

西はりま天文台 2 m 望遠鏡時刻サーバ装置の開発

下代博之¹、坂元 誠²、圓谷文明²

1) 下代組機工

2) 兵庫県立西はりま天文台

The time server unit of 2-meter telescope of NHAO

Hiroyuki GESHIRO¹, Makoto SAKAMOTO² and Fumiaki TSUMURAYA²

1) Geshirogumi-kikoh Co., 520-25, Tajiri, Wakayama-City, Wakayama, 641-0005, Japan

2) Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan

(Received 2005 May 5)

概要

西はりま天文台 2 m 望遠鏡は経緯台式架台のため、高精度の位置制御が要求される。そのため、望遠鏡制御計算機は極めて高精度の時刻信号を必要とし、その時刻信号の発生には、長期の安定性と信頼性を確保しなければならない。今回開発した時刻サーバ装置は、2組のGPSと高精度水晶発振器を使用し、独自技術の集積によって高精度と高信頼性を実現したものである。

Abstract

Nishi-Harima Astronomical Observatory 2-meter telescope is required highly precise position control for its altazimuth mount. Therefore, the telescope control computer needs a very high precision time signal, and must secure long-term stability and reliability to generate the time signal. The time server unit that we developed this time has 2 sets of GPS and a high precision crystal oscillator, and is realization of high precision and high reliability by accumulation of original technologies.

Key words: time server

1. 装置の概要

西はりま 2 m 望遠鏡は国内最大の経緯台式大型望遠鏡である。このような望遠鏡を正確に天体の方向に向け、天体の運動に合わせて追尾させるには非常に高い精度の制御が必要になる。天体の運動は、時々刻々と位置を変えていくもので、導入・追尾を高い精度で行うためには、望遠鏡の機械精度だけでなく、正確な時刻と機器を同期させるためのタイミング信号を常に供給することが不可欠である。これを実現するのが時刻サーバ装置である。

2. 仕様

1) 出力信号

- a. パラレル方式によるBCD形式のUTC時刻信号出力
望遠鏡制御計算機に対して出力
- b. シリアル方式による同期クロック信号出力
望遠鏡制御計算機及び、ローカル制御装置（5装置）に対して1Sec,100mSec,20mSecの割り込みクロックを出力
ただし、デージーチェーン接続を行うため、時刻サーバ装置からは1系統の出力でよい。
- c. NTPサーバ機能による時刻信号出力
独立した2系統のネットワークに接続可能

2) 精度

時刻サーバ装置は、GPSによる時刻情報を元に $\pm 1\mu$ 秒（対UTC）の精度で時刻を出力し、高精度同期パルスを望遠鏡制御システムに対して周波数偏差 $\pm 0.5\text{ppm}$ 以内の精度で出力すること。

3) 冗長性

時刻サーバ装置からのデータが途絶えた場合、望遠鏡の精度は著しく低下する。機器の故障、受信トラブルなどによる障害の可能性を極力排除するために時刻サーバ装置の冗長系はGPS受信機システムを2台で並列使用すること。

4) 誤作動対策

- a. 時刻サーバ装置は内部時計を実装し、GPSからの電波が途絶えた時や著しく誤った時刻データを受け取った場合に自立的に検証し、運転履歴より歩度調整を行ったデータを出力すること。
- b. 異常発生時には、以下の5)で列挙する各種アラームを出力すること。
- c. パラレルインターフェースの障害による誤データを、望遠鏡制御装置が判断するためのパリティビット（偶数）を伝送データに付加すること。

5) アラーム条件

- a. GPS受信機1台が故障した際は残り1台で運転すると共に、異常発生はあるが、引き続き時刻出力運転可能であることを示すアラームAを発信すること。
- b. GPS受信機が2台とも故障した場合、時刻情報は速やかに時刻サーバ内部時計からの時刻送信に切り替えるとともに、内部時計運転によることを示すアラームBを発信すること。
- c. 水晶発振器の精度維持のために恒温槽を用いる場合、温度制御に異常をきたした際は、アラームAを発信すること。
- d. 時刻サーバは、以上a～cのトラブル及び他に点検を必要とする情報に関して表示を行う工夫を装置盤上に持つこと。

