Japan Calibration Service System

JCSS
不確かさの見積もりに関するガイド

登録に係る区分：時間・周波数及び回転速度
校正手法の区分の呼称：時間・周波数測定器等

（第 8 版）

改正：2026年4月1日

独立行政法人製品評価技術基盤機構
適合性評価推進センター　認定センター

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

目 次

1. はじめに....3
2. CMC の算出....3
2.1 特定二次標準器の不確かさ....3
2.1.1 特定標準器により校正された時点での特定二次標準器の不確かさ....3
2.1.2 特定標準器による校正後の長期的な周波数変化....4
2.1.3 環境温度、湿度、磁場、電源電圧の変化、電源のオンオフ、などによる周波数変化....4
2.1.4 特定二次標準器の短期周波数安定度（測定時間 τ に依存）....4
2.1.5 特定二次標準器の不確かさのまとめ....4
2.2 測定系の不確かさ....5
2.2.1 周波数カウンターにより周波数標準器を校正する場合....5
2.2.2 位相計により周波数標準器を校正する場合....5
2.2.2.1 位相計のノイズレベル....5
2.2.2.2 出力信号の直線性の測定....6
2.2.3 タイムインタバルカウンターにより周波数標準器を校正する場合....7
2.2.3.1 タイムインタバルカウンターのノイズレベル....7
2.2.4 GPS 時刻比較受信機により周波数標準器を校正する場合（遠隔校正）....8
3. 特定二次標準器を用いて DUT を校正する際の不確かさの算出....9
3.1 特定二次標準器と周波数カウンターを用いた DUT の校正....9
3.2 特定二次標準器と位相計を用いた DUT の校正....10
3.3 特定二次標準器とタイムインタバルカウンターを用いた DUT の校正....11
3.4 特定二次標準器とGPS受信機を用いた DUT の校正....11
特定二次標準器と周波数カウンターを用いた周波数標準器（水晶発振器）の校正....14
CMC の計算....14
(a) 特定二次標準器の不確かさの推定....14
(b) システム雑音の推定....16
(c) 周波数カウンターのオフセットの推定....16
Rb原子発振器（特定二次標準器）で DUT を校正する際の不確かさの計算....16
まとめ....17
図1 GPS common-view 法の概念図....19
図2 周波数遠隔校正の概念図....20
【今回の改正のポイント】....21

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

不確かさの評価に関するガイド
登録に係る区分：時間・周波数及び回転速度
計量器等の区分：時間・周波数測定器等

1．はじめに

本ガイドは登録事業者が

（1） 校正測定能力(Calibration and Measurement Capability=**CMC**)

（2） 特定二次標準器を用いて被校正器物（DUT）を校正する際の不確かさを算出するためのガイドである。以下では第2節においてCMC算出の方法、第3節において特定二次標準器を用いてDUTを校正する際の不確かさ算出の方法、について述べる。

2．CMC の算出

周波数の校正においては、CMC には「DUT の不確かさを含めない」方向で世界的に議論が進んでいる。すなわち、CMC とは「DUT に全く雑音がなく周波数が固定の正確な正弦波である場合」にどこまで正しく値がつけられるかを表す。第2節においてはそのような DUT を想定して議論を進める。

さて CMC に寄与する不確かさは、

（1） 特定二次標準器の不確かさ

（2） 測定系の不確かさ

に大別される。後者に寄与するものとしては、校正に用いられる周波数カウンターや周波数発生器内部での逓倍・分周・位相同期などによる安定度の劣化や位相雑音の増大、有限のゲート時間による周波数のばらつき、測定器の内部で標準周波数から別のクロックを発生する場合の雑音の増加、などが考えられる。分配増幅器が用いられる場合は、分配増幅器による雑音の増加や、分配増幅器の温度変化による位相の変化などが考えられる。他にも、ケーブルやその他の機器の温度変化などによる位相等の特性変化、また、周波数カウンターのオフセット、トリガ電圧のドリフト、位相計のドリフトなども不確かさの要因となる。

2.1 特定二次標準器の不確かさ

特定二次標準器の不確かさを構成するものは、測定時間の有限性も考慮に入れると、

（1）特定標準器により校正された時点での特定二次標準器の不確かさ

（2）特定標準器による校正後の長期的な周波数変化

（3）環境温度、湿度、磁場、電源電圧の変化、電源のオンオフ、などによる周波数変化

（4）特定二次標準器の短期周波数安定度（測定時間 τ に依存）

である。

2.1.1 特定標準器により校正された時点での特定二次標準器の不確かさ

特定標準器により特定二次標準器が校正された場合、「何月何日の時点での周波数は f_0 であり、その拡張不確かさは包含係数 $k = 2$ としたとき U である」という証明書が与えられる。（この時の合成標準不確かさを u_{initial} とすると、$U = k \times u_{\mathrm{initial}}$ である。）

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

2.1.2 特定標準器による校正後の長期的な周波数変化

一般に特定二次標準器には長期的な周波数変化があるので、上記の校正時からTの時間が経過したときの不確かさの増大分を標準不確かさで表すと、

$$u_{\mathrm{longterm}}(T) = (\text{周波数変化率の上限値}) \times \frac{T}{\sqrt{3}} \qquad (2\text{-}1)$$

と書くことができる（ここで矩形分布を仮定した）。1ヶ月、1年あたりの長期的な周波数変化率の上限値は長期周波数安定度などとして製造者仕様値が与えられており、これをBタイプの不確かさ[1] として用いることができる。[2] また、特定標準器による1年間隔の校正結果が蓄積してくれば、実測値を用いて製造者仕様値よりも小さな値を得ることも可能である。

特に特定二次標準器の性能の限界に近い CMC を必要とするのでなければ、T ＝1年（校正の周期）とおけば、経過時間依存性を考えなくて済む。

2.1.3 環境温度、湿度、磁場、電源電圧の変化、電源のオンオフ、などによる周波数変化

特定二次標準器がおかれている環境温度、湿度、磁場、また、電源電圧などの条件により、さらに付加的な不確かさが加わる。一般的には、製造者仕様値を参照することにより、これらの影響を推定することができる。また、特定標準器による特定二次標準器の校正時に移動のため標準器の電源を切断する場合には、電源オンオフに伴う周波数の再現性なども考慮に入れる必要がある。これらは標準器が2台（たとえば特定二次標準器と同等の性能を持つワーキングスタンダードなど）あれば自ら評価する事で、カタログ値よりも小さな値を得ることも可能である。以下ではこの標準不確かさをu_{env}と書くことにする。

2.1.4 特定二次標準器の短期周波数安定度（測定時間 τ に依存）

短期周波数安定度は通常製造者仕様に記載されている。また、特定標準器による特定二次標準器の校正の範囲外ではあるが、依頼試験により実測値を得ることも可能である。特定二次標準器の短期の周波数安定度の値を$u_{\mathrm{shortterm}}(\tau)$と書くことにする。

2.1.5 特定二次標準器の不確かさのまとめ

以上、2．1．1節、2．1．2節、2．1．3節、2．1．4節の不確かさを合成することにより、特定二次標準器の周波数は、

周波数値　f_0

合成標準不確かさ$u_{\mathrm{std}}(T,\tau) = \sqrt{u_{\mathrm{initial}}^2 + u_{\mathrm{longterm}}(T)^2 + u_{\mathrm{env}}^2 + u_{\mathrm{shortterm}}(\tau)^2}$　　(2-2)

