

## 単一波長時分割双方向方式による1芯光ファイバ時刻伝送装置の開発

鳥山 裕史<sup>†</sup>      町澤 朗彦<sup>†</sup>      岩間 司<sup>†</sup>

Time Transfer Device Using Single-Fiber Single-Wavelength Time Division Duplex

Hiroshi TORIYAMA<sup>†</sup>, Akihiko MACHIZAWA<sup>†</sup>, and Tsukasa IWAMA<sup>†</sup>

あらまし ナノ秒オーダでの正確な時刻情報を伝送する方法としては、ポータブルクロック法、GPS コモンビュー法などが利用されているが、いずれも設置・計測の手数が大きい。これらの代替として、時分割双方向伝送によりケーブル遅延を自動補正し、設置時の調整を不要とした時刻伝送装置を開発したので、その動作原理、構成及び性能評価結果を報告する。本装置では、1 芯光ファイバで同一波長を用いた時分割双方向伝送によって往復の遅延時間を同一とし、これを相殺することにより無調整化を図っている。本装置は、光ファイバで直結された同一構内、ないしは、同一都市内程度の範囲で利用可能であり、ナノ秒オーダの精度で時刻信号が伝送できる。また、複数のスレーブ装置にそれぞれ異なるタイムスロットを割り当てることにより、1 台のマスタ装置から光スプリッタによって接続された複数のスレーブ装置に時刻を伝送するような構成も可能である。

キーワード 時刻伝送, 光ファイバ, 往復遅延時間差, 時分割, 1 芯双方向

### 1. ま え が き

正確な時刻及び周波数は、最先端の研究分野のみではなく、高速化・高度化した携帯電話、GPS 利用機器の製造・校正など、身近なデバイスにも不可欠なものとなってきている。また、高速な通信機器間の同期、分散メディア同期、分散計測等に必要とされる時刻精度・確度も厳しいものとなってきている。ナノ秒オーダでの正確な時刻情報を伝送する方法としては、ポータブルクロック法、GPS コモンビュー法 [1]、GPS オールインビュー法 [2]、衛星双方向比較法 [3] などが利用されているが、ポータブルクロック法は計測の手間が大きく、他の方法もアンテナの設置、アンテナ位置・ケーブル遅延の測定等が必要であり、いずれも、その利用には相当の準備作業と専門知識が必要となる。

同一構内での時刻信号伝送では、同軸ケーブルによる片方向伝送によることが多いが、正確な時刻を得るためには、ケーブル遅延を何らかの方法で測定し、補正する必要がある。

インターネットでの時刻供給に用いられている NTP

(Network Time Protocol) [4], [5] では、往復の遅延時間は同一であると仮定し、双方向計測によって遅延時間を相殺しているが、実際には、往復の経路長の相違などで往復の遅延時間が異なることや、ふくそうによる遅延時間変動などの影響もあり、ナノ秒オーダでの時刻供給は困難である [6] ~ [8]。

IEEE1588 [9] による高精度な時刻供給デバイスも開発されているが、やはり往復遅延時間差などの問題があり、近距離以外では、ナノ秒オーダの時刻供給は困難と考えられる。

往復の遅延時間差を小さくする手段として、1 芯光ファイバによる双方向伝送を用いる方法がある。最近の FTTH (Fiber To The Home) では、ITU-T G.983, G.984 シリーズ, IEEE802.3ah [10] などに規定される PON (Passive Optical Network) 技術による波長分割 1 芯双方向伝送が用いられることが多い。この場合、往復の光ファイバ長は同一となるが、波長が異なるため若干の遅延時間差が生ずる。このような波長差による遅延時間差を小さくするために、零分散波長近辺の波長差の小さい 2 波を用いる等の方法が提案されている [11], [12]。これらによれば高精度な時刻供給が可能であるが、使用波長、光デバイス等に対する要求が厳しい。

最先端の時刻比較技術では、その精度は 10 ピコ秒

<sup>†</sup> 情報通信研究機構, 小金井市

National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei-shi, 184-8795 Japan

オーダに達し、自然科学、精密計測技術などの発展に貢献しているが、通信システムの運用、機器製造・校正等の実務では、ナノ秒オーダ、または数十ナノ秒程度の精度でも十分で、むしろ容易に利用でき、低コストな時刻伝送方法が求められる場合も多い。

筆者らのグループでは、このような需要を満たすものとして、時分割双方向方式による光ファイバ時刻伝送装置の開発を行った。この装置は、1 芯光ファイバで直結された同一構内、ないし同一都市内程度の範囲を対象に、ナノ秒オーダの精度での時刻伝送を無調整で行うことを目的としている。この装置では、1 芯光ファイバによる時分割双方向伝送によって往復の遅延時間を同一とし、これを相殺することにより無調整化を図っている。提案する方法自体は、ナノ秒以下の精度にも対応可能なものであるが、今回の実装では、ローコスト化を目指し、汎用の FPGA (Field Programmable Gate Array) 及び LAN 用の光インタフェースを用いたため、計測及び出力の時間分解能が 1 ナノ秒に制限されている。マスタ側装置には、正確に校正された原子時計から 10 MHz 信号と 1PPS (Pulse Per Second) 信号を供給し、これを基準として、スレーブ側装置との間の遅延時間を計測し、次の伝送時に、この遅延時間を反映するようスレーブを制御する。スレーブのクロックは、マスタから送られる計測結果を元に、周波数が自動調整される。