6) 時刻信号出力インターフェース

- a. 時刻データ UTC BCD形式
西暦 「下2桁 00~99」2桁8bit

通算日 「3桁 000～366」 3桁 12bit
時 「2桁 00～23」 2桁 8bit
分 「2桁 00～59」 2桁 8bit
秒 「2桁 00～60」 2桁 8bit (うるう秒挿入時は "60" を出力)

b. アラーム信号

時刻サーバ装置異常 2bit

アラーム A：冗長系運転時(継続運転可能な場合)

アラーム B：動作不可能時(冗長系も含めた故障、出力系故障など継続運転不可能な場合)

c. パリティビットは偶数とする。

d. 伝送方式：パラレル

e. 電気的特性：オープンコレクタ出力、残留電圧 2V 以下(シンク電流 10mA 時) 最大印加電圧 24V

f. 信号論理：負論理(真理 "1" = 導通、真理 "0" = 遮断)

7) 同期クロック信号出力インターフェース

a. 毎正秒時に立下りエッジの同期パルス信号を供給すること。

b. パルス周期は 20m 秒、100m 秒及び 1 秒周期の 3 種類、デューティ比は 50% ± 10%

c. 20m 秒、100m 秒及び 1 秒周期の 3 種類のパルス相互間の位相誤差は 500n 秒以下

d. 電気的特性：RS-485 に準拠し、1 対 N の並列取りが可能であること。

e. 伝送特性：伝送線路長 10m 以内で 10Mbps 以上であること。

f. 接続コネクタは D-sub 9ピン メス

8) NTP サーバ機能

時刻サーバ装置は天体望遠鏡制御室内の制御 LAN 上で NTP サーバとして機能すること。

a. 接続端子：RJ-45 2 箇所

b. 伝送速度：10Mbps (10BASE-T)

c. 伝送プロトコル

トランスポート層：UDP

ネットワーク層：IP

データリンク層：Ethernet

物理層：Ethernet

d. GPS 衛星未補足時は、内部水晶発信機の精度にて出力すること。

3. 設計において留意した点

時刻サーバ装置の設計で、特に留意した点は次の 4 点である。

- 1) 時刻精度
- 2) 冗長系並列運転のシステム構成と切り替え
- 3) 安定性と時刻データの信頼性
- 4) 地震や雷撃等の災害に対する耐力

1) 時刻精度

時刻サーバ装置は極めて高精度の時計であり、時計の元となる元発振器が重要である。今回は特別に選別した恒温槽式水晶発振器（10MHz 周波数偏差 0.1ppm）を使用した。この水晶発振器の裸での精度は無調整で1日あたり約 860 μ 秒である。この水晶発振器の10MHz出力を分周して作る時計を、GPSから来る高い精度の1PPSパルスで毎秒校正して、累積誤差のない時刻信号を発生させることとした。通常GPSからの1PPS信号の精度は公称 $\pm 1\mu$ 秒であるが、実際には数百ナノ秒のジッタ（ゆらぎ）をもっている。このジッタを平滑するために、水晶発振器の周波数追尾を時定数1分程度のゆっくりとしたものにして、GPSが持つ裸の性能以上の真時刻に近づけるよう工夫した。

2) 冗長系並列運転のシステム構成と切り替え

冗長系システムの組み方としては、GPSと水晶発振器を1組の内部時計とし、これを2組設けた。2組の内部時計はその運転状態を監視され、安定で高精度に運転されている内部時計の時刻信号が選択される。信号の切り替えのタイミングは、切り替えの前後で波形の異常や連続性が損なわれないように、切り替え可能なタイミングを限定した。

3) 安定性と時刻データの信頼性

安定性確保のため、水晶発振器の電源電圧や周辺温度の変動を極力小さくするよう設計に努力した。特に温度変動に対しては、換気風量を充分確保し、装置内にデジタル温度計を設け、温度を監視することとした。

時刻サーバ装置の出力する時刻データは絶対的なものであり、誤りは許されない。そこで、3重の時刻確認をしたのち出力される設計とした。まず2組の冗長系内部時計で比較し、その後どちらか一方の内部時計の時刻信号が選択され出力制御部の内部時計と再度比較される。最後に、全く独立して運転されるRTC（リアルタイムクロック）と年月日時分秒が比較され、矛盾がなければ望遠鏡制御計算機に出力される。また、望遠鏡制御計算機側からも出力データの誤りが発見できるよう、パリティビット（偶数）が加えてある。