と書くことができる。

---

[1] Aタイプの不確かさとは一連の繰り返し測定から算出される不確かさである。Aタイプ標準不確かさは、統計的に推定される分散の平方根すなわち標準偏差である。一方、Bタイプの標準不確かさは、繰り返し測定からではなく、以前の測定データ、当該材料や機器の挙動及び特性についての一般的知識又は経験、製造者の仕様、校正その他の成績書に記載されたデータ、ハンドブックから引用した参考データに割り当てられた不確かさ、などの起こりうる変動について入手できるすべての情報に基づく科学的判断によって評価される不確かさである。詳細については、Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (first edition 1995)（邦訳、ISO国際文書、計測における不確かさの表現のガイド、飯塚幸三監修、日本規格協会、1996年刊）を参照のこと。

[2] 使用する装置類の性能は定期的な校正やメンテナンスを通じて自ら評価し、管理するのが原則である。部品等の経年変化に伴う特性の変化があるため、製造者仕様の保証期間や製品の推奨校正間隔などを目安として性能を確認するデータを取得する必要がある。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

2.2 測定系の不確かさ

2.2.1 周波数カウンターにより周波数標準器を校正する場合

この場合の被校正器物である周波数標準器には、周波数発生器や周波数カウンターなどの各種計測機器に内蔵されているタイムベースも含まれる。

CMC を求めるためには周波数カウンターの不確かさを推定する必要がある。雑音のない理想的な単一の周波数の信号が入力された時に周波数カウンターで周波数値を複数回測定した場合に計測されるばらつきは、必ずしも周波数カウンターに参照周波数を供給している特定二次標準器の安定度とは整合しないし、実際にはオフセットも観測される。従って、CMC を算出する際には、これらの影響をカタログデータや実測により評価し、特定二次標準器の不確かさに加算する必要がある。

参照信号・測定信号の雑音レベルや、トリガレベルのドリフトなどによる不確かさ、すなわちシステム雑音のレベルは、特定二次標準器からの標準信号を分配増幅器やパワー分割器で2つに分岐し、一方を周波数カウンターの外部参照信号入力端子に、もう一方を周波数カウンターの測定信号入力端子に入力し、平均時間ごとの標準偏差を測定することで、A タイプの不確かさとして見積もることができる。この場合、測定信号入力端子に入力している信号は実際の信号であるため雑音を含み、厳密な意味で「DUT の影響を含まない」とはいえないが、少なくともシステム雑音のレベルは必要とする CMC に比べて十分小さくなっている必要がある。

周波数カウンターの周波数オフセットに起因する B タイプの不確かさは製造者仕様値を参考にして推定し、上記のシステム雑音を実測する際に同時に得られる周波数値の平均が周波数オフセットの製造者仕様値を超えていないかを確認する。

2.2.2 位相計により周波数標準器を校正する場合

位相計を用いたとき、参照信号に対する測定信号の位相差を $\Delta\phi$ で表すと、周波数差 Δf は

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi}\cdot\frac{d\Delta\phi}{dt} \qquad (2\text{-}3)$$

で表される。観測時間が t_1 から t_2 までであったとき、その間の周波数差の平均値は

$$\overline{\Delta f} = \frac{1}{(t_2 - t_1)}\cdot\int_{t_1}^{t_2}(\Delta f)dt = \frac{1}{2\pi(t_2 - t_1)}\left[\Delta\phi(t_2) - \Delta\phi(t_1)\right] \qquad (2\text{-}4)$$

で表される。すなわち、測定開始時の位相差 $\Delta\phi(t_1)$ と測定終了時の位相差 $\Delta\phi(t_2)$ の差が、厳密な意味での周波数差の平均の測定値を与える。

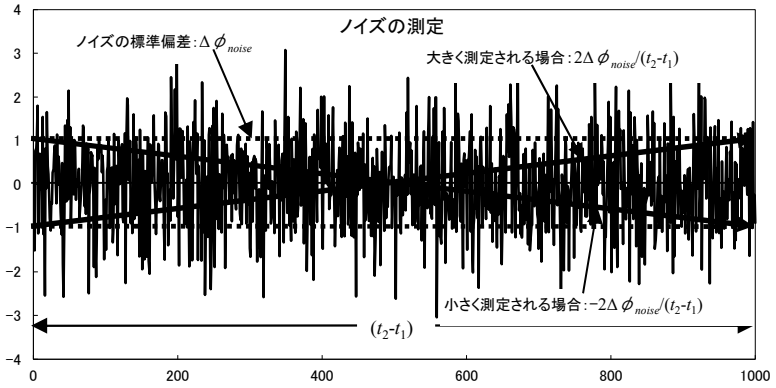
2.2.2.1 位相計のノイズレベル

位相計のノイズレベルは、参照信号入力端子と測定信号入力端子に安定な同一信号を入力し、その出力レベルの変動を測定することによって測定できる。このレベルを $\Delta\phi_{noise}$ で表すと、測定の不確かさに与える影響は

$$\left|\overline{\Delta f_n}\right| \le \frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\sqrt{2}\Delta\phi_{\mathrm{noise}}}{(t_2 - t_1)} \qquad (2\text{-}5)$$

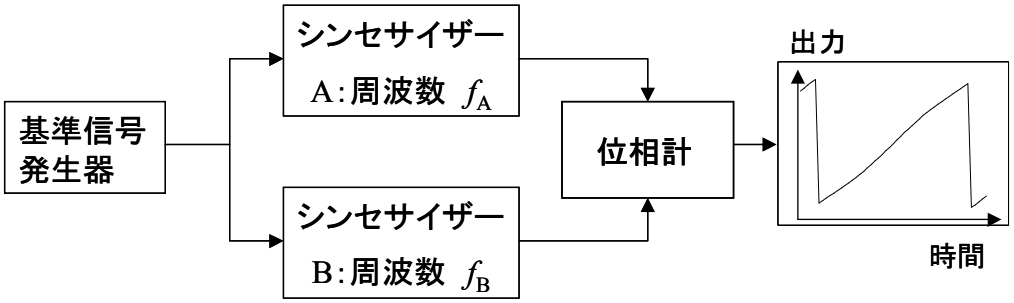
で表される。この $\Delta\phi_{noise}$ の値はノイズの種類に依存するが、白色雑音であれば標準偏差で表すことができる。（下の図を参照。）