本論文では、2. で光ファイバによる時刻伝送方法について述べ、3. で、今回開発した光ファイバ時刻伝送装置の動作原理及び構成を説明し、4. で、実際に動作させた結果を示し、5. で、本装置の可能性、今後の予定等について述べる。

## 2. 光ファイバによる時刻伝送

近年、高速通信の分野では、光ファイバの利用が主流となっており、全国に光ファイバ網が張り巡らされ、都市部では、事業所間を直接結ぶ光ファイバの利用も可能となってきた。ビル内、同一事業所の敷地内といった範囲では、光ファイバの敷設コストは低く、また、LAN 用の光ファイバが不可欠となっている現状から、室内ないしはフロア内といった場所まで光ファイバが整備されていることも多い。このようなことから、時刻情報の伝送手段に光ファイバを用いる方法は有望であり、特に、比較的短距離においては、高精度・低コストでの伝送が期待できる。

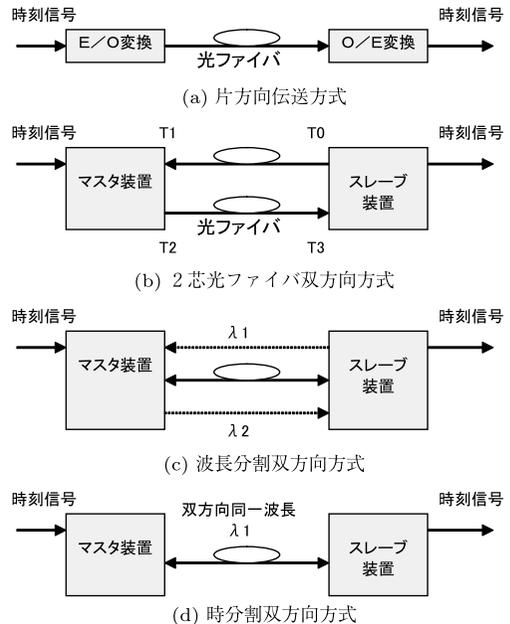


図 1 光ファイバによる時刻伝送  
Fig. 1 Time transfer using optical fiber.

### 2.1 光ファイバ片方向伝送方式

同一構内での時刻信号伝送では、同軸ケーブルによる片方向伝送を用いることが多いが、建物外に配線が及ぶ場合や、電磁環境が問題になる場合には、光ファイバによる伝送が適している。図 1(a) は、1PPS 信号等の時刻信号を E/O (Electronic-Optic) 変換しただけであり、同軸ケーブルによる方法と同様、何らかの方法によって、遅延時間を測定し、この分を補正する必要がある。また、機器やケーブルの経年変化、年間を通じての気温の変化などによる遅延時間変動にも注意を要する。

### 2.2 2 芯光ファイバ双方向方式

マスタ装置とスレーブ装置の間で、時刻情報を双方向に伝送することにより、ケーブル遅延時間を相殺することができる。図 1(b) のスレーブ側から計測する場合、スレーブ装置の時計を基準にしたタイムスタンプ  $T_0$  を含むメッセージがマスタ装置に送られる。マスタ装置は、マスタ装置の時計を基準とした受信タイムスタンプ  $T_1$  を付加し、内部処理の後、送信タイムスタンプ  $T_2$  を付加したメッセージを返す。スレーブ装置では、返送メッセージを受信した時刻  $T_3$  と、メッセージに含まれる三つのタイムスタンプから、自分の時計とマスタ装置の時計との差  $\Delta T$  が計算できる。

$$\Delta T = \frac{1}{2}(T_1 + T_2) - \frac{1}{2}(T_0 + T_3) \quad (1)$$

この計算式では、往路と復路の伝送遅延時間が同じであると仮定しているが、実際には、ファイバ長の差、遅延特性の差などから誤差が生ずる。また、 $T_0$  及び  $T_3$  は、スレーブ装置の時計で計測されるため、その基準周波数の誤差が上記計測の誤差原因となるが、計測時間 ( $T_3 - T_0$ ) が十分短い場合には、影響も小さい。

### 2.3 波長分割双方向方式

図 1(c) のように、1 芯の光ファイバで 2 波長多重による双方向伝送を行うことにより、往復のファイバ長を同一とすることができる。しかし、この方法でも波長による遅延時間の差が未知数として残り、大きな波長差の場合、または長距離の場合には、無視できない誤差要因となる。使用する 2 波長をそれぞれ  $\lambda_1, \lambda_2$ 、光ファイバの零分散波長を  $\lambda_0$ 、零分散傾斜を  $S_0$ 、光ファイバ長を  $L$  とした場合、遅延時間差  $T_{diff}$  は、次式で求めることができる [11]。

$$T_{diff} = \frac{S_0}{2}((\lambda_2 - \lambda_0)^2 - (\lambda_1 - \lambda_0)^2)L \quad (2)$$

