

4 時間・周波数精密比較法

4 *Precise Time and Frequency Transfer*

4-1 時間・周波数比較法の基礎

4-1 *Basic Measurement Techniques on Time and Frequency Transfer*

今江理人

IMAE Michito

要旨

時間・周波数標準の大きな特徴として、高精度性ととも、遠隔地に置かれた標準器間の比較を、電波などを用いて行うことができることが挙げられる。時刻比較法の研究開発は、原子時計開発や供給法(報時)の開発と並ぶ、時間周波数標準における3大課題の一つである。比較方法に求められる精度も標準器の性能向上に伴い、高い精度が要求されており、特に、世界の標準時である国際原子時の高度化のため、より精度の高い比較技術が必要とされている。本稿では、主に遠隔地間の時刻比較に関して、概要を紹介する。

One of the most significant features of time and frequency standards is that it can be compared at remote sites by using the medium waves such as radio signals. Research and development of the time transfer techniques is one of the main research topics in the time and frequency standard field. The performances required for time transfer are gradually increased according to the improvement of the atomic clocks; especially in improvements of TAI (International Atomic Time), more precise time transfer techniques are required. This paper presents a brief introduction about precise time and frequency transfer techniques.

[キーワード]

時刻比較, 国際原子時, GPS, 衛星双方向時刻比較

Time transfer, International atomic time, GPS, Two way satellite time and frequency transfer

1 はじめに

時間・周波数標準は、その正確さが他の標準に比べ格段に高いことに加え、電磁波などの媒体を利用して遠隔地点に置かれた標準器間の比較を行えるという、他の標準にはない特徴を有している。すなわち、他の標準では、遠隔地点に置かれた複数の標準の比較を行う際、一方へ標準器を運搬して持ち寄るか、可搬型の標準器を仲介として比較するような手段が用いられている。このため、特に国際比較などの遠距離の

場合、運搬に伴う時間と手間を必要とする。一方、時間・周波数標準の場合は、運搬時計法と呼ばれる可搬型標準器を運搬して比較を行う手法ももちろん可能である。それに加え、古くはオメガやロランCといった地上の航行用電波信号を仲介とした方式が、遠隔地点間の時間・周波数比較に活用されている。1970年代ごろからは、宇宙技術、特に、人工衛星を用いた高精度時間・周波数比較法が提案され、実用化が図られている[1]。その比較精度・確度も飛躍的に向上している。図1は、文献[2]に記されている代表

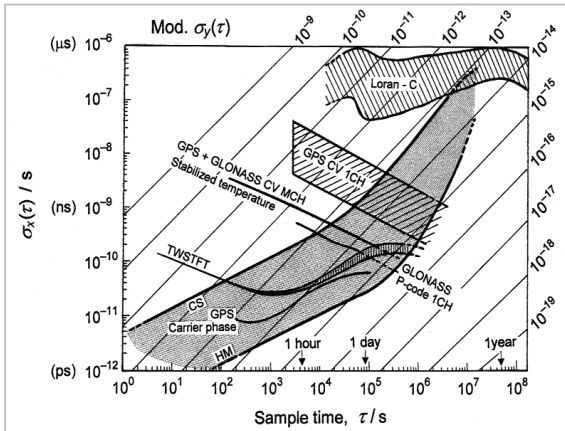


図1 代表的な時刻比較法の平均化時間と安定度の関係[2]

的な時刻比較法と周波数安定度の関係を示しており、平均化時間1日程度で 10^{-15} 台の周波数安定度での比較が実現されている。

2 時間周波数比較法の経緯と高精度化の必要性

2.1 時間周波数精密比較法の必要性

本特集号の他の論文や多くの文献で記されているとおり、時間・周波数比較法は、原子周波数標準の開発、時系の維持・供給と並ぶ時間・周波数標準における最も重要な研究課題の一つである。

特に、時刻の標準として国際原子時(TAI)や協定世界時(UTC)が世界各国の標準機関の原子時計を母集団として決定することから、定期的な時刻比較が必要とされる。その際、時刻比較に起因する付加的な雑音がTAIやUTCの正確さ

にも影響するため、原子時計(周波数標準器)の性能向上に伴って、時刻比較法に関しても高精度化が求められてきている。

このようなTAIやUTC決定以外でも高精度時刻比較法は、相対論効果の検証のような基礎科学的な分野から放送・通信などの工学的な分野に至る幅広い分野で必要とされている。

