GPS による精密 1PPS 信号出力

非会員 豊泉 裕章* 正員 源田 正弘*

Precise 1PPS signal by GPS

Hiroaki Toyozumi*, Non-member, Masahiro Genda*, Member

GPS is widely used to obtain not only the position information but also the time information. Specially, it is used to synchronize the time between separate stations in the measurement system or the communications system. However, in these systems, the output circuit of the 1PPS signal in the GPS receiver has not been optimized. In this paper, we examine the error sources of the time measurement by GPS and show the time measurement accuracy is about 10 ns, and the improvement of the precision of 1PPS signal is most important to realize high accurate 1PPS signal. We propose the precise 1PPS generating method by the analog circuit whose output precision is sufficiently higher than the time measurement accuracy by GPS. We evaluated the time measurement accuracy and the accuracy of 1PPS signal in the relative time synchronization by 24 hours test, and succeeded to realize a few ns precision and several ns accuracy of 1PPS signal in the relative time synchronization using our precise 1PPS generating method.

キーワード : GPS, 1PPS, 時刻同期

Keywords : GPS, 1PPS, time synchronization

1. はじめに

GPS は位置情報分野だけではなく、時刻情報利用分野においても広く利用されている。特に、地理的に離れた多点間での同期が必要な通信システムや計測システムの同期信号として用いられている。GPS からの時刻情報の取得手法としては、GPS 受信機から出力される 1PPS(Pulse Per Second) 信号を用いるのが一般的である。1PPS の立ち上がりエッジをセンサー類のサンプリング信号、発振器の基準比較信号等の用途に利用している。

GPS の時刻系は、米国海軍天文台の管理する時刻系である UTC(USNO)に同期するよう管制制御されている。GPS 衛星には各々原子時計が搭載され、衛星毎に独立した時刻になっている。地上の管制センターでは、衛星毎の時刻誤差を監視し、その誤差量を航法メッセージとして放送しているので、全衛星は数 10 ns の範囲で同期した時刻になっている⁽¹⁾⁽²⁾。同一の GPS 衛星群の信号を同時観測すれば、衛星毎の差は更に低減され、相対的には高精度の同期が得られる事となる。

本論文では、標準的な時刻情報の取得手段である 1PPS 信号の精度を検証し、その限界値を示した上で、より精密な 1PPS 信号の出力を検討する事により、高精度の同期システ

ムへの貢献を検討する。

2. 1PPS の誤差要因

GPS による時刻の計算は、衛星からの信号を受信することとで式(1)によって行う。

$$\begin{aligned} \text{GPS 受信時刻} &= \text{GPS 送信時刻} \\ &+ \text{伝播時間} \\ &+ \text{その他の補正時間} \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

以降、GPS 受信時刻の測定精度を、時刻測定精度と呼ぶ。GPS 送信時刻は、測定によって求めた衛星信号の送信時刻であり、受信機雑音、マルチパスの影響、衛星の時計誤差といった誤差要因を有する。伝播時間は、幾何学的な座標により求めた衛星と観測地間の伝播時間であり、精密軌道情報(エフェメリス)誤差を有する。その他の補正時間は、電離層や対流圏モデルによる遅延の補正時間を含み、各モデルに起因した誤差を有する。

また、1PPS は、発生回路方式に依存した 1PPS 出力精度度を有する。1PPS 出力精度度は、時刻測定精度とは独立して 1PPS 出力精度に影響する。

以上により、1PPS 出力精度は式(2)で表せる。

$$P_{\text{acc}} = \sqrt{M_{\text{acc}}^2 + P_{\text{pre}}^2} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、

P_{acc} : 1PPS 出力精度

M_{acc} : 時刻測定精度

* 日本無線株式会社
〒181-8510 東京都三鷹市下連雀 5-1-1
Japan Radio Co., Ltd.
5-1-1, Shimorenjaku, Mitaka-Shi, Tokyo 181-8510