例えば、IEEE802.3ah の EPON (Ethernet Passive Optical Network) では、上り方向パケット同士の衝突を避けるために、タイムスタンプの双方向伝送による装置間時刻同期が行われている。EPON で用いられる 1000BASE-PX の場合、上り方向に 1310 nm、下り方向に 1490 nm 近辺が用いられており、通常のシングルモードファイバの値の例として  $\lambda_0 = 1310$  nm、 $S_0 = 0.09$  ps/nm<sup>2</sup> km を当てはめると、1 km 当り 1.5 ns 程度の遅延時間差が生ずることになる。

使用している 2 波長を同一方向に伝送し、その到達時間差を計測すれば、波長による遅延時間差を知ることができる。この計測を定期的に行うことによって波長差による遅延時間差を補償することができる [11] が、光回路や制御が複雑になることは避けられない。

式 (2) から、零分散波長近辺の波長差の小さい 2 波を送受信に用いることによって遅延時間差を小さくできることが分かる。例えば、 $\lambda_0 = 1550$  nm、 $S_0 = 0.07$  ps/nm<sup>2</sup> km の光ファイバを用い、 $\lambda_0$  近辺で波長差 0.5 nm の 2 波を用いた場合、遅延時間差は、1 km 当り 0.01 ps 程度となる [12]。しかし、このような DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 用の光トランシーバ、光合分波器等は高価であり、手軽に使える装置に用いるのは難しい。

### 2.4 時分割双方向方式

時分割で送受信を切り換えることにより、1 芯の光ファイバ上での単一波長による双方向の時刻比較が可能となる。この場合、双方向の遅延時間は同一とみなすことができ、容易に相殺できる。この考えに基づいた構成を図 1(d) に示す。また、1 台のマスタ装置に対し、光スプリッタを用いて複数のスレーブ装置を接続することも可能で、特にスレーブ装置のコストを下げられれば、低コストな時刻伝送システムとなり得る。ただし、現状では単一波長双方向伝送の中継増幅は困難であるため、この方式は、中継増幅の必要ない距離での利用が主となると考えられる。

## 3. 本装置の動作原理及び構成

光ファイバによる時刻伝送のうち、時分割双方向方式を用いることにより、近距離を対象とした、低コストで取扱いの簡単な時刻伝送システムが構築できると考えられる。この章では、時分割双方向方式による時刻伝送方式の動作について述べ、開発した装置の構成について説明する。

### 3.1 時分割双方向方式による時刻伝送システム

本方式による時刻伝送システムでは、1 台のマスタ装置と 1 台以上のスレーブ装置が 1 芯光ファイバで直結された状態で使用される。

図 2 に示すように、マスタ装置には、正確に校正された原子時計から 10 MHz 信号、1PPS 信号及び IRIG (Inter-Range Instrumentation Group) 形式の時刻情報が供給される。この信号を基準として、マスタ装置がスレーブ装置との間の遅延時間を計測し、次の伝送時に、この遅延時間を反映し、スレーブ装置が正しいタイミングで 1PPS 信号及び IRIG 形式の時刻情報を出力するように制御する。スレーブのクロックは、

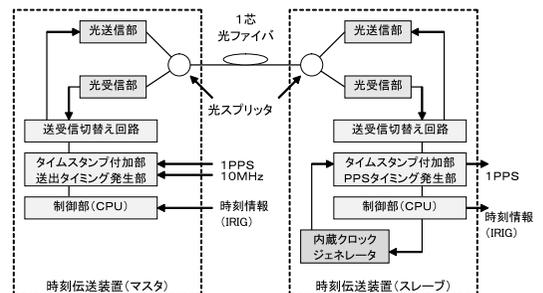


図 2 時刻伝送システムの構成

Fig. 2 Configuration of time transferring system.

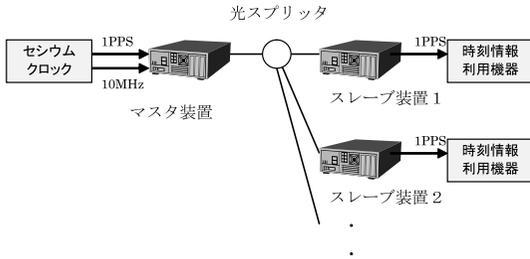


図 3 1:N 時刻伝送  
Fig. 3 1:N time transfer.