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です



2.2.2.2 出力信号の直線性の測定

位相計を用いた場合、その応答の非直線性を評価することが重要である。現場では様々な方法が用いられていると考えられるが、下図はその一例である。

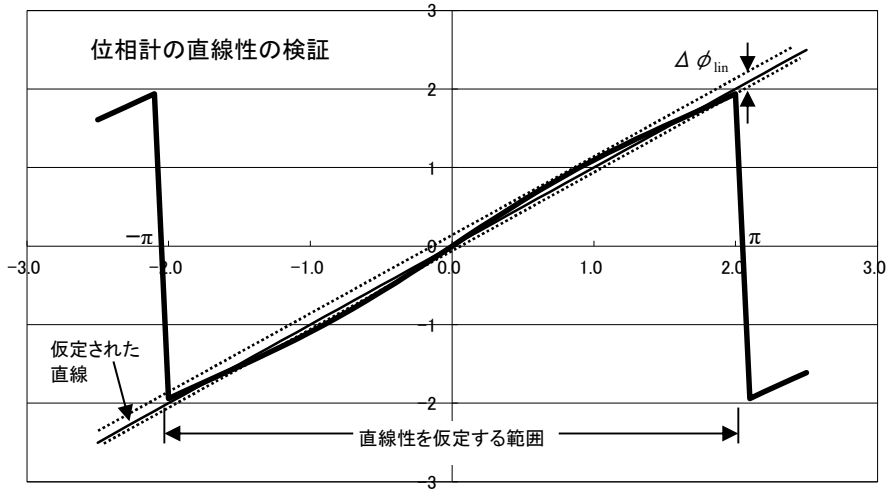


ここでは、同一の基準信号を2つの周波数シンセサイザーに入力し、それぞれの周波数の差$\left[f_{\mathrm{A}}-f_{\mathrm{B}}\right]$が、例えば mHz 程度となるように設定する。この周波数差は、位相計の応答速度を考慮して決める。横軸は時間であるが、これは$\left[f_{\mathrm{A}}-f_{\mathrm{B}}\right]$に基づいて位相が変化するのでその周期が計算されるが、その周期が位相差の2πに対応している。この測定方法では、2つの周波数シンセサイザーの出力位相がこの測定に影響が出ない程度に安定な状態であることを確認することが重要であるが、それは$f_{\mathrm{A}}=f_{\mathrm{B}}$に設定することによって確認することができる。この作業は位相計の校正作業であり、これによって測定の補正を行う場合には、周波数計測の不確かさは上記のノイズレベルや位相計の特性の安定性に依存する。これらは個々に測定し、評価するする必要がある。一方、「位相計は直線性の維持される範囲で測定する」との考えの基に測定を行う場合は、直線性の限界範囲を$\Delta\phi_{lin}$としたときに、周波数測定の不確かさは以下のように評価することができる。

$$\left|\overline{\Delta f_{lin}}\right| \le \frac{1}{2\pi\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta\phi_{lin}}{(t_2 - t_1)} \qquad (2\text{-}6)$$

実際の位相計では、それぞれ独自の応答に対応した評価を行うことが必要である。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です



2.2.3 タイムインタバルカウンターにより周波数標準器を校正する場合

発振器の信号の位相を $\phi(t)$ とし、公称周波数を f_0 とすると位相時間 $\tau(t)$ は、

$$\tau(t) = \frac{\phi(t)}{2\pi f_0} \qquad (2\text{-}7)$$

と定義される。これを用いると、2つの信号(参照信号と測定信号)の位相差は、

$$\Delta\phi = 2\pi f_0 \tau_A - 2\pi f_0 \tau_B = 2\pi f_0 \Delta\tau \qquad (2\text{-}8)$$

と書くことができ、位相差を時刻差に焼き直すことができる。

従って、(2-3)式から、周波数差 Δf は

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Delta\phi}{dt} = f_0 \frac{d\Delta\tau}{dt} \qquad (2\text{-}9)$$

で表される。観測時間が t_1 から t_2 までであったとき、その間の周波数差の平均値は

$$\overline{\Delta f} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (\Delta f) dt = f_0 \frac{\Delta\tau(t_2) - \Delta\tau(t_1)}{t_2 - t_1} \qquad (2\text{-}10)$$

となる。すなわち、測定開始時の時刻差 $\Delta\tau(t_1)$ と測定終了時の時刻差 $\Delta\tau(t_2)$ の差が、周波数差の平均の測定値を与える。

2.2.3.1 タイムインタバルカウンターのノイズレベル

タイムインタバルカウンターのノイズレベルは、参照信号入力端子と測定信号入力端子に安定な同一信号を入力し、その出力レベルの変動を測定することによって測定できる。このレベルを $\Delta\tau_{noise}$ で表すと、測定の不確かさに与える影響は

$$\left|\overline{\Delta f_{noise}}\right| \le \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}\Delta\phi_{noise}}{(t_2 - t_1)} = f_0 \frac{\sqrt{2}\Delta\tau_{noise}}{t_2 - t_1} \qquad (2\text{-}11)$$

で表される。この $\Delta\tau_{noise}$ の値はノイズの種類に依存するが、白色雑音であれば標準偏差で表すことができる。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

2.2.4 GPS 時刻比較受信機により周波数標準器を校正する場合（遠隔校正）

2.2.4.1 GPS コモンビュー法の原理

周波数遠隔校正法として、国際度量衡局（BIPM）で国際原子時（TAI）を決定する際に広く用いられている GPS コモンビュー法[1)]を用いる。この方法は、遠隔複数地点におかれた周波数標準器の周波数・時刻を比較する時、各地点で同時に同一の GPS 衛星の信号を受信して、GPS time と比較対象の周波数標準器の時刻との差を求める。それらのデータの差をとることにより、GPS time は相殺され、遠隔地点におかれた周波数標準器間の時刻比較が行われる。さらに、時間をおいて測定することにより、時刻比較結果の差から周波数比較を行うことができる。

図 1（巻末）に原理図を示すが、GPS コモンビュー法により、登録事業者と顧客側で同時に GPS 衛星からの信号を受信し、両者における基準時計（登録事業者の場合は、特定 2 次標準器）を基準として GPS time との時刻比較を実施する。

用いる GPS 受信機は、時刻比較のための標準フォーマットである CGGTTS Format[2)]で受信結果を出力できるものを対象としている。

依頼者側の受信結果は、定期的に登録事業者側周波数遠隔校正サーバにインターネット等を介して伝送され、登録事業者での受信結果との差が計算される。**図2**（巻末）に周波数遠隔校正運用時の概念図を示す。

登録事業者側では、特定 2 次標準器を基準にして GPS 衛星を受信しており、依頼者側の受信結果と同一観測（観測開始時刻、観測時間長、観測衛星が同一）のものを抽出して差をとり、GPS time を仲介として、特定 2 次標準器と顧客側校正器物の時刻差を計算する。

すなわち、測定時刻 t_1 における特定 2 次標準器の示す時刻を $JCSS(t_1)$とし、顧客側の標準器の示す時刻を $User_clock(t_1)$としたとき、

登録事業者側測定値

$$\Delta T_{JCSS}(t_1, PRN\#n) = JCSS(t_1) - GPS_time(t_1) + Error_{JCSS} \qquad (1) \quad \leftarrow$$

顧客側測定値

$$\Delta T_{client}(t_1, PRN\#n) = User_clock(t_1) - GPS_time(t_1) + Error_{client} \qquad (2)$$

(1),(2)式で、$PRN\#n$ は、GPS 衛星識別番号を示し、$Error_{JCSS}$,$Error_{client}$ は、各種誤差要因により生ずる誤差成分である。

(1)式と(2)式の差から特定 2 次標準器と顧客側校正器物の時刻差は、次式のように求まる。

$$\Delta T(t_1, PRN\#n) = \Delta T_{JCSS}(t_1, PRN\#n) - \Delta T_{client}(t_1, PRN\#n)$$
$$= JCSS(t_1) - User_clock(t_1) + Error_{JCSS} - Error_{client} \qquad (3) \quad \leftarrow$$

両者の周波数差は、τ 秒後に同様の測定を行うことにより、

$$\Delta f(t_1, PRN\#n) = \left[\Delta T(t_1, PRN\#n) - \Delta T(t_1 + \tau, PRN\#n)\right] / \tau \qquad (4)$$

として求まる。

顧客側受信機に対する必要条件は、上述の様に、時刻比較の国際標準フォーマットである CGGTTS 形式でデータを出力できることである。このような受信機は、古典的なシングルチャネル受信機（同時に受信できる GPS 衛星数が 1 個のもの）やマルチチャネル受信機（複数の GPS 衛星を同時に受信することができるもの）が存在する。基本的な原理は、同時に受信できる衛星数には基本的には依存しないが、複数衛星を同時受信できる受信機は、測定の回数を飛躍的に増大することができ、不確かさを向上する上で有効である。すなわち、シングルチャネルで 1 日の受信スケジュール設定が 48 観測のものに比べ、マルチチャネルの受信機では、最大 700～900 観測/日まで増大することが可能である。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