4) 地震や雷撃等の災害に対する耐力

地震により時刻サーバ装置架が転倒しないように、床にボルトで固定し、なおかつ天井に引っ張り金物で固定した。阪神大震災程度の地震であっても、装置架を転倒による破壊から保護することができる設計とした。また、西はりま天文台は大撫山の頂上に位置するので、頻繁に落雷の被害を受ける。GPS受信機は非常に雷撃に弱いため、受信機のアンテナ接栓に高性能な同軸避雷器を設け、GPS受信機を雷撃から保護する設計とした。またGPSアンテナは強風で移動や転倒しないように、鋼製架台を作成した。

4. 装置構成 ブロックダイアグラム

図1に装置全体のブロックダイアグラムを示した。まず、水晶発振器の10MHzをクロックとして時間分解能100n秒の内部時計を構成し、時刻信号と3種類の同期パルスを発生させる。GPSからくる測位情報から時刻情報を抽出し、内部時計の日付・時刻を合わせる。1秒の正確なタイミングはGPSから来る1PPS信号で内部時計の値の読み（100n秒単位）を比較し、進み遅れがあれば100n秒単位で調整する。

このような内部時計を2組設け、それぞれの運転状態を運転状態評価部で評価し、より健全な側の内部時計を選択して切替器で切り替え、時刻信号と同期パルスを出力部に送る。

運転状態評価部は水晶発振器の周波数誤差、歩度調整電圧の値、1PPSとの位相誤差、GPSの衛星受信状態、GPS測位演算精度評価値（PDOP値）を常時モニターし、それぞれの要素に重みをつけた合計点数

