基準電圧に平衡電圧を加算または減算して最終的な値づけをする。熱起電力だけでなく、絶縁抵抗によるリーク電圧など、不確かさの原因となるものは細大もらず校正値の不確かさの中に盛り込まなければならない。

量子化電圧標準の良い点は、装置さえそろえれば精度が劣化する標準供給体系の末端でも国家標準と同等の精度が得られることである。すなわち、従来の標準供給体系の欠点である精度の劣化が避けられる。具体例を挙げる。我が国では、1990年1月1日から国家標準としての1Vジョセフソン電圧標準装置が稼動しはじめ⁽⁴⁾、翌1991年1月1日から同一の構成の装置が民間企業でも稼動しはじめた⁽⁵⁾。さらに同装置は10Vを直接校正できるようにレベルアップされている。表-1には民間企業に導入され、稼動しているジョセフソン電圧標準装置(特定二次標準器)を電子技術総合研究所の

なお、量子化電圧標準の技術は精密測定にも使われるようになり、高精度デジタル電圧計の入力アナログ/デジタル変換器(ADC)のオフセットエラーおよび非直線性誤差測定などに応用され、従来の電子機器では測定不能であった微小領域の誤差の精密測定を行った実績がある⁽⁶⁾。すでに実用的な測定手段になったと言ってよい。

2.2 共通の周波数基準源—遠隔校正のためのバックボーン

周波数はあらゆる物理量の中でもっとも精度が高く、かつ操作しやすい。現在の一次標準レベルの光ポンピング方式Cs⁺(セシウム)原子周波数基準の精度は 10^{-14} ないし 10^{-15} /dayの間と言われている⁽⁷⁾。前節で、(1)式のもとになる周波数基準源は原子周波数基準源から得ることを述べた。ひろく使われている商用化されたCs原子周波数基準源の場合、10MHzの出力周波数の不確かさは 1×10^{-12} /day程度である。しかし、遠隔校正を前提にした場合、各装置が個別の周波数基準源をもつのではなくて、共通に得られる周波数基準源であることが望ましい。各国の標準機関は標準電波、TV電波、ロランCなどの各種標準電波を通じて不特定多数の利用者に周波数と時刻を供給しているが、遠隔校正のためには衛星から送られる世界測位

表-1 特定二次標準器の校正結果

校正年月日	平成12年3月31日
依頼者	株式会社 アドバンテスト
特定二次標準器名	電圧発生装置 (ジョセフソン効果による)
校正方法	電総研 校正実施基準による
校正結果	(仲介用電圧発生器の1.018V出力に対する相互比較)
最確値	-8.6 nV (=1.017 999 991 4 V)
不確かさ	30 nV(2σ) このうち Type A : 29 nV(2σ)

特定標準器(いわゆる国家標準器)で校正した結果を示す。ほぼ同等の精度と言っている。

図-3 GPSクロック信号から基準周波数を復元する構成図

システム (GPS) 信号クロックから復元した周波数基準源が世界中で共通に得られる周波数基準源として最も現実的である。

論文(8)を参照して、その復元の仕組みを図-3によって概観する。GPS受信機は、GPS信号を受信してスペクトル拡散符号であるC/Aコードから協定世界時タイミング信号UTC (Co-ordinate Universal Time) 1 pps(Pulse per second)を再生する。一方、恒温槽入り電圧制御型水晶発振器 OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillator)出力、例えば公称発振周波数10 MHzを1 Hzまで分周し、OCXO 1 ppsを発生する。TI(Time Interval)カウンタはUTC 1 ppsとOCXO 1 ppsとの間のTIを測定する。デジタルフィルタは測定されたTIデータから両者の長期的な位相ズレを検出し、そのズレをなくするようにOCXO制御データを計算し、D/Aコンバータを介して制御電圧に変換してOCXOに負帰還する(デジタル信号処理型位相同期回路)。このように制御したOCXOの10 MHz出力周波数の不確かさ $1 \times 10^{-11}/\text{day}$ 以下である。これは原子周波数基準源よりは劣るが、被校正対象となる2次標準器としてのZener電圧標準器の短期安定度 $1 \times 10^{-8}/\text{day}$ 程度、長期安定度 $3 \times 10^{-6}/\text{year}$ 程度より3桁以上よいので電圧標準のもとになる周波数基準としては十分である。

2.3 量子化電圧標準による遠隔校正の期待

2.1節の原理による量子化電圧標準装置の周波数基準源として2.2節の仕組みを取り入れ、その設定条件(ジョセフソン接合に照射するミリ波周波数、量子化次数 n 、装置としての総合的不確かさ)を通信で伝えれば、遠く隔たっていても同等の基準電圧を復元できる。その復元した基準電圧と被校正対象電圧との平衡電圧差はいくらであるかという測定ができれば、遠隔地の間でも同等の校正が可能になると考えられる。