3. 特定二次標準器を用いて DUT を校正する際の不確かさの算出

一般に、発振器の中長期の周波数変動は白色雑音以外によるものであるため、通常の統計的な手法により不確かさを決定するのが難しい。周波数の校正に関しては不確かさの考え方に2つの極端な考え方がある。一つは、

（1）校正の際に与えられる不確かさは、周波数が測定された期間におけるものであり、したがって、ほぼ CMC に近い値がつけられるべきである。校正者と被校正者にはそれぞれ責任分担があるが、DUT 校正後の長期的な周波数変化等による不確かさの管理については基本的には被校正者（ユーザー）側の責任となる。すなわち、校正後の発振器の周波数変化等の評価は、製造者仕様値を調べたり、実測したりして、被校正者が自ら考えることになる。この考え方の問題点としては、被校正者が校正結果である「周波数値 f_0 、拡張不確かさ$U(k=2)$」という値を持ち帰ったときに、「自分の周波数標準器の周波数はいつでも $f_0 - U$ ～ $f_0 + U$ の範囲に入っている」と誤解する可能性が大きいことである。校正者と被校正者は協力し、また必要に応じて校正者は被校正者に積極的に指導を行い、また、技術相談にも積極的に応じることが必要である。校正時には注意を促し、製造者仕様や実測でこの点を確認するよう助言する事も重要である。

もう一つは、

（2）校正者はDUTの長期間にわたる周波数変化等の特性も把握・測定し、DUTが校正を受けたあと、次の校正までの間に、95 %の確率で入るような不確かさを「拡張不確かさ」としてつけるべきである。この問題点としては「校正者は測定していない期間のDUTの周波数変化などを知るすべがない」ということが挙げられる。この考え方を採用する場合、実測をあきらめて製造者仕様を参照して器物に特有の典型的な値をつけるか、何回かの校正結果を元にして長期的に校正値を決定していくことも考えられる。

GUMの基本的な考え方は（1）であるため、本ガイドでも基本的には（1）の考え方を採用するが、世界的な動向では「校正証明書の不確かさには、CMCだけでなく、測定期間中のDUTの変動分についても何らかの形で評価して含めよう」という方向で進んでいる。さまざまな議論があるが、現在のところ世界的に合意された方法はない。

このような現状を考慮し、このガイドでは機械的に下記のような方法で不確かさを推定する事を提案する。すくなくともこの方法では雑音の要因がランダムである場合は通常の統計的な方法と一致する不確かさを与えるという利点がある。

3.1 特定二次標準器と周波数カウンターを用いた DUT の校正

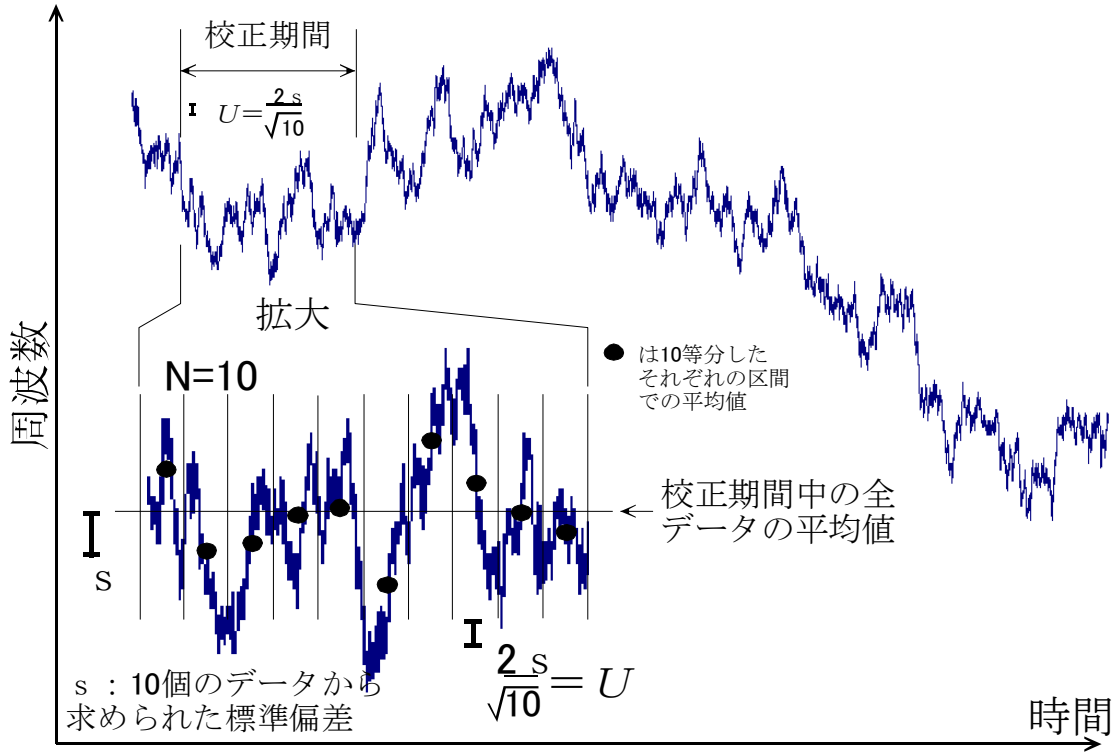
周波数標準器（公称値 f_{set} ）を周波数カウンターにより測定し、ゲート時間 τ で、N 回測定し、N 個のデータを取る場合を考える。ゲート時間と測定回数は被校正者と取り決める。N 回の周波数測定 $f_{\mathrm{i}}(i=1 \sim N)$ の平均値を f_{ave} とし、その標準偏差を s とすると、校正値は f_{ave} 、平均値のAタイプの標準不確かさは $u_{\mathrm{measured}} = s/\sqrt{N}$ となる。これから、校正された結果の拡張不確かさは下記となる。

$$U = 2 \times \sqrt{u_{\mathrm{measured}}^2 + u_{\mathrm{initial}}^2 + u_{\mathrm{longterm}}(T)^2 + u_{\mathrm{env}}^2} \qquad (3\text{-}1)$$

上記の手順に従って、シミュレートしたデータを用いて$U = 2 \times u_{\mathrm{measured}}$ を算出した結果が下記の図である。（ここでは、u_{measured} と比較して、u_{initial} 、$u_{\mathrm{longterm}}(T)$ 、u_{env} を無視した。）

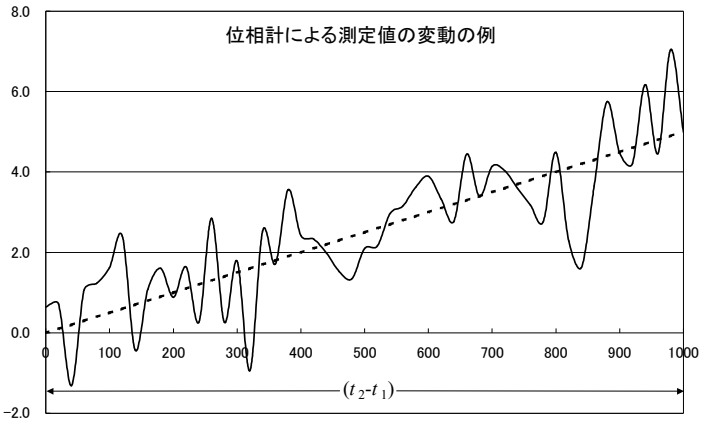
図中で、U の隣に不確かさを表す棒が書いてあるが、この結果からも、この方法で求められた*U*がいかに小さい不確かさを与えるかが分かり、また「不確かさ」の意味するところを十分考慮しなければならないことが分かる。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です