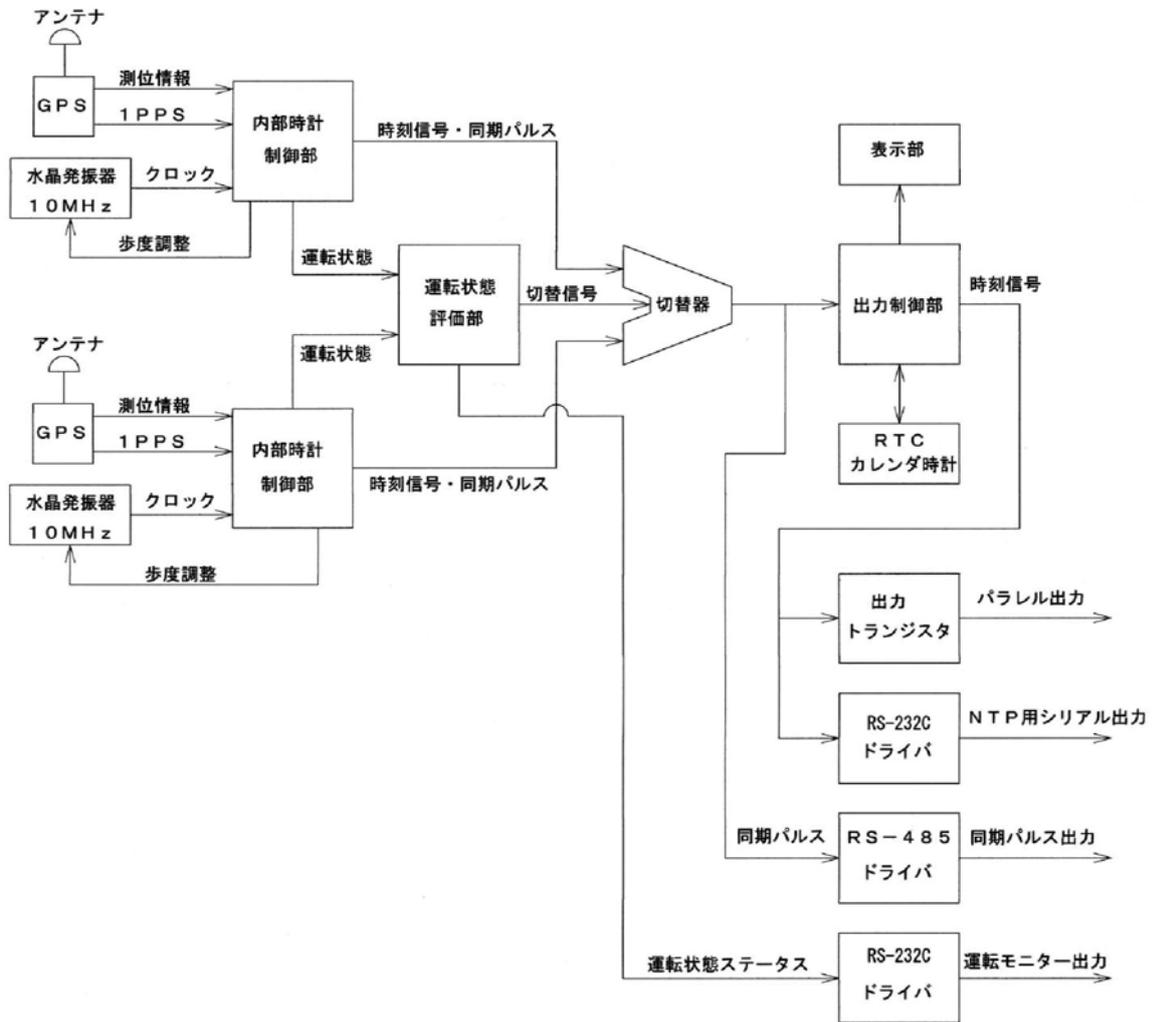


Fig. 1. 装置全体ブロックダイアグラム

を算出して、より健全で精度のよい内部時計を選択する。健全側として選択された内部時計の運転状態はRS-232 Cでモニター用の計算機に送られ、ディスプレイ上で状態を見ることができる。

切替器より送られてきた時刻信号は、出力制御部で再度内部時計を構成し、GPSとは全く関連のないRTC（リアルタイムクロック）のカレンダー及び時計と毎秒比較される。RTCとの比較は年月日の照合が目的であり、時刻誤差は10秒以内を合格としている。このRTC自体も毎時30分に内部時計の値に強制的に校正される。このように厳重に照合され連続性のある矛盾のない時刻情報のみを、望遠鏡制御計算機が必要とするパラレルデータに展開し、偶数のパリティビットを付加して出力トランジクタから出力する。

同時にこの時刻情報をRS-232 Cのシリアル信号にして、NTPサーバ用計算機に送信する。NTPサーバ用計算機はこの時刻情報と1PPS信号より内部システムクロックを校正し、望遠鏡制御LAN上にNTPサーバとして時刻情報を提供する。

一方、同期パルスは時刻情報がなく、GPSから来る1PPS信号との位相差のみが重要なので、出力制御部を経由せずに切替器から直接RS-485ドライバを通して出力される。

5. 内部時計制御部

図2に内部時計制御部のブロックダイアグラムを示す。内部時計制御部は時刻信号と同期パルスの両方を発生させる重要な部分のため、詳細に説明する。

内部時計制御部はGPSからの信号と水晶発振器からの10MHzより時刻信号と同期パルスを発生させるためのカウンタ群を制御する内部時計制御部MPUが重要な役割をはたす。

まず、水晶発振器からの10MHzをカウンタ1により計数して、GPSが発生させる1PPSから次の1PPSの1秒間に10,000,000カウントになるよう、水晶発振器の歩度微調整電圧を調整する。毎秒10,000,000カウントに対する誤差があればD/A変換器の出力電圧を変化させて歩度を微調節する。歩度微調整電圧は微小な電圧変化でも発振周波数が変化するので、D/A変換器と水晶発振器の間に緩衝増幅器を設け、電圧の温度ドリフトやゲイン変動には細心の注意をはらって設計する。

水晶発振器からの10MHzが正確にロックされると、これをカウンタ2にて25000分周して400Hzのクロックを得る。この400Hzが同期パルスを発生させる基本の周波数となる。

400Hzはカウンタ3により計数され、1秒間を400分割し1単位2.5m秒のアドレスを割り付ける。1秒の始まり直後アドレスは0で、次の1秒の直前アドレスは399である。このうち偶数のアドレス200通りについて、1Hz,10Hz,50Hzの信号出力のパターンをあらかじめメモリーテーブルに展開しておき、その直前の奇数アドレスの時期にメモリーからロードして、おのおの同期パルスを担当するカウンタ4,5,6に状態を書き込む。次のアドレスに進む400Hzクロックが入った瞬間にカウンタ4,5,6の出力状態が変化し、この400Hzクロックに同期した1Hz,10Hz,50Hzの信号出力が得られる（図3参照）。