まず、簡単のために図-2の構成を備え、その中の周波数基準源として図-3仕組みをもつA、Bというジョセフソン電圧標準装置があるとす。装置どうしが隣にある場合は、装置Aで発生した電圧を装置Bで容易に確かめられる。具体的には、装置Aにおいてジョセフソン接合に照射するミリ波周波数 f_1 と量子化次数 n を選択すれば、 n 番目の量子化電圧 $V_n (=nf_1/K_{J-90})$ が得られる。この電圧出力を隣の装置Bで測定する。一般にジョセフソン接合に照射するミリ波周波数は同じとは限らないので f_2 とすると、 V_n に最も近い電圧の次数を m 、その時の電圧を $V_m (=mf_2/K_{J-90})$ とする。 V_n と V_m は一致しているとは限らないから、 $V_n > V_m$ として、その差は $\Delta V = V_n - V_m = (nf_1 - mf_2)/K_{J-90}$ であり、平衡電圧となる。次数 n 、 m 、周波数 f_1 、 f_2 も、ジョセフソン定数 K_{J-90} も既知であるから ΔV も明確である。装置Bの基準電圧 V_m にこの平衡電圧 ΔV を加算した値 $[V_m + \Delta V]$ が装置Bで測った装置Aの電圧値になる⁽⁹⁾。その後、2.1節の動作説明の項に述べたような装置の不確かさの吟味を行ない、その不確かさを加味した校正値を得る。

この原理は遠隔地にあっても成り立つものと考えられる。装置Aと装置Bが遠く隔たった場所にあっても、前節で述べたような共通の周波数基準源をもつならば、装置Aで2次標準器を校正し、同一の標準器を装置Bで校正しても真値は等しく、偏差はそれぞれの装置の不確かさを反映した値が得られるものと期待できる。図-4に概念図を示す。

この考え方を拡張すれば、共通の周波数基準源をもち、量子化電圧標準の原理に基づくかぎり世界中のどこでも、誰でもが、いつでも0.01 ppm程度の不確かさの電圧校正値を得ることができる。

図-4 遠隔校正の概念図

たとえば、日本企業がベトナムに海外進出し現地生産した機器を校正しようとした場合、GPS信号から周波数基準を復元する機能をそなえた量子化電圧標準装置さえあれば製品を日本に運ぶことなくに現地での校正が可能になる。すなわち、時間的制約、空間的制約、垂直的トレーサビリティ体系の精度劣化の制約から解放されることになると期待される。

2.4 量子化電圧標準による遠隔校正実現の問題点

理念がどのように素晴らしいものであっても、その仕組みが普及するか否かは投資を上回るメリットが得られるかどうかにかかっている。超伝導のジョセフソン接合アレーを除けば、最近の携帯電話をみてもわかるように日本の電子部品を作る技術は極めてすぐれているので、遠隔校正にかかわる装置の小型化・低価格化は実現可能であろう。また、GPSからクロックを抜き出し周波数基準を再生する電子回路もボード1枚、10万円程度で商品化されている。ネットワーク的運用にかかわる通信技術も現実のものである。

問題は、ジョセフソン接合アレーの低価格化と、連続運転を可能にするためのクローズドループ型の超伝導冷凍冷却機であるが、ジョセフソン接合アレーの超伝導金属として $T_c = 15 \text{ K}$ の窒化ニオブ(NbN)による接合アレーが実用化すれば一挙に解決すると期待される。将来は高温超伝導素子の品質が高まり、置き換えられるかも知れない。

3. その他の物理量の遠隔校正への期待

すでに時間・周波数基準は遠隔校正に関して長い歴史があることを述べ、量子化電圧についても遠隔校正が期待できることを述べた。その他の物理量についてはどうであろうか?

3.1 光周波数標準

光周波数標準として代表的なものにヨウ素安定化 He-Ne レーザがあげられる。精度は概ね 2×10^{-11} より良い。光の周波数を電波の周波数標準 (^{133}Cs のマイクロ波での遷移に対応する周波数) に位相同期することができれば、光の周波数精度を周波数比だけ向上できる。この光と周波数をリンクさせる簡便な周波数チェーン技術の開発が待たれる。さらに、非線形光学技術によってヨウ素安定化 He-Ne レーザ光周波数を長波長光通信波長帯域 (1.3 μm 帯、1.5 μm 帯) に変換することにより、光ファイバ網のあるところならどこにも光周波数標準を“配達”できることになる。長波長光通信にとっては、配達された光周波数標準に電気光学位相変調器により広帯域光コム (電気光学位相変調器の変調周波数に等しい周波数間隔の櫛状変調波) を発生させ⁽¹⁰⁾、あるいはアセチレン (C_2H_2) 分子、シアン (HCN) の飽和吸収線に半導体レーザをロックさせて光周波数多重通信の周波数基準にする研究が続けられている⁽¹¹⁾。いわゆる光コヒーレント通信の技術基盤である。