3.2　特定二次標準器と位相計を用いた DUT の校正

下の図に見られるように、実際のデータでは、周波数差に比例した直線のデータに DUT の位相変動による成分が加算されて観測される。測定期間内の厳密な測定結果は、式(2-4)で与えられるが、点線で示されるような直線を最小自乗法で決定し、それを測定値とする方法も採られることがある。しかし、ここではガイドの本文の趣旨に従って、それぞれの測定値は式(2-4)による評価とし、$N=10$ 以上のデータでその標準偏差を評価する方法を採用することにする。実際のデータでは、この例のように直線性が仮定しやすい場合ばかりではなく、数少ないデータから様々な仮定を導入することは混乱を招きかねない。ただし、今後多くの事例が積み重ねられ、直線近似の適切性が証明された場合には見直しを行うべきである。



このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

3.3 特定二次標準器とタイムインタバルカウンターを用いた DUT の校正

タイムインタバルカウンターを用いた DUT の校正の場合も3．2．と同様に考えることができる。この場合は測定期間内の厳密な測定結果は式(2-10)で与えられる。そのほかの点についても「位相」を「位相時間」に置き換えて読むことで、3．2．で述べたことをそのまま適用することができる。

3.4 特定二次標準器とGPS受信機を用いた DUT の校正

GPS コモンビュー法における不確かさの要因としては、GPS 衛星の軌道誤差によるもの、搭載原子時計に起因するもの、GPS 衛星からの信号の伝搬路上伝搬媒質（電離層、大気層）に起因するもの、受信アンテナ位置誤差によるもの、受信機によるもの、マルチパスによるものが挙げられる。また、GPS コモンビュー法では、各誤差要因が依頼者側の受信点と登録事業者との位置と距離並びに衛星の位置に依存して複雑に変動する。

さらに、受信機による誤差も受信チャネル数（同時受信できる衛星数）やスケジュールできる観測数などの要素に依存する成分があり、複雑に関連しているため、定式化して評価することが難しい。

このため、GPS コモンビュー方式を用いた周波数遠隔校正では、

受信機の種類
- ・マルチチャネルかシングルチャネルか（1 日の観測数）

電離層遅延
- ・太陽活動極大期と極小期

依頼者側受信点位置
- ・当所からの基線長

で場合分けして、各誤差要因に関して不確かさのガイドラインを以下で記す。

(a) GPS 衛星軌道誤差

GPS から実時間で利用者に提供されている放送軌道要素の誤差は、数 m～10 m 程度とされており [3]、コモンビュー方式の場合、基線長が長いほど軌道誤差による影響が大きくなる。また、衛星と地上の 2 地点の位置関係で影響の大きさが異なるが、光速度を c、衛星軌道誤差を ΔR とし、基線長を D、地表から GPS 衛星までの距離を R とすると、軌道誤差の時刻比較に対する影響は、概略

$$\Delta t \sim (\Delta R \cdot D/R) / c$$

と考えることができる。

表 1 の軌道誤差による不確かさは、ΔR = 5 m とし、R の平均値として 22,700 km を仮定して 24 時間平均で求めたものである。シングルチャネルとマルチチャネル受信機での違いは、サンプル数として 10 倍を考慮して $1/\sqrt{10}$ としている。

(b) 搭載時計誤差

搭載原子時計の誤差に起因する影響は、コモンビューが完全な形で行われていると仮定し、0 とした。

(c) 電離層遅延

電離層は長期的には、太陽活動度（11 年周期）、季節に依存して変化し、日周的にも地球自転に伴い変動する。このため、正確な電離層活動に伴う不確かさは推定し難いが、GPS 衛星の L1（1557.42 MHz）一周波による単独測位での電離層誤差は概ね 40 cm～10 m 程度とされている [3]。また、GPS 衛星からの航法情報には電離層遅延の補正モデルが含まれており、通常、L1 一周波受信機では、この補正モデルを用いて電離層遅延を補正している。

コモンビュー方式時刻比較の場合は登録事業者と顧客の両地点における電離層遅延の差分として影響するため、両地点の位置関係、距離に依存するため相当部分は相殺される。これらの効果により、コモンビュー方式での電離層遅延の影響は、実際の電離層遅延の絶対値に比し、数分の 1 に軽減されている。

以上の様に、電離層遅延に起因する不確かさの評価の定式化は困難であるが、日本付近における不確かさのガイドラインとして、表 1 に記した値を設定した。すなわち、受信機の種類、登録事業者と顧客の距離（近距離（50 km 程度）、中距離（500 km 程度）、長距離（1,600 km 程度））、並びに太陽活動度としては極大期における値を想定している。この値は、24 時間平均における値である。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

(d) 大気遅延

大気遅延は、量的には乾燥大気で 2 m～3 m、うち水蒸気遅延で 40 cm 程度の遅延である [3)]。大気遅延に関しては、GPS からは補正モデル等は提供されないが、通常 GPS 受信機内でモデルを用いて補正が行われている。量的には電離層遅延に比べ 1 桁程度小さい値となるが、電離層遅延同様、定式化した評価は困難である。表 1 の不確かさは、両地点の差分が影響するため、2 地点間の距離、受信機のタイプで場合分けして評価を行った。

(e) 受信点位置誤差

受信点位置誤差は、1 セッションにおけるばらつき(マルチチャネル受信機では同時複数受信した結果のばらつき)に影響するため短期での時刻比較結果の劣化につながる要因である。1 日以上の観測時間では一定のばらつきと見なすことができる。1 m の受信点位置誤差は、1 日間の観測で概ね 3 ns p-p に相当する。表 1 では、これを周波数偏差に換算して不確かさを計上した。マルチチャネル受信機では、サンプル数の観点から不確かさをシングルチャネル受信機の $1/\sqrt{10}$ とした。

(f) 受信機雑音

受信機雑音による影響とは、主に受信信号と受信機内熱雑音(アンテナ雑音を含む)の比(S/N)に起因する。一般的な GPS 時刻比較受信機での性能としては、CGGTTS フォーマットにおける国際時刻比較での 13 分間平均値のバラツキとしては、3 ns 程度である。マルチチャネル受信機では、同時に複数個の衛星を受信できることから、シングルチャネルの受信機に比べ $1/\sqrt{10}$ 程度の不確かさとして計上した。実際の校正サービスにおいては、初期検査などで受信機の性能を評価することが望まれる。

(g) マルチパスによる誤差

マルチパスとは、アンテナ近くに障害物があった場合にそれからの反射波を受信することで正しくない擬似距離が測定されてしまうことである [3)]。マルチパスの影響は、受信機の性能や受信環境に依存するため、数値的に議論することが難しい。CMC 計算上表 1 では、一般的な受信機並びに受信環境を想定し、不確かさシングルチャネル受信機で数 ns、マルチチャネル受信機でも同等として計上した [4)]。

表1 周波数遠隔校正の不確かさ要因とその大きさ

平均化時間＝1 日、1 σ ($k = 1$)