マスタから送られる計測結果をもとに、周波数が自動調整される。

時刻信号の伝送には、必ず遅延が伴うため、1 秒ごとの信号伝送によって、スレーブ装置が正しいタイミングで 1PPS 信号を出力するためには、1 秒近い遅延タイムが必要となる。この遅延タイムの大部分をマスタ装置で分担することによって、スレーブ装置のクロック周波数誤差の影響を小さくする設計としている。例えば、十分正確なマスタ装置で 990 ミリ秒を分担し、残りの 10 ミリ秒弱をスレーブ側タイムで遅延させる場合、スレーブ装置のクロック周波数精度に対する要求は 2 けた低減できる。

図 3 のように複数台のスレーブ装置を設置する場合は、更に光スプリッタによって分岐し、それぞれのスレーブユニットに異なるスレーブ番号を設定する。スレーブ番号に応じて、マスタ、スレーブ間通信の時間スロットが固定的に割り当てられるため、他のスレーブ装置の動作には影響を与えない。ただし、光スプリッタは、分岐数に応じて減衰量が増加するため、これにより接続可能なスレーブ装置の台数は制限される。

### 3.2 本装置の動作

マスタ装置とスレーブ装置間の通信は、図 4 に示す独自のフレームフォーマットを用い、図 5 に示すタイミングで行っている。図中の具体的な時間は、今回の実装に用いた値を例示したものである。

マスタ装置は、1PPS 入力信号の立上りから  $T_{slot}$  時間経過後に光出力をオンにし、光出力が安定し、受信側が同期するための時間 1.598 ms 経過後、フレームの送信を開始する。本装置で用いた光トランシーバでは、光出力が通常の 90% 以上となるのに必要な時間のカタログ最大値が 1 ms であり、受信側の同期は、クロックが高精度に保たれているため、ほとんど時間がかからないことから、上記の時間は十分であると考え

マスタ側送信

開始フラグ	スレーブ番号	予備	1PPS 出力遅延指示値 $T_{out}$	秒単位の時刻情報	フレームチェック
(9)	(7)	(8)	(32)	(80)	(16) bit

スレーブ側送信

開始フラグ	スレーブ番号	予備	スレーブ側内部遅延 $T_{int}$	予備	フレームチェック
(9)	(7)	(8)	(32)	(80)	(16) bit

図 4 フレームフォーマット

Fig. 4 Frame format.

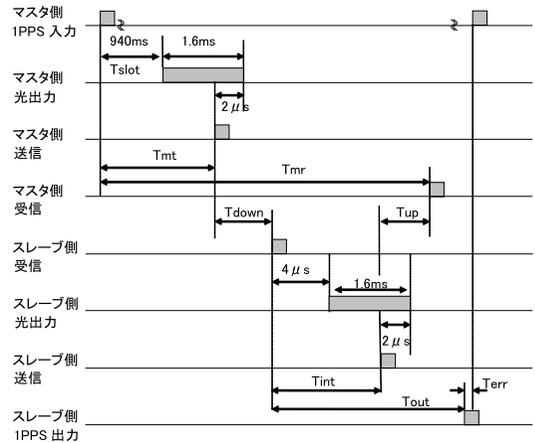


図 5 タイミングチャート

Fig. 5 Timing chart.

られる。フレームが送信されている時間以外は、0 / 1 の繰返しビット列を送信する。開始フラグは、9 ビットの固定値 “111111110”，スレーブ番号は、複数のスレーブ装置を用いた場合の識別番号である。 $T_{out}$  は、スレーブ装置がフレームを受信してから 1PPS を出力するまでの時間を ns 単位で指定する 32 ビット整数値で、過去の遅延時間計測結果からマスタ装置側で計算される。マスタ装置からスレーブ装置に秒単位の時刻ラベル情報が伝えられ、これをもとにスレーブ装置が IRIG 信号を出力する。フレームのチェックには、CRC (Cyclic Redundancy Check)-CCITT 方式を用いる。

スレーブ装置は、スレーブ側内部遅延時間  $T_{int}$  の入ったフレームを用意し、同様の方法で送信する。図 4 の数字では、 $T_{int}$  は、1.602 ms の一定値となるが、本装置では、後述する内部処理上の理由から 3 ns 以下の変動が生ずるため、この正確な値をマスタ側装置に送信する必要がある。この値も ns 単位の 32 ビット整数値とした。

マスタ装置は、マスタ装置に記録されている  $T_{mt}$ 、

フレームの受信時刻  $T_{mr}$  , スレーブ装置から通知される  $T_{int}$  から、片道伝送遅延時間  $T_{down}$  を計算することができる .

$$T_{down} = \frac{1}{2}(T_{mr} - T_{mt} - T_{int}) \quad (3)$$

この前提として、双方向の伝送遅延時間が等しいことを仮定しているが、本装置の場合、これは常に成り立つと考えてよい .

最初の 940 ms の遅延 ( $T_{slot}$ ) は、マスタ装置に供給される正確な時刻信号を基準にしているため、この遅延時間の誤差は無視できる . これに対し、 $T_{out}$  はスレーブ装置のクロックで計時されるため、クロック周波数誤差の影響を受けるが、約 1 秒の遅延時間の大半をマスタ装置で計時しているため、このクロック周波数誤差の影響は、その分低減されている .

スレーブ装置は、フレーム受信後  $T_{out}$  時間経過後に 1PPS を出力する . この  $T_{out}$  は、過去の計測結果をもとにマスタ装置で計算され、スレーブ装置に伝えられる .

$$T_{out} = 1000 - 940 - 1.598 - T_{down} \text{ [ms]} \quad (4)$$

ここで、 $T_{down}$  は、式 (3) で求めた前回の測定値、または過去数回の測定値の平均を用いる .