同期パルスをGPSからの1PPSに同期させるには、1PPS信号の割り込みでカウンタ3とカウンタ2の値を読み込み、たとえばカウンタ2が00001でカウンタ3が000の場合は100n秒の進み、反対にカウンタ2が24999でカウンタ3が399の場合は100n秒の遅れということがわかる。カウンタ2は本来25000カウントで1パルスを出力し、周期が2.5m秒であるが、このカウンタ2を±1カウント増減することにより、400Hzの1クロックを100n秒増減できる。この増減操作は1秒間400アドレスの任意の時点に行えるため、同期パルスの波形のひずみや位相差を最小に保ったまま、最大1秒間に40μ秒位相を遅進させることが可能となる。

この他にも内部時計制御部MPUは、GPSの測位状態、衛星の捕捉数、PDOP、水晶発振器の周波数誤差、歩度微調整のD/A変換器電圧、緩衝増幅器の出力電圧、同期パルスの位相誤差などを常時計測し、内部時計の運転状態を運転状態評価部に伝達している。

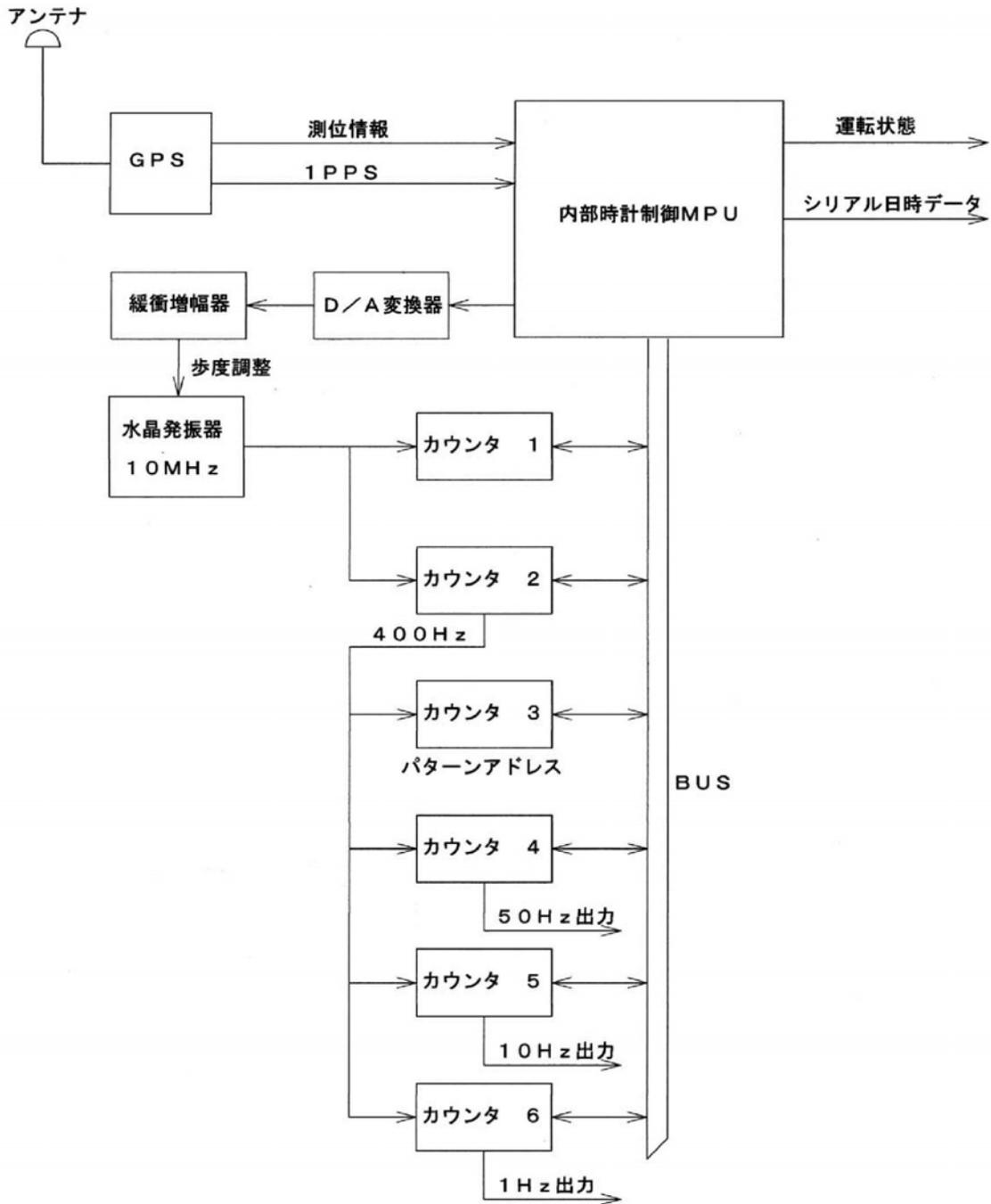


Fig. 2. 内部時計制御部ブロックダイアグラム

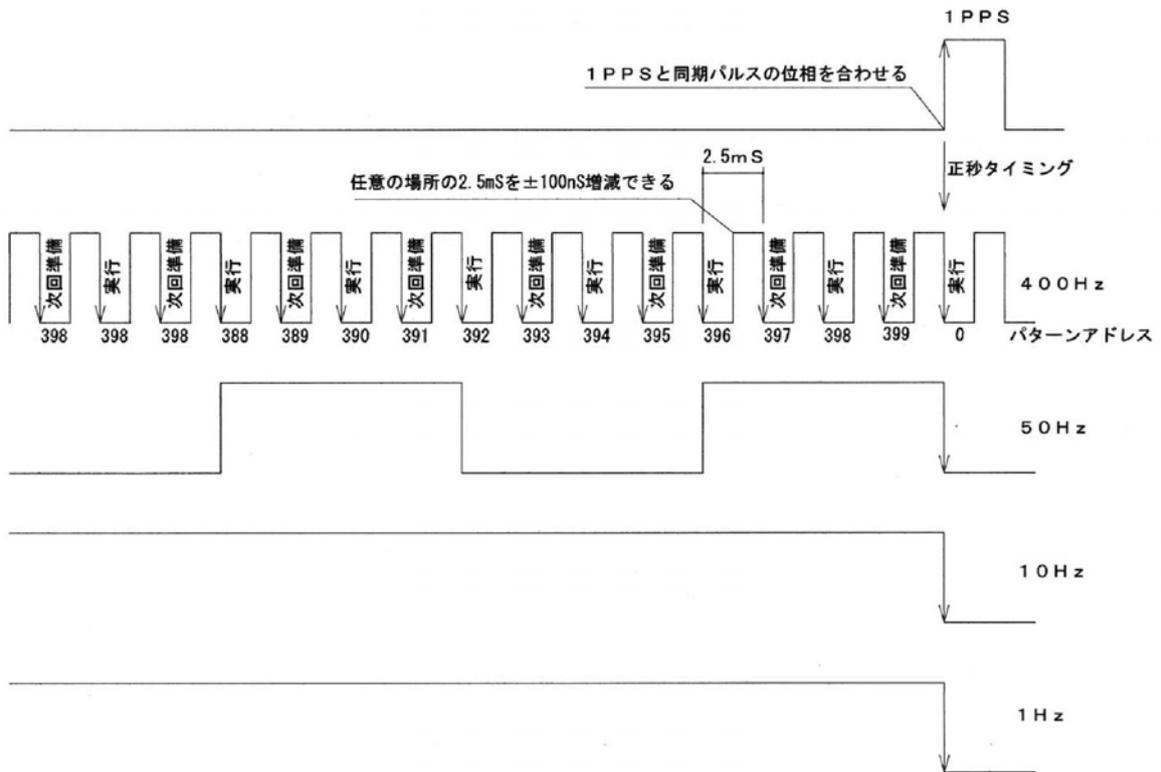


Fig. 3. 同期パルス発生タイミング

6. 装置製作

装置の電気回路はガラスエポキシ両面プリント基板とし、基盤配線密度は2.5mmのDIPピッチとした。これは20年以上前の集積密度であるが、放熱と回路インピーダンスやクロストークを配慮してあえて余裕のある設計とした。回路基盤と装置架筐体のコネクタ間の結線はハンダ付けとし、接触不良による障害を極力排除するようにした。各制御部の制御MUPは日立製作所製H-8シリーズのクロック25MHzタイプを使用した。性能に重要な影響をあたえる部品、GPSエンジン、水晶発振器、RTC、電源装置、漏電遮断機、ノイズフィルター、換気ファン等は、すべて国内製で産業機械用に使用できる信頼性のものを選定した。半導体は国内製ではないが、信頼できる半導体製造会社のものを選定した。