	シングルチャネル			マルチチャネル		
	50 km	500 km	1,600 km	50 km	500 km	1,600 km
(a)GPS衛星軌道	5.0×10^{-16}	5.0×10^{-15}	2.0×10^{-14}	2.0×10^{-16}	2.0×10^{-15}	5.0×10^{-15}
(b)GPS搭載時計	0	0	0	0	0	0
(c)電離層遅延	5.0×10^{-14}	1.0×10^{-13}	5.0×10^{-13}	3.0×10^{-14}	5.0×10^{-14}	3.0×10^{-13}
(d)大気遅延	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	8.0×10^{-15}	8.0×10^{-15}	8.0×10^{-15}
(e)受信点位置	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	1.0×10^{-14}	1.0×10^{-14}	1.0×10^{-14}
(f)受信機雑音	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	1.0×10^{-14}	1.0×10^{-14}	1.0×10^{-14}
(g)マルチパス	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}	3.0×10^{-14}
合成標準不確かさ	7.8×10^{-14}	1.2×10^{-13}	5.0×10^{-13}	4.5×10^{-14}	6.1×10^{-14}	3.1×10^{-13}

(不確かさ要因はすべて正規分布とした)

(h) 補足事項

前項までのGPS コモンビュー法による遠隔校正の不確かさのガイド値は、各要因に関して余裕を見た数値を記してあり、通常はこの範囲を超えることは無いと考えられる。ただし、電離層活動などの自然現象やマルチパスなどアンテナ設置条件に依存する要因は、想定される範囲を超える変化をすることもあり得る。このため、登録事業者側では、顧客側の受信結果や自己の受信データなどから発行する証明書に記す不確かさを判断する技能を有することが望まれる。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

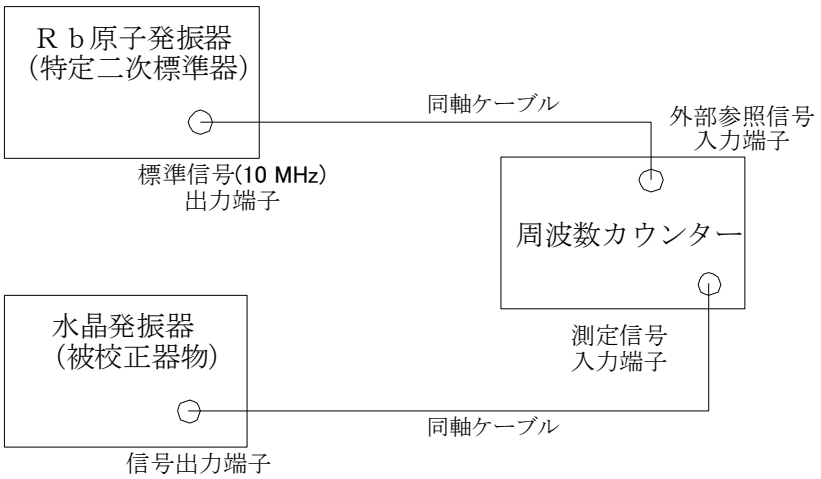
以上、特定二次標準器や測定系の限界に近い CMC を宣言する場合の手順をかなり厳密に述べたが、宣言する CMC に応じてより簡便な評価方法が妥当な場合もあると考えられる。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

具体的な評価の例

特定二次標準器と周波数カウンターを用いた周波数標準器（水晶発振器）の校正

ここでは例として、下図のように Rb 原子発振器を特定二次標準器として、周波数カウンターを用いてゲート時間 100 秒で公称周波数 10 MHz の水晶発振器の校正を行う場合を考える。



100 秒のゲート時間で 10 個のデータを取りこれを平均したものを校正データとして用いるとする。特定標準器による特定二次標準器の校正からは6ヶ月が経過しているものとする。以下で、不確かさはすべて相対不確かさで表す。（校正例は実際に周波数カウンター内蔵の水晶を校正したものである。）

特定標準器による特定二次標準器の校正結果は、相対周波数偏差＋7×10^{-13}、相対拡張不確かさ $U_{\mathrm{initial}}=5\times10^{-13}$（$k=2$、従って、相対標準不確かさ 2.5×$10^{-13}$）であったとする。

なお、Bタイプの不確かさを推定するために製造者仕様を用いる場合、不確かさの信頼水準を知る必要がある。製造者仕様に（たとえば 95 %といった）信頼水準が明記してある場合、この値を用いて標準不確かさを推定することが可能であるが、一般的には信頼水準が明記されていない場合が多い。この場合製造者仕様は許容値すなわち「最大最小を表しその分布は不明」である場合が多く、一様分布として取り扱うことが妥当であると考えられるが、信頼度水準が与えられていない場合は必要な情報収集をおこなうこと。併せて、製造者仕様の有効な期間に関しても必要な情報収集を行って評価・確認を行うか、あるいは自己評価により確認することが望ましい。

CMC の計算

(a) 特定二次標準器の不確かさの推定

- 長期の周波数変化量の推定：製造者仕様から、たとえば、長期周波数安定度として、5×10^{-11}/m、5×10^{-10}/yが得られる。これらの大きい方として5×10^{-11}/mを採用する。6ヶ月が経過しているので、5×10^{-11}×6＝3×10^{-10}。一様分布を仮定して、標準不確かさは、

  $3\times10^{-10}/\sqrt{3}=1.73\times10^{-10}$ となる。

- 周波数安定度の推定：製造者仕様から、100秒の周波数安定度として、たとえば、2×10^{-12}が得られる。10個のデータの平均を取るとすると1000秒における周波数安定度が必要になり、製造者仕様から、たとえば1×10^{-12}が得られる。周波数安定度はアラン標準偏差で与えられているため、この値は相対標準偏差と解釈される。
- 再現性・環境依存性の推定：製造者仕様から、たとえば、三日間電源をオフにして再度オンにした

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

時の再現性として、5×10^{-11}が得られる。一様分布を仮定すると、

$5\times10^{-11}/\sqrt{3}=2.89\times10^{-11}$となる。また、温度依存性として 1×10^{-10}（10 ℃～40 ℃）、磁場依存性として(2×10^{-6}/T)、電源電圧依存性として 4×10^{-12}（±10%の電源変動に対して）が得られる。これから、特定二次標準器が特定標準器により校正された時と、事業所に持ち帰られたときの温度、磁場、電源電圧の差と事業所内での変動分をあわせたものをそれぞれ、5 ℃、5×10^{-5} T、5%とすると、温度変化、磁場変化、電源電圧変化による周波数変化はそれぞれ、

$1\times10^{-10}\times$(5 ℃／(40 ℃－10 ℃))$/\sqrt{3}$ ＝9.6×10^{-12}、

2×10^{-6}/T$\times5\times10^{-5}$ T$/\sqrt{3}$ ＝5.77×10^{-11}

$4\times10^{-12}\times5\%／20\%/\sqrt{3}$ ＝$1\times10^{-12}/\sqrt{3}$ ＝5.8×10^{-13}

と計算される。

- Rb原子発振器の出力周波数の湿度や大気圧による影響については製造者仕様がなかったため、校正機関に評価を依頼し、申請するCMCと比較して影響が小さいことが分かったため無視する。
- 特定標準器による特定二次標準器の校正の際の運搬に伴う振動やショックについては、十分静かに運搬を行うと仮定して無視する。

補足説明

（1）特定二次標準器の長期的な周波数変動の推定

長期的な周波数変動の推定に関して、製造者仕様が不明な場合や製造者仕様よりも小さい不確かさを宣言したい場合などは、各種手段（他の標準器との比較、GPS コモンビュー法など）により、その標準器の周波数変化を監視し、長期的変動量を推定することができる。この方法は、特定二次標準器として運用する際の定常的なモニター手段として有効であり、その長期的安定性の評価や異常の発見などの手段として活用できる。

（2）環境温度、湿度、磁場、電源電圧の変化、電源のオンオフ、などによる周波数変化量

環境温度、湿度、磁場、電源電圧の変化、電源のオンオフによる周波数変化について、器物製造後の経過年数が長い上にその間のメンテナンス等の記録も無いような場合、製造者仕様値の保証が明確でない場合、製造者仕様値が記載されていない場合、或いは、製造者仕様値よりも小さい不確かさを用いるような場合は、実測データを用いて評価する。