2.2 時間周波数比較法の種類

遠隔地に置かれた原子時計の高精度比較法としては、次の4種類に大別される。

- (1) 運搬時計法
- (2) One way法
- (3) Common-view法
- (4) Two way法

(1)は、前節で述べたとおり、物理的な仲介用

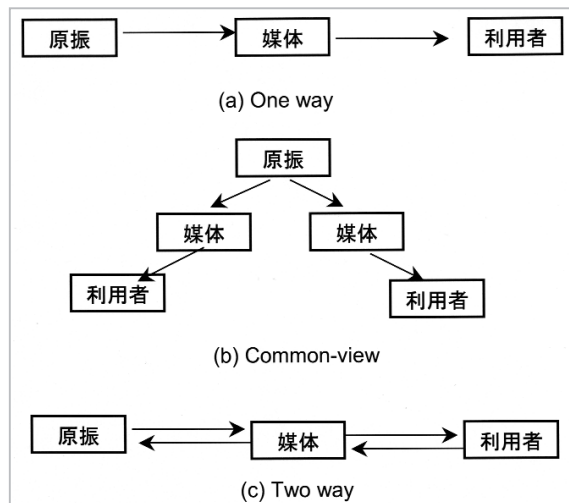


図2 遠隔時刻比較の概念図

表1 時刻比較法の分類とその比較精度

分類	方式	時刻比較確度	時刻比較精度	周波数比較精度(1日平均)	カバーエリア
運搬時計		数ns~数十ns	< 1 ns	$10^{-6} \sim 10^{-8}$	
One way	短波標準電波	2~200 ms	2 ms	$10^{-6} \sim 10^{-8}$	グローバル
	長波標準電波	0.5~20 ms	1 μ s	$10^{-10} \sim 10^{-12}$	~2,000 km
	GPS	10~40 ns	2~7 ns	2×10^{-14}	グローバル
Common-view	Loran-C	1 μ s	100 ns	$10^{-10} \sim 10^{-12}$	~2,000 km
	TV color sub-carrier	~10 ns	10 ns	$10^{-13} \sim 10^{-14}$	~100 km
	GPS C/A code	1~10 ns	1~2 ns	$10^{-13} \sim 10^{-14}$	~10,000 km
	GPS carrier phase	?	0.1 ns	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	グローバル
Two way	衛星双方向	1~5 ns	0.1 ns	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	グローバル
	LASSO	~1 ns	0.1 ns	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	グローバル

原子時計を2地点間で運搬して2地点の基準原子時計の時刻差を計測する方式である。

(2)～(4)は、電波等の媒体を用いて計測を行うもので、それぞれの概念図を図2に記す。

(2)は、比較というよりも、時刻周波数の供給／通報に類するものであり、標準電波による標準時・標準周波数の通報、GPS(Global Positioning System)による単独受信などが代表的なものとして挙げられる。

(3)は、複数の地点で共通の信号を受信し、共通信号を仲介として遠隔地点に置かれた時計間の比較を行うもので、代表的なものとしては、GPS衛星を用いたCommon-view法[3]、ロランC[4]やテレビカラーサブキャリア法[5]などが挙げられる。

(4)は、遠隔2地点(多地点)から同時に時刻／周波数比較の相手に対して信号を送信して比較を行うもので、最も精度が高い方式である。本方式に属する物としては、衛星双方向時刻周波数比較法などが挙げられる。

表1に各方式に属する代表的な方式とその比較精度の代表例を記す。

3 主な時刻比較法の概要と比較精度

本章では、前節で紹介した時刻比較法のうち代表的なものについて、方式の概要や比較精度に関して紹介する。

3.1 運搬時計法

運搬時計法は、図3に示すように、時刻 t_0 におけるA点での基準時計(A点)と運搬時計の時刻差を測定し、運搬時計をB点へ運搬移動し、時刻 t_1 におけるB点での基準時計(B点)と運搬時計との間の時刻差の測定を行い、両地点における測定値の差から基準時計(A点)と基準時計(B点)の時刻差を求める方式である。