3.2 長さ標準

長さの定義は「1メートルは1/299 792 458秒間に光が真空中を伝わる行程の長さ」である。前節に述べたヨウ素安定化 He-Ne レーザ (波長633 nm) が、やはり長さ標準の光源として最も重要である。この光源が周波数標準とリンクできれば波長 (λ) がより高精度に求まることになる。ともあれ、この光源を干渉計と組み合わせ、干渉縞の数を数えることにより長さを測定することが出来る。この光源を非線型効果により長波長光通信波長帯域 (1.3 μm 帯、1.5 μm 帯) に変換し、光ファイバ網のあるところならどこにも長さ標準を“配達”できることになる。長波長光通信波長帯域では、群速度分散の無い光ファイバが実用化しているので、長さ標準の配達には好都合である。実際に、長さの遠隔校正の実験も着手され始めた⁽¹²⁾。

4. まとめ

量子技術と通信手段を介した遠隔校正の可能性をさぐり、従来の標準供給体系の時間的制約、空間的制約、階層的制約の問題点克服への期待を述べた。原理確認実験は量子化電圧標準装置を持っている2、3カ所の機関がその気になればすぐにも出来る段階にある。本格的な普及は、我が国の電子技術、通信技術の力をもってすれば実現の可能性は高い。期待をこめて、これをe-traceと呼びたい。

ただ、遠隔校正の実績のある時間・周波数を除けば、可能性のあるものはSI単位系の基本単位の中でも、組み立て単位の中でも決して多いという訳ではない。しかし、少ない種類の標準量でも、それを実現し、世界的なネットワークで運用し、産業界に寄与することが大事である。さらに言えば、ここで検討した周波数や電圧、長さに変換できるきちんとした関係の物理量であれば、それらも二次的な遠隔校正の対象とみなすこともできる。

SI単位系の基本単位の中で電気系と力学系を橋渡しするものとして今さかんに研究されている質量の量子標準化が実現したとして、果たして遠隔校正ネットワークにのるであろうか？ のらないならば、ゆくゆくはSI単位系がネットワークでつながるという夢は半分の可能性があるにすぎない。

【参考文献】

- (1) 吉村和幸、古賀保喜、大浦宣徳 共著「周波数と時間」(電子情報通信学会)
- (2) M. T. Levinsen, R. Y. Chiao, M. J. Feldman and B. A. Tacker, *Appl. Phys. Lett.*, 31, pp. 776-778 (1977)
- (3) B. N. Taylor and T. J. Witt, *Metrologia*, Vol.26, pp. 47-62 (1989)
- (4) Y. Sakamoto, H. Yoshida, T. Sakuraba, A. Odawara, Y. Murayama, and T. Endo, *IEEE Trans. on Instrum. & Meas.*, Vol. 40, No. 2, pp.312-316(1991)
- (5) H. Yoshida, F. Katada, Y. Sakamoto, A. Iwasa, and T. Endo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.32, Part 1, pp.389-395 (1993)
- (6) H. Yoshida, *IEICE Trans. on Electronics*, Vol. E83-C, No.1, pp.20-26 (2000)
- (7) 萩本 憲、精密工学会誌、Vol. 66, No.11, pp.1679-1683 (2000)
- (8) 氏家 仁、丸尾 和幸、志村 隆史、電気学会論文誌C、Vol. 119-C, No.7, pp.802-809 (1999)
- (9) H. Yoshida, T. Kozakai, and Y. Murayama, *IEEE Trans. on Instrum. & Meas.*, Vol. 46, No. 2, pp.260-263 (1997)
- (10) 大津 元一、興梠元伸、「情報通信のための光周波数を考えるシンポジウム」Technical Digest, pp. 23-27 (2000. 3. 16)
- (11) 植田憲一、中川賢一、「情報通信のための光周波数を考えるシンポジウム」Technical Digest, pp. 11-15 (2000. 3. 16)
- (12) 松本弘一、平井亜紀子、*Optics Japan 2000 講演予稿集 8aE7* (2000.10.7,8)

吉田 春雄

(正員) 1944年岩手県盛岡市生まれ。1968年北海道大学工学部応用物理学科卒業。同年タケダ理研工業株式会社(現在の(株)アドバンテスト)に入社。主としてマイクロ波測定器用YIGデバイス開発担当。1989年より1994年まで通産省電子技術総合研究所に出向し、ジョセフソン電圧標準装置の研究を担当した。1994年以降(株)アドバンテスト研究所に所属し、主として300mmシリコンウェーハ表面の有機汚染分子の非接触・非破壊検出研究を担当した。2001年4月1日より産業技術総合研究所計測標準領域へ移籍。工学博士。応用物理学会、電子情報通信学会、電気学会、IEEE会員。

(平成13年1月17日受付)