P_{pre} : 1PPS 出力精密度

位置を測定する用途においては、3次元の観測地点の座標と、時刻の4個の未知数を解く。一方、時刻同期用途においては観測地点座標を既知とするため、未知数は時刻のみとなる。各衛星の時刻測定における誤差が同じ分布で、かつ独立であると仮定すると、 M_{acc} は受信衛星数の増加に伴って減少し、式(3)で表せる。

$$M_{acc} = \frac{T_{acc}}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

T_{acc} : 各衛星の時刻測定精度

N : 受信衛星数

本章では、1PPS出力精度を決定付ける、時刻測定精度と1PPS出力精密度について考察を行う。

〈2・1〉 時刻測定の誤差要因 時刻測定には上記で示した様な誤差要因が挙げられる⁽³⁾。図1はこれを模式的に表したものであり、図中のアルファベットは下記の各項目に対応する。

(a) システム誤差

システム誤差はGPSのシステム側が有している誤差であり、主に衛星の時計誤差とエフェメリス誤差に分別される。衛星の時計誤差とは、衛星の原子時計に存在する誤差であり、これを修正するために地上の管制局によって制御が行われている。また、誤差量は衛星間により異なる。

エフェメリスは、各衛星がリアルタイムに送信する航法メッセージの中に含まれており、GPS受信機は、取得したエフェメリスから衛星位置を計算するが、計算した衛星位置と実際の衛星位置との間には誤差が存在し、信号の伝播

遅延誤差、つまり時刻誤差を生じる。

(b) 電離層モデル誤差

衛星から送られてくる航法メッセージの中にはGPSの管制局が観測した電離層遅延補正のためのパラメータが含まれており、これを元にGPS受信機で補正を行う。しかし、パラメータは全衛星共通であり、約1日に1回の更新であるため、観測時間、及び観測地点の違いにより誤差を生じる。

(c) 対流圏モデル誤差

対流圏による伝播遅延は局所的な気温や気圧、水蒸気量が影響するが、誤差量そのものが小さいことから、一般には仰角のみをパラメータとして補正を行う。その場合、季節や日時によって変化する気温、気圧、水蒸気量によって誤差を生じる。

(d) マルチパス

衛星からの電波が、アンテナに到達する際、建物や地表等から反射した信号が混入することがある。これがマルチパスであり、反射波は直接波より長い経路を通ってくるため、到達時間に遅れが生じる。その影響は反射波の強度と、直接波に対する反射波の遅延に依存する。

(e) 受信機雑音

受信機雑音は、熱雑音や信号の処理方式に基づく、受信機固有の性能に依存する誤差である。

これらの誤差要因による、一般的な環境の下での時刻測定における誤差の値を表1にまとめる。その結果、約25 ns (標準偏差) の誤差を生じる。

〈2・2〉 1PPS出力精密度について 1PPS出力精密度

とは、1PPSの出力回路における分解能によって決定される値である。ここでは、一般的に用いられている1PPSの発生方法を用いて説明する。図2にブロック図と動作タイミングを示す。

図2(a)の回路は、CMOS回路で実現されるデジタルアップカウンタ、またはデジタルダウンカウンタで構成されるが、ここではダウンカウンタの場合を例として示す。本方式は、安価で単純な構成で実現可能であるため、1PPS出力回路として一般的に用いられている。

まず、出力したい1PPSのタイミング情報Lをデジタルカウンタに設定する。デジタルカウンタは、受信機内部のクロックにより、設定したカウント値からカウントダウンを行い、カウントが終了したタイミングで1PPSの出力を行う。

図1 時刻測定の誤差要因

Fig. 1. Error sources for time measurement.

表1 時刻測定の誤差要因

Table 1. Error sources for time measurement.