評価方法の例

これらの評価の際には、一般には特定二次標準器と同等の周波数安定度を有する参照用標準器が必要になる。しかし安定度だけが必要とされるので、例えば GPS 従属発振器なども用いることができる。

温度特性：特定二次標準器を、周波数計測を行う部屋とは別の部屋（恒温槽などが望ましいが、室温を変化可能な空調設備のある室内でも可）へ設置し、室温を品質システムで決めている範囲で変化させ、出力周波数を周波数カウンターで測定する。

湿度特性：温度特性と同様に、空調設備や加湿装置などを用いて室内の湿度を品質システムで決めている範囲で変化させて、特定二次標準器の出力周波数を周波数カウンターで測定する。

磁場特性：地球磁場を利用し、特定二次標準器の設置方向を 180 度変更して磁場の方向を変化させて出力周波数の変化を周波数カウンターで測定する。（磁場環境は試験室によって大きく異なるので、

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

それに適した方法を選ぶことが重要である。）

(b) システム雑音の推定

- 特定二次標準器からの標準信号(10 MHz)をパワー分配器、または分配増幅器により2分割する。
- 1つの 10 MHz を周波数カウンター背面の外部参照信号入力端子に、もう一つの 10 MHz を全面パネルの測定信号入力端子に入れる。
- ゲート時間 100 秒で十分な回数、たとえば「10 個のデータ」を 10 回取得する。ここでは「10 個のデータ」の平均値を校正データとしているので、サンプル数としては 100 個となる。
- 得られたデータから平均値（f_{system}）と標準偏差（s_{system}）を計算する。たとえばこのとき、平均値 f_{system} ＝−1.5×10^{-13}、標準偏差 s_{system} ＝1.0×10^{-12}、と測定される。
- （さらに必要なら、いくつかのゲート時間で同様のことを行うと、ゲート時間 τ の関数として標準偏差が 1×10^{-10}／τ と求められる。）

(c) 周波数カウンターのオフセットの推定

- 製造者仕様に「Systematic Uncertainty」等として周波数オフセットの最悪値が記述されている。これから、たとえば、タイムベースの不確かさを除くと周波数オフセットは「100 ps／ゲート時間」であることがわかる。一様分布を仮定して、最大のオフセットとして

  100 ps/100 s＝1×10^{-12} / $\sqrt{3}$ ＝5.6×10^{-13}

  が得られる。
- (b)で得られた f_{system} と公称周波数である10 MHzの差が、上記5.6×10^{-13}より小さくなっていることを確認する。確かにそうなっている。

Rb原子発振器（特定二次標準器）で DUT を校正する際の不確かさの計算

DUTを周波数カウンターにより測定し、ゲート時間100秒で10回測定する。10回の測定の平均値は f_{ave} ＝−1.0×10^{-8}、その標準偏差 s は2.0×10^{-8}であった。これから、平均値のAタイプの標準不確かさは、$u_{\mathrm{measured}} = s/\sqrt{10}$ ＝6.3×10^{-9}となる。

以上をまとめたものが次ページの表である。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

まとめ

CMC の計算

不確かさの要因	不確かさの推定法	推定した分布	不確かさ
A.特定二次標準器の不確かさ	$=(A1^2+A2^2+A3^2+A4^2+A5^2+A6^2+A7^2)^{1/2}$		1.8×10^{-10}
(A の内訳)			
A1.不確かさの初期値	jcss校正証明書の記載値×(1/2)	正規	2.5×10^{-13}
A2.長期の周波数変化	製造者仕様値(5×10^{-11}/m、5×10^{-10}/y)の大きな方(前者)に6ヶ月をかけた値を$\sqrt{3}$で割ったもの。	一様	1.7×10^{-10}
A3.電源切断時の再現性	製造者仕様の再現性 5×10^{-11} を$\sqrt{3}$で割ったもの。	一様	2.9×10^{-11}
A4.温度依存性	製造者仕様の温度依存性1×10^{-10}(10℃～40℃)を用い、温度変化 5℃を仮定	一様	9.6×10^{-12}
A5.磁場依存性	製造者仕様の磁場依存性(2×10^{-6}/T)を用い、磁場の変化 5×10^{-5} T を仮定	一様	5.8×10^{-11}
A6.電源電圧依存性	製造者仕様の電源電圧依存性 4×10^{-12}(±10%)を用い、電源電圧変動 5%を仮定	一様	5.8×10^{-13}
A7.短期周波数安定度	製造者仕様より平均時間 1000 s で 1×10^{-12}	正規	1.0×10^{-12}
B.周波数カウンターのシステム雑音	$1\times10^{-10}/\tau$	正規	1.0×10^{-12}
C.周波数カウンターの周波数オフセット	ゲート時間 100 秒で 1×10^{-12}(製造者仕様より)	一様	5.6×10^{-13}
合成標準不確かさ (＊)	$(A^2+B^2+C^2)^{1/2}$		**1.8×10^{-10}**
CMC (k=2) (上記の合成標準不確かさの2倍)			**3.6×10^{-10}**

Rb原子発振器(特定二次標準器)で DUT を校正する際の不確かさ

不確かさの要因	不確かさの推定法	不確かさ
D.校正システムの不確かさ	(＊)から周波数安定度(A7)とシステム雑音(B)を除いたもの。	1.8×10^{-10}
E.Aタイプの不確かさ	実測データの標準偏差(ゲート時間 100 秒で 10 回データを取得した時の標準偏差を$\sqrt{10}$で割ったもの)	6.3×10^{-9}
合成標準不確かさ	$(D^2+E^2)^{1/2}$	6.3×10^{-9}
拡張不確かさ(k=2) (上記の合成標準不確かさの2倍)		**1.3×10^{-8}**

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

１２頁から、特定標準器による特定二次標準器の校正結果は f（特定二次標準器）＝（1＋7×10^{-13}）×10 MHz であった。また、１４頁から f（DUT）＝（1－1.0×10^{-8}）× f（特定二次標準器）であったから、結局、最終的な校正値と不確かさは

$$f(\mathrm{DUT}) = (1-1.0\times10^{-8})(1+7\times10^{-13})\times10\,\mathrm{MHz} \cong (1-1.0\times10^{-8})\times10\,\mathrm{MHz}\ (\text{校正値})$$