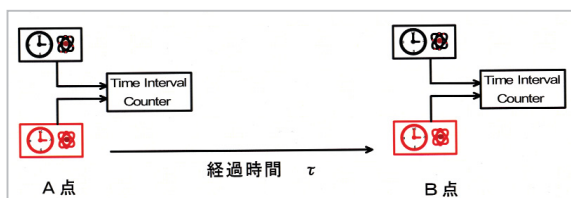


図3 GPS Common-view 法

数式で記述すると、

$$\Delta T_A(t_0) = T_A(t_0) - T_P(t_0) \quad \dots \dots (1)$$

$$\Delta T_B(t_1) = T_B(t_1) - T_P(t_1) \quad \dots \dots (2)$$

(1)と(2)の差より

$$T_A(t_0) - T_B(t_1) = \Delta T_A(t_0) - \Delta T_B(t_1) - \{T_P(t_0) - T_P(t_1)\} \quad \dots \dots (3)$$

と表される。すなわち、各地点での測定に時間差が生じるため、

- ①比較対象の原子時計の安定度
- ②運搬時計の安定度
- ③運搬時計の環境依存性

などの誤差要因がある。

①及び②による誤差は、周波数安定度の指標であるTIE(Time Interval Error)[6]などを用いて見積もることができる。

表2は、代表的な原子時計として、Agilent Technology社の5071Aセシウム標準器を用いた場合の測定間隔と誤差の推定例を記したものである。

表から、運搬に1日程度を要する場合、通常セシウムビーム管で10ns程度、高性能ビーム管を用いた場合においても数nsの時刻比較誤差を生じ得ることが分かる。当然ながら、運搬に要する時間が短いほど、また、運搬する原子時計の安定度が高いほど時刻比較精度は高い。

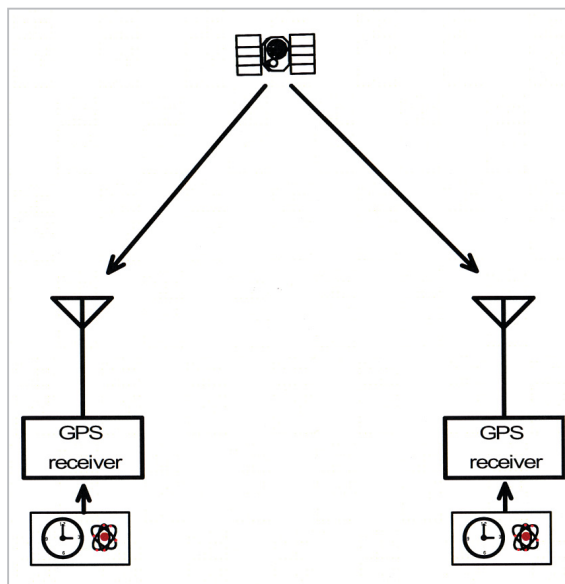


図4 GPS Common-view 法

3.2 GPS Common-view 法

3.2.1 GPS 概要

GPS システムは、1970 年代後半から米国国防省が開発を進めてきた衛星測位システムであり、現在カーナビゲーションをはじめ、各種測位分野で必須のシステムとなっている。GPS 衛星の時刻比較への応用は、1980 年代初頭より開始され、米国国立標準研究所 (NBS; 現在の NIST) で提唱された Common-view 法は、TAI 構築のための標準的なシステムとして現在でも主力方式の

一つとして用いられている。GPS 衛星システムの諸元を表3に記す。

GPS Common-view 法の原理を図4に示す。前述の図2 (b) で示し一般的な Common-view 法と全く原理は同一であるが、測距信号に重畳された航法データにより、衛星自身の位置情報や GPS time を含む各種情報が利用者に提供される。

ただし、各地点における GPS 衛星の受信は、同一衛星に関して同時に行う必要がある。TAI 構築のための GPS 衛星 Common-view 法では、

表2 運搬時計法の周波数安定度に起因する比較精度

τ (sec)	5071A normal		5071A super	
	$\sigma_y(\tau)$	TIE	$\sigma_y(\tau)$	TIE
1	1.2×10^{-11}	0.017 ns	5×10^{-12}	0.0071 ns
10	8.5×10^{-12}	0.12 ns	3.5×10^{-12}	0.05 ns
100	2.7×10^{-12}	0.38 ns	8.5×10^{-13}	0.12 ns
1,000	8.5×10^{-13}	1.2 ns	2.7×10^{-13}	0.38 ns
10,000	2.7×10^{-13}	3.8 ns	8.5×10^{-14}	1.2 ns
100,000	8.5×10^{-14}	12 ns	2.7×10^{-14}	3.8 ns
5 days	5×10^{-14}	30 ns	1.0×10^{-14}	6 ns