スレーブ装置を複数設置する場合には、スレーブごとに、フレーム送出のタイミングをずらすことにより、衝突を防ぐことができる . 例えば、各スレーブ装置に 5 ms のタイムスロットを割り当てることにすると、光出力の安定待ち時間 (1.6 ms × 2) を除いた時間、1.8 ms が、往復の伝送遅延に許されることになる . 本装置の利用可能距離は、最大 30 km 程度を想定しており、この場合の往復遅延時間は、0.3 ms 程度なので、1.8 ms は、十分な値と考えられる . 具体的には、マスタ装置での 1PPS 立上りから 940 ms 後にスレーブ装置 1 とのやり取りを開始し、945 ms 後にスレーブ装置 2、といった固定的な割当を行うだけでよい . スレーブ装置は、自分あてのフレームにのみ応答し、指定された  $T_{out}$  時間経過後に 1PPS を出力するだけなので、ほかにスレーブ装置が存在するかを知る必要はない .

### 3.3 ハードウェア構成

計測及び制御の大部分は 1 個の FPGA 上に実装した . ナノ秒単位でのリアルタイム動作が必要な部分は、FPGA のハードウェアで構成しているが、クライアント側でのクロック周波数の自動修正など、高速性は要求されない反面、動作が複雑な機能について

は、FPGA の CPU コアを用いた Linux 上での C プログラムで実現している . マスタ装置、スレーブ装置ともハードウェアは同一のもので、スイッチの設定により、どちらかの機能で立ち上がるようになっている . スレーブ側クロックとして、小型の VCXO (電圧制御水晶発振器) が搭載されており、その発振周波数は、マスタ装置との比較結果をもとに自動修正されている . 光トランシーバは、1000BASE-X 用として市販されている SFP (Small Form-factor Pluggable) 光モジュールを使用する .

図 6 に、今回開発した装置の内部構成を示す . 図 7(a)、図 7(b) は、それぞれ外観と装置内部の

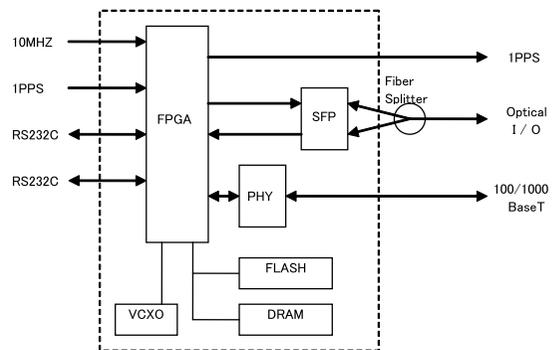
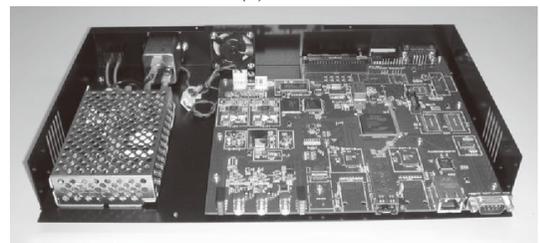


図 6 光ファイバ時刻伝送装置の内部構成  
Fig.6 Block diagram of time transfer device.



(a) 外観



(b) 装置内部

図 7 光ファイバ時刻伝送装置

Fig.7 Time transfer device using optical fiber.

様子を示している．図 7(a) の左側にあるのは，2 芯用 SFP の送受信を 1 芯にまとめるための光スプリットで，この先の 1 芯 SC コネクタに対向機からの光ファイバを接続する．

FPGA は 250 MHz のクロックで駆動しており，これに合わせて，データ伝送速度も 250 Mbit/s とした．時刻精度の問題から，汎用の PHY（物理層）チップは使用せず，FPGA で直接光トランシーバを制御し，NRZ（Non Return to Zero）信号のまま伝送している．回路構成上，0 または 1 のデータが長期間連続すると受信側でのデータ再生に支障が出るため，予備ビット及び時刻情報フィールドの未使用ビットに，0/1 を含む冗長データを入れることにより，この問題を避けている．

250 MHz クロックで普通に回路を構成すると時間分解能が 4 ns となってしまうが，フレーム受信タイムスタンプ，1PPS 入出力などについては，四つの同一回路を異なる 4 相のクロックで駆動することにより，1 ns の分解能を得ている．受信信号の 0/1 判定は，1 ビットの  $\frac{1}{4}$  時間単位で行うことができ，この最適位相の選択は開始フラグの検出時に行う．マスタ，スレーブ双方とも十分な精度のクロックを FPGA に供給できるため，フレームの先頭で確立したビット同期，及びバイト同期は，問題なくフレーム最後まで維持できる．フレーム送出タイミングは，4 ns 単位であるが，そのタイミング精度は 1 ns 以内であるため，精度上のデメリットとはならない．ただし， $T_{int}$  の値は，設計値に対し 3 ns 以内の変動が生ずるため，1 ns 単位の計測値をマスタ側に送信する必要がある．