	Error Sources	Error (σ)
(a)	System ⁽¹⁾	5.2 ns
(b)	Ionosphere Model(Global Average) ⁽¹⁾	23.1 ns
(c)	Troposphere Model ⁽¹⁾	0.8 ns
(d)	Multipath(by measurement)	6.6 ns
(e)	Receiver Noise(by measurement)	1.6 ns
Total		24.7 ns

(a) Block figure (b) Operation timing

図2 一般的な1PPS出力方式

Fig. 2. General 1PPS output method.

例えば、 t_{set} 秒後に 1PPS の出力を行う場合、デジタルカウンタへの設定値は、 t_{set} をクロック周期 T で除算し、小数点以下を四捨五入した値として、式(4)で表すことができる。

$$L = \text{ROUND} \left(\frac{t_{\text{set}}}{T} \right) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

T : クロック周期[s]

であり、 $\text{ROUND}()$ は小数点以下を四捨五入する関数を表す。

前述したように、GPS の時刻系は UTC(USNO)に同期するよう制御された時刻であり、GPS 時刻と呼ばれる。出力したい 1PPS のタイミングである GPS 時刻は、GPS 衛星が搭載している高精度の原子時計を基準としている。一方で、受信機内部のクロックは周波数精度 10^{-6} 程度の安価な発振器を使用しており、両者は非同期である。そのため GPS 時刻に対して、クロックのタイミングは一様に分布し、クロック周期を $T[\text{s}]$ とすると、その出力の標準偏差は $T_0 = T/\sqrt{12}$ [s] となる⁽⁴⁾。そのゆえ、クロックの分解能が増大すると誤差は大きくなり、1PPS 出力精度を悪化させる。

例えば、一般的に用いられている 16 MHz($T=62.5$ ns)のクロックを用いた場合、標準偏差は、 $T_{0_16M} = 62.5/\sqrt{12} = 18.0$ ns となる。

図 2(b)は一般的な 1PPS 出力のタイミングであり、出力したい GPS 時刻のタイミングに対して、クロックのタイミングでしか出力することができないため、誤差が生じる。

3. 1PPS 出力精度の限界

1PPS 出力精度は、時刻測定精度と、1PPS 出力精度度によって決定されることを前章までに述べたが、本章では、現状の 1PPS 出力精度について考察する。

図 3 は、2 章で求めた時刻測定の精度 24.7 ns と、クロックを 16 MHz($T=62.5$ ns)とし、 $T_{0_16M} = 18.0$ ns を用いた時の 1PPS 出力精度である。 $T_{0_16M} = 18.0$ ns を式(2)の 1PPS 出力精度度に入し、受信衛星数に対する 1PPS 出力精度の関係を表している。また、1PPS 出力精度のうち、時刻測定精度

図 3 従来方式における 1PPS 出力精度(理論値)

Fig. 3. General 1PPS output accuracy(theoretical value).

の成分のみを表した値も同時に示す。式(3)より、時刻測定精度は、衛星数の平方根に反比例し改善していくが、1PPS 出力精度度はそのまま加算される。そのため、衛星数が十分に多い環境では 1PPS 出力精度度が支配的となる。

実際、図 3 においては、時刻測定精度に起因した 1PPS 出力精度は、衛星数の増加に伴い減少するが、1PPS 出力精度度が 18 ns であるため、全体としては約 20 ns で飽和している。従って、1PPS 出力精度度を向上させるには、出力精度度を向上させることが必要である。

現状では、平均可視衛星数は 8 個であり、この場合の、時刻測定精度は表 1 より、 $24.7/\sqrt{8} \approx 9$ ns となる。本論文では、式(2)に示した様に、時刻測定精度と 1PPS 出力精度度は二乗和の平方根となることから、時刻測定精度が支配的となるよう、1PPS 出力精度度は、時刻測定精度の約 1/10 とする 1 ns を目指すことにした。