表3 GPS 衛星諸元

衛星数	24衛星(6軌道面に4衛星ずつ)
軌道高	20,200 km
軌道傾斜角	55°
衛星数	60°ずつ離れた軌道面に4衛星ずつ合計24衛星
軌道周期	11時間58分(0.5恒星日)
測距信号搬送波周波数	L1: 1575.42 MHz, L2: 1227.6 MHz
測距信号用PNコード	
C/A コード(L1波で送信)	10段FSRを2組みによるGold code方式 コード長: 1023 bits チップレート: 1.023 MHz コード周期: 1 ms
P(Y)コード(基本的に軍用でL1/L2波で送信)	長周期の2組みのPNコード発生器で生成 チップレート: 10.23 MHz コード周期: 1週間(1週間でリセット)
搭載原子時計	セシウム原子時計、ルビジウム原子時計を3~4台搭載 (最近の衛星は、ルビジウム原子時計が主)
航法データ	PN符号に50 bpsのデータレートで重畳 1sub-frame 300 bits, 1 frame = 5 sub-frame, 1 page = 25 frameで構成(1 page = 12.5分)

BIPMがほぼ半年ごとにCommon-view用受信スケジュールを作成して全世界の研究機関へ通知し、各機関では同スケジュールに従い受信を行う。1衛星に関する観測時間は13分間(780秒)で、その毎秒の測定値は15秒ごとに2次式近似がなされ、更に52個のデータを平均して一つの受信結果として集約される。最終的な受信したデータは、国際時刻比較のためのCGGTTS(Common GPS GLONASS Time Transfer Standard) Format^[6]と呼ばれる標準Formatにまとめられ、機関間でのデータ交換、BIPMへの報告がなされる。

3.2.2 GPSによる時刻比較の誤差要因^[7]

GPS衛星Common-view法比較原理を数式化すると、下記のように表される。

$$\begin{aligned} \Delta T_A = & \rho_A(t)/c - \hat{\rho}_A(t)/c + \Delta T_{ion,A}(t) - \hat{\Delta T}_{ion,A}(t) \\ & + \Delta T_{trop,A}(t) - \hat{\Delta T}_{trop,A}(t) + T_A(t) - T_{GPS}(t) \dots (4) \\ & + \Delta T_{rec,A}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_B = & \rho_B(t)/c - \hat{\rho}_B(t)/c + \Delta T_{ion,B}(t) - \hat{\Delta T}_{ion,B}(t) \\ & + \Delta T_{trop,B}(t) - \hat{\Delta T}_{trop,B}(t) + T_B(t) - T_{GPS}(t) \dots (5) \\ & + \Delta T_{rec,B}(t) \end{aligned}$$

ここで、

ΔT_i ; i点(i=A又はB)における測定結果

$\Delta \rho_i(t)$; 時刻tにおけるi点と衛星間幾何学的距離

$\Delta \hat{\rho}_i(t)$; 時刻tにおけるi点と衛星間幾何学的距離計算値(軌道データによる)

$\Delta T_{ion,i}(t)$; 時刻tにおける衛星からi点への電離層遅延

$\hat{\Delta T}_{ion,i}(t)$; 同上の推定値(又は測定値)

$\Delta T_{trop,i}$; 時刻tにおける衛星からi点への大気遅延

$\hat{\Delta T}_{trop,i}$; 同上の推定値(又は測定値)

$\Delta T_{rec,i}(t)$; 受信機雑音

(4)、(5)式から、A点とB点の基準時計の時刻差は、

$$\begin{aligned} T_A(t) - T_B(t) = & \Delta T_A - \Delta T_B(t) + \delta \rho \\ & + \delta T_{ion} + \delta T_{trop} + \Delta T_{rec} \dots (6) \end{aligned}$$

(6)式で記されているとおり、時刻差の誤差要因としては、

- ①衛星軌道推定誤差
- ②受信点アンテナ位置誤差

- ③電離層遅延誤差
- ④大気圏遅延誤差
- ⑤受信機雑音(温度依存性などを含む)