以下に主要な部品の型式と製造会社名を示す。

番号	品名	型式	製造会社名
1	GPS受信機	CCA-453JP	(株)システムプロデューサソシエイツ
2	GPSアンテナ	TA-230	同上
3	アンテナケーブル	8D-WFLEX	三菱電線工業(株)
4	恒温槽水晶発振器	TOP01V	東京電波(株)
5	同軸避雷器	ASR2400	(株)インボックス
6	MPU	H8/3052F-ZTAT	(株)日立製作所
7	リアルタイムクロック	RTC62421B	セイコーエプソン(株)
8	RS485ドライバ	SN75176B	日本(株)
9	出力トランジスタ	M54585P	三菱電機(株)
10	出力コネクタ9P	DE-9SF-N	日本航空電子工業(株)
11	出力コネクタ50P	57FE-30500	第一電子工業(株)
12	温度指示計	K3MA-LC	オムロン(株)
13	電源遮断検出リレー	G2A-4321P	同上
14	表示灯	SLD30N-1DH0B-12	和泉電気(株)
15	表示灯	A3CJ-90A-1-12EG	オムロン(株)
16	キースイッチ	A30K-2AL-10	同上
17	漏電遮断器	NV-2F 15A30mA	三菱電機(株)
18	ラインノイズフィルタ	ZAC2215-00U	TDK(株)
19	直流電源装置	S8E3-03031B	オムロン(株)
20	換気ファン	R87F-A1A13HP	オムロン(株)
21	換気ファン	FBK04F-12H	松下電器産業(株)
22	ラック	FDC-1000-650/W	摂津金属(株)