4. 精密 1PPS 出力方式の検討

1PPS 出力精度度を向上させるには、例えば以下の様な方式が考えられる。

1) 高速デジタル方式

クロックを 300 MHz とし、 $T_{0_300M}=1$ ns を実現する。

2) アナログ方式

分解能を向上するため、アナログ回路によって 1PPS 信号を生成する。

以下に、それぞれの動作について説明する。

1) 高速デジタル方式

一般的な 1PPS 出力回路の場合と同様に、出力したい 1PPS のタイミング情報をデジタルカウンタに設定する。しかし、本方式では、これらの動作は 300 MHz にまで高速化したクロックで駆動し、設定値のカウンタを行う。

すなわち、 t_{set} 秒後に 1PPS の出力を行う場合、デジタルカウンタへの設定値 L は、式(5)で表せる。

$$L = \text{ROUND} \left(\frac{t_{\text{set}}}{T_{\text{fast}}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

T_{fast} : 高速クロック周期[s]

である。

本方式では、従来のクロック 16 MHz をクロック T_{fast} に高速化することによって、出力したい時刻と実際の出力との

(a) Block figure

(b) Operation timing

図 4 アナログ方式

Fig. 4. Analog method.

誤差を減少させることが可能となる。

2) アナログ方式

図 4 はアナログ方式のブロック図の例と動作タイミングである。

図 4(a)において、アナログ信号発生回路によりアナログ波形を生成する。一方で、時刻情報 t_{set} を電圧に変換した値 V_{set} をコンパレータに設定し、アナログ波形との比較を行う。そして、アナログ波形が設定電圧を越えたタイミングで、コンパレータから 1PPS を出力する。この時、アナログ信号発生回路は出力する 1PPS によってリセットを行い、再びそのタイミングでアナログ波形を生成する。

図 4(b)は上記アナログ方式の動作タイミングである。アナログ信号発生回路により、例えば、単位時間当たり $a[\text{V/s}]$ 電圧が増加するノコギリ波を生成する。この時、コンパレータに設定する電圧値 V_{set} は、時刻情報 $t_{\text{set}}[\text{s}]$ を用いて、式(6)で表せる。

$$V_{\text{set}} = a \times t_{\text{set}} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

a : ノコギリ波の傾き $[\text{V/s}]$

V_{set} : 設定電圧 $[\text{V}]$

この場合、 a 及び V_{set} が時刻に与える誤差を 1ns 以下とすることが精密な出力を行う上で必要となる。

一般に、1)の様な高速クロックによる回路は、設計が困難となり、高価なデバイスが必要となる。さらに、CMOS 回路の場合、クロックに比例して消費電力が増加するという問題も生じる。従って、本論文では 2)のアナログ回路方式を採用した。

5. 評価結果

本章では、1PPS 出力精度の検証を行うために、まず各衛星による時刻測定精度の評価を行い、次に精密 1PPS 出力回路を組み込んだ 2 台の GPS 受信機を用いた相対同期精度の

評価を行う。

〈5・1〉 時刻測定精度の評価

1PPS 信号は、受信した全ての衛星から求めた GPS 時刻を元に出力されるため、24 時間の各衛星の時刻測定における誤差を観測した。24 時間測定を行う根拠は、GPS 衛星の組み合わせの周期が約 23 時間 56 分であることから、観測地点での全ての衛星の組み合わせを測定する必要があることによる。

図 5 は、GPS 時刻を中心とした各衛星の時刻誤差の時系列変化である。ここでは衛星番号は付記していないが、運用衛星 29 個が、可視衛星として順次切り替わる様子を示している。24 時間の平均受信衛星数は 7.8 個であった。右軸には、衛星から受信した電離層補正パラメータから計算した電離層遅延時間の平均値を示している。なお、式(1)で述べたように、各衛星の時刻測定値は、上記電離層遅延時間の補正を加えた値である。