などがある。

このため、従来の国際時刻比較で主力として用いられてきたGPS L1一周波C/Aコードシングルチャンネル方式時刻比較法では、近距離で、数ns、大陸間などの遠距離の場合で10ns程度の時刻比較精度となっている。

3.2.3 GPS Common-view法の高精度化への方策^[2]

GPS Common-view法が提唱され、既に20年以上経過したが、原子時計の高精度化に伴い、従来国際時刻比較法で主力として用いられてきたL1 C/Acode 1チャンネル法では、精度面で不足を来している。このため、GPS Common-view法の高精度化に向け、主に下記の三つの手段が講じられ、精度向上が図られつつある。

- ①マルチチャンネル化
- ②P1、P2 2周波Pcode受信による電離層遅延実測
- ③搬送波位相利用による擬似距離測定の高分解能化

それぞれは、単独で行われるわけではなく、

②に加えてマルチチャンネル化が図られ、③については、2周波受信、マルチチャンネル化で測定精度としてps程度を目標としている。

各方式に関する詳しい説明は、参考文献を記すので、そちらを参照していただきたい^[8]。

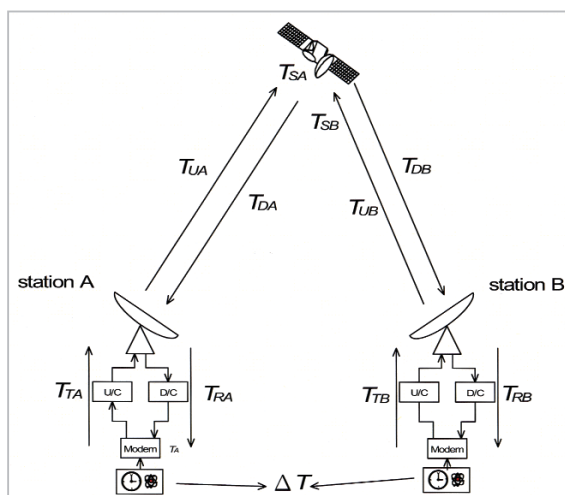


図5 衛星双方向時刻比較法の原理

3.3 衛星法方向時刻比較法

3.3.1 基本原理

衛星双方向時刻比較法の原理を図5に記す。時刻比較を行う両局から時刻比較用の信号を衛星仲介で相手側に送信し、各局では、自局の時計を基準として相手局からの信号の到来時刻を測定する。両局での測定結果の差から両局の基準時計の時刻差が測定できる。

すなわち、両局での測定値は、

$$T_A = \Delta T + T_{TA} + T_{UA} + T_{SA} + T_{DB} + T_{RB} + 2\omega A/c^2 \dots (7)$$

$$T_B = -\Delta T + T_{TB} + T_{UB} + T_{BA} + T_{DA} + T_{RA} - 2\omega A/c^2 \dots (8)$$

で表される。ただし、両式の最後の項は、地球回転に起因する相対論効果(サニヤック効果)で、 A は衛星、両地球局を赤道面上に投影した各点と地球中心で囲まれる面積を、また、 ω は地球の自転角速度を表す。

(7)式と(8)式の差より、両局の基準時計の時刻差として下記のように推定できる。

$$\begin{aligned} \Delta T = & (T_A - T_B)/2 \\ & -T_{TA} + T_{TB} \\ & -T_{UA} + T_{DA} \\ & -T_{SA} + T_{SB} \quad \dots \dots (9) \\ & -T_{DB} + T_{UB} \\ & -T_{RB} + T_{RA} \\ & -4\omega A/c^2 \end{aligned}$$

(9)式右辺第2項、第6項は、A局、B局の局内アップリンク、ダウンリンクの遅延時間差で、相殺はできないが、通常固定のバイアスである。同第3項、第5項は、それぞれA局と衛星、B局と衛星間のアップリンク、ダウンリンクの伝搬遅延時間であり、同一の経路をとると考えられ、ほぼ相殺することができる。第4項は、衛星内の遅延時間であるが、通常、時刻比較用には周波数拡散変調を用い、両局の信号が同一周波数帯を用いることができ、相殺することが可能である。