$$U(\mathrm{DUT}) = 1.3\times10^{-8}\ (\text{拡張不確かさ}(k=2))$$

となる。

この結果を公称値からの相対周波数偏差で表すと、

校正値　　−1.0×10^{-8}　　（公称値からの相対周波数偏差）
不確かさ　　1.3×10^{-8}　　（相対拡張不確かさ（k＝２））

とかける。

また、周波数値で直接表現すれば、

校正値　　9999999.90 Hz
不確かさ　　0.13 Hz　（拡張不確かさ（k＝２））

となる。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

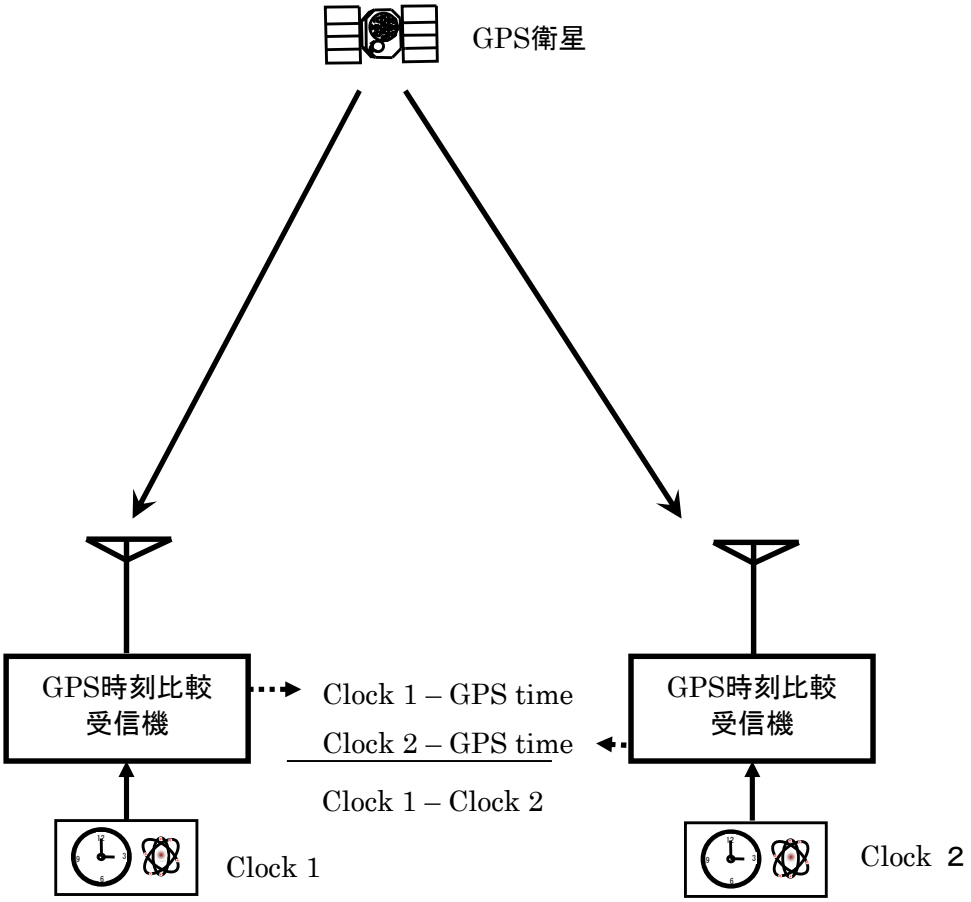


図1 GPS common-view 法の概念図

参考）GPSシステムは、GPS timeと呼ばれるGPSシステムの統一的な時系に基づいて運用されている。このGPS timeは地上の基準時計並びに衛星搭載時計の群管理により計算される時系でありGPSのマスターコントロールセンターで維持される。個々のGPS衛星からは、搭載時計とGPS timeとの差の情報が送信されており、利用者はGPS衛星からの信号を受信処理することにより、利用者サイトの基準時計とGPS timeとの差を知ることができる。なお、GPS timeは米国海軍天文台(USNO)の維持する時系（UTC(USNO)）に1 μs以内に維持するように規定されているが、実際は数10 ns以内で維持されている。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

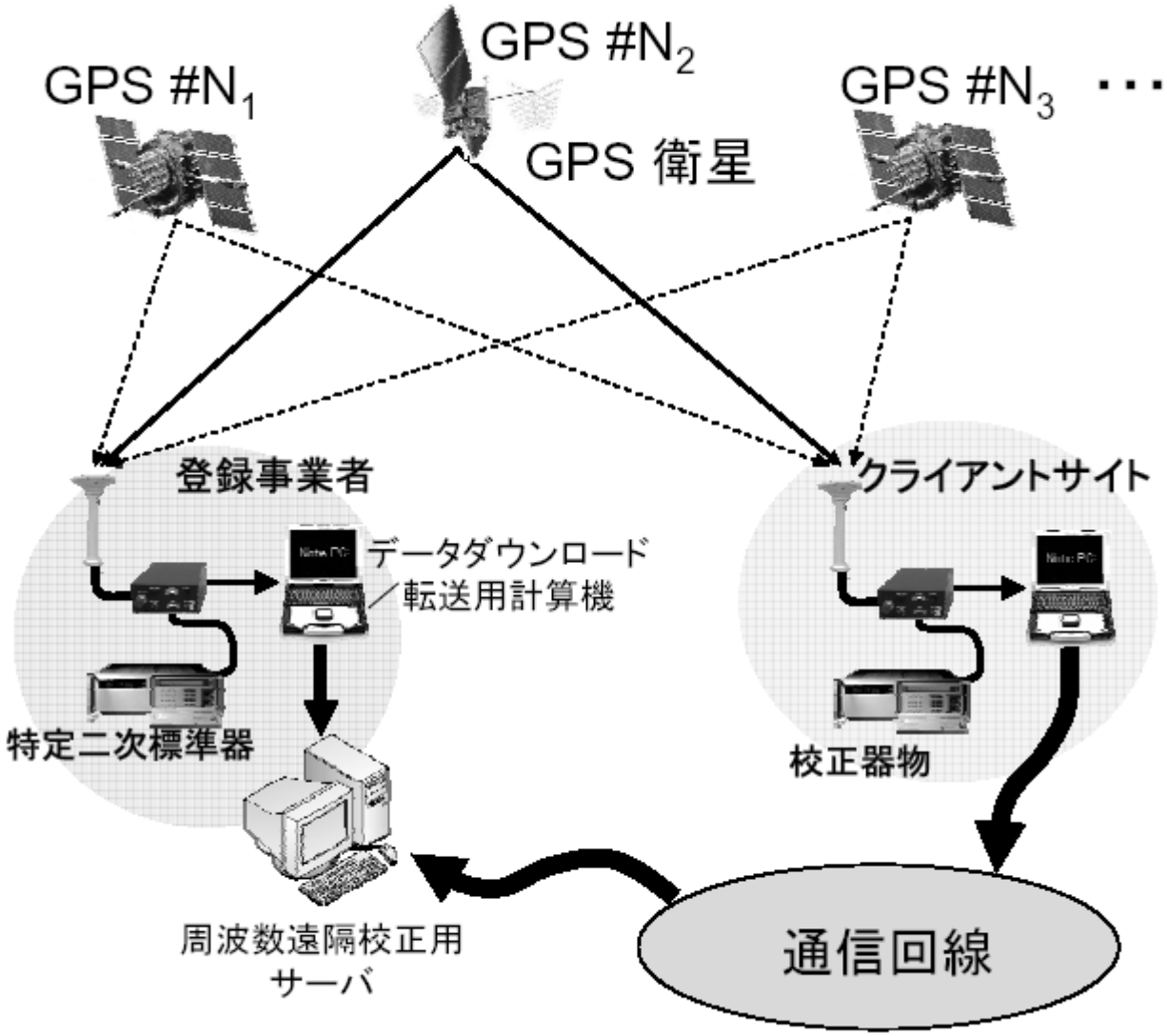


図2 周波数遠隔校正の概念図

参考文献:

1) D.W.Allan, M.A.Weiss, "Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite", 34th Annual Frequency Control Symposium, pp.334-346, May 1980.
2) D.W.Allan and C.Thomas, "Technical directives for standardization of GPS time receiver software", Metrologia, Vol.31, pp.69-79, 1994.
3) Victor S. Zhang, Time and Frequency Transfer Using GPS," 30th NIST Time and Frequency Metorology Seminar, June 2005.
4) 日本測地学会編著,「第 9 章 誤差要因」, 新訂版 GPS-人工衛星による精密測位システム-, 日本測量協会, pp.211-238, 1989.

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です

【今回の改正のポイント】

組織改編に伴う名称の変更等

以上

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です