装置内部の部品，光スプリット，1PPS 信号ケーブル等のばらつきにより，スレーブ側からの 1PPS 出力タイミングに誤差が生ずるため，この分の補正が必要となる．この補正値を求めるのに，実際に使用する光ファイバを用いる必要はなく，任意の光ファイバを用いて同一室内で計測することができる．1 ns 単位の補正値を装置上のフラッシュメモリに登録することにより，1PPS の出力タイミングが補正される．

#### 4. 動作試験

本装置の動作試験は，図 8 に示す構成で実施した．マスタ装置に供給される時刻信号としては，日本標準時システムで生成される 1PPS 及び 10 MHz 信号を用いている．マスタ装置及びスレーブ装置は，同一の実験室内に設置されており，マスタ装置に供給されてい

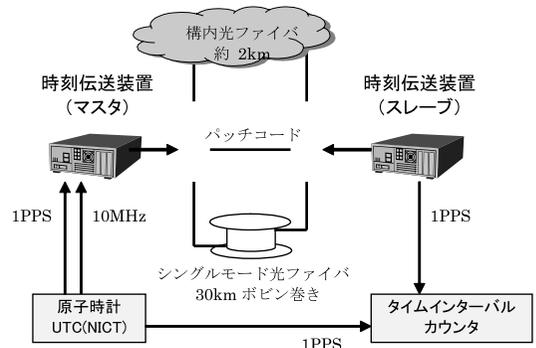


図 8 試験構成図

Fig. 8 Experiment configuration.

表 1 使用した SFP モジュールの仕様  
Table 1 Specifications of the SFP module.

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating Temperature	0	—	70	°C
Optical Output Power	-3	—	+2	dBm
Optical Input Sensitivity	—	—	-23	dBm
Optical Wavelength	1530	1550	1570	nm
Spectral Width	—	—	1	nm
TX Disable Assert Time	—	—	10	μs
TX Disable Negate Time	—	—	1	ms

る 1PPS 信号とスレーブ装置から出力される 1PPS 信号の時間差をタイムインターバルカウンタで測定する．

マスタ装置とスレーブ装置を結ぶ光ファイバとして，(1) 長さ 2 m の光パッチコード，(2) 長さ約 2 km の構内光ファイバ，(3) 長さ約 30 km のボビン巻き光ファイバを用意した．(3) は，ITU-T G.652.B に適合したシングルモードファイバである．カタログによると，1550 nm での伝送損は 0.21 dB/km 以下，零分散波長は，1300 ~ 1322 nm，零分散傾斜は 0.092 ps/nm<sup>2</sup> km 以下となっている．(2)，(3) の詳細仕様は不明であるが，通常のシングルモードファイバとして発注したものである．

今回の試験では，光トランシーバとして，市販の 1000BASE-X 長距離用 SFP モジュールを用いた．表 1 に，本装置で使用した，Appointech 社製 1550 nm SFP モジュール TR15SM3-3FLCMR2F1M の仕様（カタログより抜粋）を示す．図 9 は，今回使用した SFP モジュールの光スペクトルである．この中心波長は 1550.8 nm，他の 1 個，及び予備品の中心波長はそれぞれ 1551.2 nm，1549.7 nm であった．また，電源投入後，1 分後から 10 分後までの変動は，0.5 nm 以内であった．このうち，1551.2 nm と 1549.7 nm の SFP

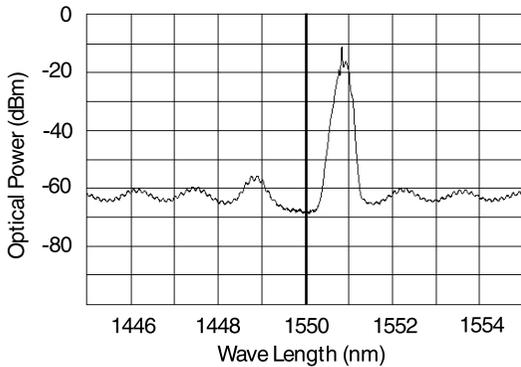


図 9 SFP モジュールの光スペクトル  
Fig.9 Measured optical spectrum of SFP module.

モジュールを (3) のファイバ経路で使用した場合の波長誤差による往復遅延時間差は、式 (2) から、1 ns 程度と見積もられる。これによる 1PPS 出力タイミング誤差は、この 1/2 の 0.5 ns 程度となり、ナノ秒レベルの時刻伝送は十分に可能と考えられる。ただし、仕様上は、最大  $\pm 20$  nm の波長誤差があり、この最悪のケースでは、時刻伝送誤差への影響は、光ファイバ長 1 km 当り 0.4 ns 程度となる。2 km 程度以下の短距離では問題ないが、それを超える距離で、ナノ秒レベルの精度を確実なものとするには、SFP モジュールを選別するか、波長誤差の小さい製品を使用する必要がある。

使用した SFP モジュールのパワーバジェットは、カタログ最悪値で 20 dB である。光スプリッタの挿入損が 3.9 dB  $\times$  2、光ファイバ 30 km 分の損失が 6.3 dB であるので、残りの 5.9 dB がコネクタ損、ケーブル接合損等に許容される値となる。これらから、30 km 程度での利用は、妥当な範囲であると考えられる。