以上により、衛星双方向方式では、両局からの信号のほとんどの遅延時間が相殺される。このため、同方式では、

- ①衛星の位置誤差や運動に依存しない
- ②地球局の位置誤差に依存しない

③比較的高回線品質で測定可能

などの理由により、高精度の時刻比較が可能となる。

時刻比較精度は、用いる時刻比較装置の使用周波数帯域幅、回線品質に依存するが、現在国際原子時構築のための衛星双方向時刻比較に使用されている地球局(Ku帯1.8m程度の有効径、数Wの送信電力)でサブnsの時刻比較精度が得られている。

より詳しくは、本特集号の衛星双方向時刻比較法に記載されており、そちらを参照していただきたい。

3.4 その他の時刻比較法方式

前節で説明した以外に高精度時刻比較法としては、レーザーパルスと電波を共用したLASSO [9] (Laser synchronization from stationary orbit)や地上の光ファイバーを用いた方式などが挙げられる。前者は、衛星上で、複数の地点から発射された原子時計に同期したレーザーパルスの到来時間間隔を測定することにより、サブnsの時刻比較をねらった方式である。ただし、地上施設が非常に高価であること、レーザーを用いるため、天候に左右されることなどから、実用化には至っていない。

地上の光ファイバーを用いた時刻比較・時刻同期は、通信の超高速化に伴い、開発や実用化が図られつつある[10]。また、数km~数十km程度の比較的近距离の標準信号供給法として、安定化した光領域の基準信号を伝送して天体観測のローカル信号に活用するような計画も進められつつある[11][12]。

以上のように、時刻周波数の比較や供給に対する要請は多岐にわたっており、その重要性は今後も高まっていくものと考えられる。

4 まとめ

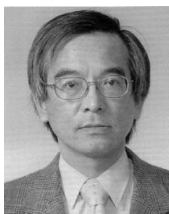
時刻比較法は、時間周波数標準分野における基本的な技術課題の一つであり、原子時の高度化に欠かせない研究課題である。さらに各種応用分野においても高精度時刻比較・同期法の必要性が大きくなってきている。

本稿では、主に、運搬受信機法及びGPS

Common-view 法並びに衛星双方向時刻比較法を中心として概説した。

参考文献

- 1 W. Lewandowski, J. Azoubib, and W. Klepczynski, "GPS: Primary Tool for Time Transfer", Proc. IEEE, Vol.87, No. 1, 163-172, 1999.
- 2 D. Allan and M. Weiss, "Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite", Proc. 34th Frequency Control Symp., 334-336, 1980.
- 3 W. Lewandowski and C. Thomas, "GPS time transfer", Proc. IEEE, Vol.79, No. 7, 991-1000, 1991.
- 4 V. Reinhardt and J. Lavanceau, "A comparison of the cesium and hydrogen hyperfine frequencies by means of Loran-C and portable clocks", Proc. 28th Frequency Control Symp., 379-383, 1974.
- 5 P. Parcelier, "Time Synchronization by Television", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 4, 233-238, 1970.
- 6 D. Allan and C. Thomas, "Technical directives for standardization of GPS time receiver software", Metrologia, Vol.31, No.1, 69-79, 1994.
- 7 W. Lewandowski, G. Petit, and C. Thomas, "Precision and accuracy of GPS time transfer", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 42, 474-478, 1993.
- 8 W. Klepczynski, "GPS for precise time and time interval measurement", Global Positioning System: Theory and Applications, 483-500, 1996.
- 9 J. Gaignebet, J. Hatat, J. Mangin, M. Torre, W. Klepczynski, L. McCubbin, J. Wiant, and R. Ricklefs, "LASSO Experiment: Intercalibrations of the LASSO Ranging Stations", Proc. 25th Precise Time and Time Interval (PTTI), 367-378, 1994.
- 10 M. Kihara, A. Imaoka, M. Imae, K. Imamura, "Two-way Time Transfer Through 2.4 Gb/s Optical SDH System", IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol.50, No.3, 709-715, 2001.
- 11 M. Shimizu, N. Watanabe, T. Furuta, and T. Ishibashi, "InP-InGaAs Uni-Travelling-Carrier photodiode with improved 3-dB bandwidth of over 150 GHz", IEEE Photonics Technology Letters, 10, 412, 1998.
- 12 H. Ito, T. Furuta, S. Kodama, and T. Ishibashi, "InP/InGaAs Uni-Travelling-Carrier photodiode with 310 GHz bandwidth", Electron. Lett., 21, 1809, 2000.



いまゑ りよ
今江理人

電磁波計測部門時間周波数計測グループリーダー
周波数標準