図 5 より、24 時間の測定においては、約 20 ns の衛星毎の時刻誤差、及びその時間変動が確認できた。

また、夜間と比較して昼間の衛星間誤差が増加する傾向が見られた。この傾向の原因は、昼間の電離層遅延の計算値も増加していることから、昼間は太陽活動が活発化し、電離層の通過距離の短い高仰角衛星と、通過距離の長い低仰角衛星の間で、実際の電離層遅延時間と計算による遅延時間の誤差が増大することによると考えられる⁽³⁾。

次に測定値の分布に関して評価する。GPS 衛星は移動衛星であるため、個々の衛星の長期的な時刻変動の把握には長期間に渡る測定が必要となる。本稿では、24 時間の全可視衛星の観測値を母集団として扱うことで、衛星の長期変動を衛星間の誤差に置き換えたモデルとして扱う。図 6 は、図 5 において時系列で示した全可視衛星の観測値、及び 1 秒毎の観測時における可視衛星の平均値をヒストグラムで示したものであり、両分布ともほぼ正規分布を示している。平均受信衛星数は 7.8 個の受信環境下において、全観測値は

図 5 各 GPS 衛星の時系列変化
Fig. 5. Time variations of each GPS satellite.

図 6 時刻測定における誤差の分布
Fig. 6. Distributions of time measurement.

図 7 測定ブロック

Fig. 7. Measurement block.

標準偏差 7.0 ns の分布に対し、平均値は標準偏差 3.9 ns の分布を示していることから衛星数増加による誤差の改善効果が確認できた。

なお、GPS 時刻の精度は、今回実施した測定結果から、実力値としては標準偏差 10 ns 程度と認識して良いと考えられるが、観測条件の平均値としては標準偏差 40 ns 以下⁽¹⁾が報告されている。

〈5・2〉 相対同期精度の検証 次に、精密 1PPS 出力回路を組み込んだ 2 台の受信機を用い、相対同期精度の評価を行った。測定のブロック図を図 7 に示す。建物の屋上にアンテナを設置し、2 台の GPS 受信機間の 1PPS の差の標準偏差を、タイムインターバルアナライザ(HP 5371A)を用いて測定した。測定は、アンテナを共通にした場合と、実際の使用状態に近い、異なるアンテナを用いた場合において、それぞれ 24 時間行った。測定日における 24 時間の平均受信衛星数は 8.4 個であった。

遅延時間に影響するアンテナケーブル長、及び 1PPS 信号出力ケーブル長は同一長とし、GPS 受信機回路遅延の個体差をあらかじめ補正し、2 つの 1PPS 信号間の平均値が 0 となる条件で測定を実施した。

測定結果を表 2 と図 8 に示す。図 8 は代表例として、共通アンテナで測定した場合の誤差のヒストグラムである。両受信機間の 1PPS の差の標準偏差、すなわち相対同期精度は、16 MHz の低速クロックを用いた従来のデジタル方式

表 2 測定結果

Table 2. Measurement result.

(15 Nov, 2004 Mitaka, Tokyo)

	Analog method		Digital method (f=16 MHz)
	Common antenna	Different antennas	Common antenna
Standard deviation(σ)	1.3 ns	1.8 ns	25.0 ns

図 8 アナログ方式における誤差の分布
Fig. 8. Distribution of analog method.

25 ns に対し、共通アンテナを使用した場合は 1.3 ns、異なるアンテナを使用した場合では 1.8 ns である。

アンテナ共通の場合、衛星からの信号は共通の経路を通過し、受信機雑音以外の誤差は無視できるため、相対同期精度が 2 ns 以下である実測値より、1PPS 出力精密度は約 1 ns を達成していることを確認できた。

アンテナが異なる場合においても、2 つのアンテナ間は 15 m であり、衛星-アンテナ間距離 20000 km に対して十分近距離であるため、電離層、対流圏、システム誤差の影響は無視でき、マルチパスと受信機雑音が誤差要因となっていると考えられる。