図 8 の構成において、まず、光パッチコードで接続した状態で、1PPS 時間差測定を 10 分間行い、その後、長さ約 30 km の光ファイバに差し替えて 10 分間の測定を行った。この測定の結果を図 10 に示す。図の右半分、ケーブル差替え後も、時間差分布の中央値はほとんど同じであり、遅延時間の自動補償が正しく機能していることが分かる。どちらのケーブルを使った場合も、測定値は、おおむね  $\pm 1$  ns の範囲に収まっている。中心値が 0 付近でないのは、計測システムが負の計測値を扱えなかったため、スレーブ装置側でオフセットをかけているためである。

図 11 は、構内光ファイバを用いて 48 時間計測した

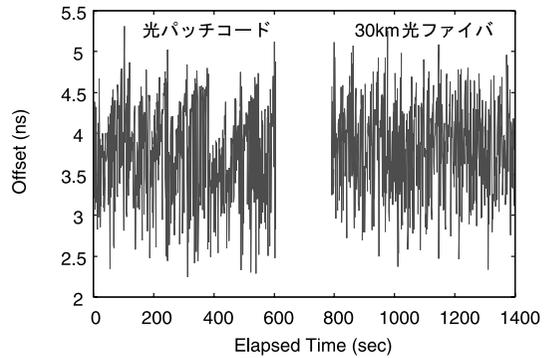


図 10 測定結果  
Fig.10 Measured result.

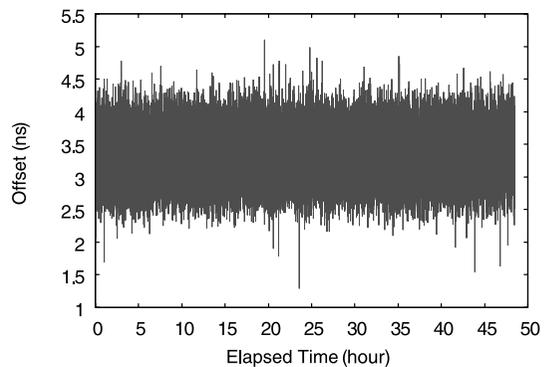


図 11 48 時間測定結果  
Fig.11 Result of 48 hour measurement.

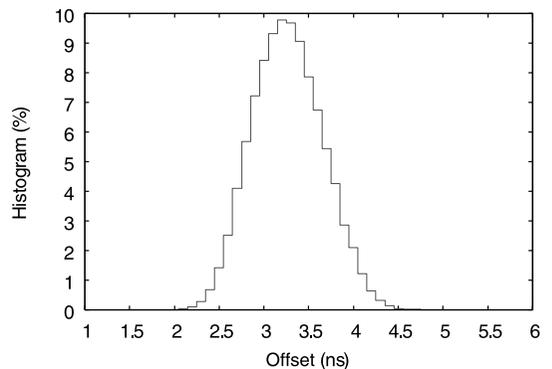


図 12 オフセット値のヒストグラム  
Fig.12 Histogram of measured offset.

結果である。このデータのヒストグラムを、図 12 に示す。標準偏差は 0.39 ns、平均値から  $\pm 1$  ns の範囲に収まっているものが、全測定点の 99.3% であった。

装置の環境温度変化に対する特性を測定した結果を図 13 に示す。これは、マスタ装置を約 25°C の通常温

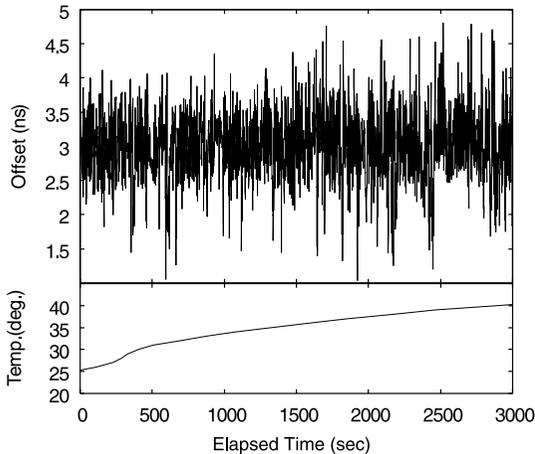


図 13 温度変化に対する特性  
Fig. 13 Temperature characteristic.