7. 検査・現場据付

時刻サーバ装置の精度検査は、和歌山県美里町みさと天文台に依頼して行い、同天文台の所有するGPSとの位相誤差をオシロスコープで観測し、約8時間の運転で誤差 $\pm 1.0\mu$ 秒以内の結果を得た。

時刻サーバ装置の据付は、望遠鏡制御計算機架の施工と平行して行い、特にGPSアンテナケーブルは、その延長距離が30mと長いとため特に低損失のケーブルを選定して施工した。

8. 試運転・調整

試運転は、三菱電機(株)西野氏、下代、坂元の3者立会の上行い、パラレルビットは1ビット毎にON-OFF試験を行い、同期パルスは望遠鏡制御計算機の受信状態とオシロスコープ観測の双方で動作を確認した。その後、約1ヶ月の連続試運転を行い動作の安定性を確認した。試運転途中、月が繰り越す瞬間に時刻照合エラーが発生するプログラムミスが発見されたが、これはプログラム修正で解決された。以後約1年以上無停止で連続運転を続けている。

9. 総括

今回、国内の経緯台式大型望遠鏡としては、はじめて純国産技術で時刻サーバ装置を完成することができ、時刻精度や安定性についても、従来の外国製に決して引けを取らないものが製作できた。この時刻サーバ装置は、高価で特殊な部品を使用することなく、一般的な部品を慎重に選別・選定し、さまざまな工夫を積み重ねることにより、高精度・高安定性を実現した。開発者として、このような特殊な装置を完成させることが出来たのは、この上ない喜びである。

時刻サーバ装置の仕様についてご指導頂いた、西はりま天文台の森淳氏に感謝いたします。また検査にご協力頂いたみさと天文台の豊増伸治氏、ネットワークについてご助言いただいた大阪市立大学の小松久美子氏、GPSに関するご助言を頂いた国立天文台の相馬充氏、せんだい宇宙館の早水勉氏に感謝いたします。