アンテナ間距離が 15m の場合には、マルチパスの到達時間差は最大 49.5 ns となることから、マルチパスの影響による時刻測定誤差は瞬時値として最大約 2 ns となる⁽⁵⁾。従って、異なるアンテナの場合には、共通のアンテナの場合と比較し若干の劣化が見られているものと考えられる。

実際のマルチパスの影響を検証するため、代表例として衛星番号(PRN4)の仰角が時刻測定に与える影響を、アンテナ間距離 15m の受信機間で比較した結果を図 9 に示す。なお、仰角の低下と共に測定値が増加する傾向が見られるのは、先に〈5・1〉で述べた電離層の影響である。マルチパス混入の頻度の少ない高仰角時には両受信機の測定値に差は無いが、マルチパス混入の頻度が多い低仰角時には差が生じていることがわかる。

〈5・3〉 まとめ 観測した GPS 時刻と真の時刻である UTC(協定世界時)とのオフセットの評価は実質困難であるが、GPS 時刻の測定精度は、評価結果から実力値として標

図9 衛星仰角の時刻測定に与える影響
Fig. 9. Effect on time measurement by elevation.

準偏差約 10 ns と考えられる。そして、測定精度より十分微細な 1ns の 1PPS 出力精密度を実現したことにより、数 ns の相対同期精度を可能とした。

従って、例えば、通信基地局間の距離が 30km 程度で GPS 衛星の高度 20000km に対して十分近距離の場合、同一衛星からの信号はほぼ同一の伝播経路を通過し、両局間の電離層による信号遅延の差は約 1ns⁽⁶⁾にすぎないため、評価結果と同程度の数 ns の高精度な相対時刻同期を利用可能であると考えられる。

GPS 受信処理について、マルチパスの抑圧や電離層、対流圏モデル誤差の軽減、観測地点間の相対温度差による同軸ケーブルを含んだ回路内部遅延差の抑圧が今後の課題である。

6. おわりに

1PPS 出力精度の向上を図るために、GPS システムの精度を検討した上で、その精度より十分小さな出力精密度をもつ 1PPS 信号の発生方式を用いることにより、高精度に相対時刻同期を得ることを示した。

高精度の相対時刻を得ることにより、例えば初期捕捉の高速化をはかった通信システムや、同時サンプリング精度の向上させた計測システムへの応用が期待できる。

なお、数 ns の高精度同期を実現するには、1PPS 出力側の性能向上はもちろん、1PPS を利用する回路側の引き込み配線の長さ（遅延時間）、入力回路のしきい値特性のばらつきなどへの精密な配慮も重要である。

（平成 16 年 12 月 24 日受付，平成 17 年 4 月 5 日再受付）

文 献

- (1) SPS : Global Positioning System, Standard Positioning Service Performance Standard, Department of Defense, pp.A30-A37 (2001)
- (2) ICD-GPS-200C : Arinc Research Corporation, p.33 (2000)
- (3) Pratap Misra Per Enge : Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press, pp.123-174 (2001)
- (4) Athanasios Papoulis : Probability, Random Variables, and Stochastic Processes Third Edition, McGraw-Hill, pp.102-109 (1991)

- (5) B.Parkinson, J.Spilker, P.Axelred, and P.Enge : Global Positioning System : Theory and Applications Volume I, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp.547-568 (1995)
- (6) RTCM SC-104 : RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, version 2.3, Radio Technical Commission For Maritime Services.p.3-8 (2001)

豊 泉 裕 章

（非会員）1999 年 3 月名古屋大学理学部物理学科卒業。2001 年 3 月同大学院理学研究科博士課程前期課程修了。同年日本無線（株）入社。GPS 応用装置の開発に従事。現在、同社研究開発部 電波研究グループに所属。

源 田 正 弘

（正員）1988 年 3 月鳥取大学工学部電気工学科卒業。同年日本無線(株)入社。GPS 受信機、及び GPS 応用装置の開発に従事。現在、同社研究開発部 電波研究グループに所属。