度環境に設置し、スレーブ装置のみ環境温度を 25°C から 40°C 程度まで変化させた場合の 1PPS 時間差を計測したものである。この温度範囲では、顕著な誤差発生は見られなかった。

試作した装置の台数の制限から、複数台のスレーブ装置を同時稼働させる実験は行っていない。しかし、動作自体は、1:1 の場合と同じであり、また、複数台収容するための光スプリッタを余分に挿入した状態でも問題なく動作していることから、1:N 形態での動作にも問題はないと考えられる。ただし、1:8 の光スプリッタで 11 dB 程度の挿入損があることから、この程度の分岐数が限界であり、また、この損失の分、利用可能距離は短くなる。

定量的な測定は行っていないが、1000BASE-LX 用の 1310 nm SFP モジュールを用い、2 km のポピン巻きシングルモードファイバ及び 5 dB の光減衰器で接続した場合についても、時刻信号が伝送できていることを確認した。

## 5. む す び

同一波長の時分割双方向伝送により、双方向の遅延時間が容易に相殺できることに着目し、光ファイバを接続し、電源を投入するだけで利用できる時刻伝送装置を開発した。この方法では、1 台のマスタ装置によって、複数台のスレーブ装置に時刻を供給できるというメリットもある。本装置で得られる時刻精度は、ナノ秒オーダであり、最先端の時刻比較技術には及ばないが、実務でのニーズの多くはカバーできると考え

ている。

使用しているデバイスは、汎用の FPGA、LAN 用の SFP 等、大量生産品であるため、コストが低く、また、本方式では、スレーブ側に高安定なクロックを必要としないことから、低コストな時刻伝送システムを構成することができる。本装置の利用には、光ファイバを占有する必要があるが、特に近距離では、光ファイバ 1 芯当りの敷設コストは高くなく、現実的な伝送メディアの一つであるといえる。

今回の開発では、スレーブ側が 1PPS 信号を出力する時刻伝送装置として構成したが、同様の方法によって、スレーブ側の原子時計の誤差をマスタ側から監査するようなシステムとすることもできる。

今回提案した方式自体は高精度な時刻供給、時刻監査にも発展できる可能性がある。このような方向についても、今後、検討を進めていきたい。

謝辞 御指導・御助言を頂きました電気通信大学情報システム学研究所加藤聡彦教授、及び岡田和則客員教授に感謝致します。また、コーダ電子(株)の野間氏、及び神宮司氏には、装置試作に関し多大な助言を頂きました。ここに感謝します。

## 文 献

- [1] D.W. Allan and M.A. Weiss, "Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite," Proc. 34th IEEE FCS, pp.334-356, May 1980.
- [2] Z. Jiang and G. Petit, "Time transfer with GPS satellites all in view," Proc. ATF2004, pp.236-243, Oct. 2004.
- [3] 今江理人, 鈴木智也, 後藤忠広, 澁谷靖久, 中川史丸, 清水義行, 栗原則幸, "衛星双方向方式" 通信総合研究所季報, vol.49, no.1/2, pp.121-128, March/June 2003.
- [4] D.L. Mills, "Network time protocol version 4 core protocol specification," Electrical Engineering Technical Report 06-01-02, University of Delaware, Jan. 2006.
- [5] D.L. Mills, "Simple network time protocol (SNTP) version 4 for IPv4, IPv6 and OSI," RFC 4330, IETF, Jan. 2006.
- [6] 鳥山裕史, 町澤朗彦, 岩間 司, 金子明弘, "高速インターネット環境におけるパケット遅延時間の精密測定," 信学技報, IA2004-24, Jan. 2005.
- [7] 鳥山裕史, 町澤朗彦, 岩間 司, "ハードウェア SNTP サーバの開発," 信学論(B), vol.J89-B, no.10, pp.1867-1873, Oct. 2006.
- [8] 岩間 司, 金子明弘, 町澤朗彦, 鳥山裕史, "高速ネットワークを利用した高精度時刻比較," 信学論(D), vol.J89-D, no.12, pp.2553-2563, Dec. 2006.
- [9] "IEEE1588: Standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and

- control systems,” IEEE, Nov. 2002.
- [10] “IEEE Std 802.3ah-2004, amendment: Media access control parameters, physical layers, and management parameters for subscriber access networks,” IEEE, Sept. 2004.
- [11] A. Imaoka and M. Kihara, “Accurate time/frequency transfer method using bidirectional WDM transmission,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.47, no.2, pp.537–542, April 1998.
- [12] 雨宮正樹, “光ファイバを用いた時間・周波数標準の供給及び比較技術に関する調査研究,” 産総研計量標準報告, vol.3, no.4, pp.551–558, Feb. 2005.

(平成 19 年 7 月 20 日受付, 11 月 26 日再受付)



鳥山 裕史 (正員)

昭 56 名工大・情報卒・昭 58 名大大学院情報工学専攻博士前期課程了。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。平 2~5 ATR 通信システム研究所。平 5~6 ドイツテレコム研究所客員研究員。画像符号化, 情報通信などの研究に従事。



町澤 朗彦 (正員)

昭 59 上智大・理工・電気電子卒。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。平 6 科学技術庁に出向し, IMnet 立上げに参与。平 8~11 Univ. Canterbury 客員研究員。平 15 JGN2 立上げに参与。画像の高効率符号化, 視覚情報処理, 計算機ネットワークの研究に従事。



岩間 司 (正員)

昭 58 山梨大・工・電子卒。昭 60 東工大大学院修士課程了。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。以来, 電波伝搬特性解析, 移動通信のセル構成, 標準時, 時刻認証基盤技術の研究に従事。現在, 光・時空標準グループ主任研究員。平 2 本会篠原記念学術奨励賞受賞。IEEE 会員。