

時刻基準としてのGPS受信機

コーデンセンサアンドソフトウェア株式会社
前田 久昭 (現ポジション(株)商品部次長)

GPSにおける測位の精度は、C/Aコードによる場合は100m、Pコードによる場合は16mとなっている。これを実現するためには、GPSで用いる基準時計に要求される精度は、誤差50ns以内となる。実際、衛星の基準時計は、最小単位約0.5ns (1.0×2^{-31}) で補正、管理されている。この基準時計の秒タイミングに同期したパルスをGPS受信機から出力させるアルゴリズムを確認する。さらに、GPS受信機として位置測定用GSU-14がハードウェアを変更せずに利用できるか否かを検証する。

1. まえがき

GPSは汎地球測位システム(Global Positioning System)の略称で、人工衛星を利用した高精度の測位システムである。本来、米国国防総省が軍事利用を目的として構築したシステムであるが、1983年の大韓航空機事件を機に米国政府は約100メートルの精度での民間利用を公認している。近年では、精度を意図的に劣化させる「選択適合性」SA(Selective Availability)を、1996年からの10年以内に廃止する旨、米国副大統領の声明として公表している。

2. 測定原理

GPS測位の基本は、時刻による距離測定である。GPS衛星から準マイクロ波帯(1575MHz)で放送されている各衛星の位置情報(エフェメリスパラメータ)と、複数の衛星から同時に発射される位置測定用信号(エポック信号)とを受信して、各衛星からの受信点までの距離を求め、位置計算を実行する。ただし、上記説明は、受信側で衛星搭

載の原子時計と同程度の正確な時計を持っていることを前提としている。実際には受信装置に内蔵された低精度の時計と衛星搭載の正確な時計との時刻差を未知数として取り扱い4個の衛星を受信することで3次元の位置データと正確な時刻データの4個の未知数を受信装置内部で計算する。

GPS衛星から発射されている信号のうち、民間用信号の諸元は米国国防総省発行の文書ICD-GPS-200で公開されており、受信装置さえあれば地球上のどこでも、いつでも、利用できる。利用者数に制限がなく、無料で利用できることはGPSの大きな利点である。

GPSを利用すれば、従来容易に得られなかった地球上の3次元の絶対位置と正確な時刻及び周波数を得ることができるという利点がある。

GPSで得られる時刻周波数情報の精度はモニタ局で管理、維持されているため、GPS受信装置はメンテナンス不用の高精度時計、あるいは高精度周波数標準器として利用される。例えばデジタル通信網で要求される 1×10^{-11} 以上のクロック周波数精度も、GPSによって実現できる。また最近では、PHS基地局でのデジタル信号同期用のクロック信号源としても利用されている。

3. GPSの時刻

GPSで測位すると、結果として受信機内部の時計が衛星の原子時計に完全に同期した状態になることを述べた。これを利用して世界各地の精密時計の同期や時刻の比較に利用されている。現在、国際原子時TAI(Temps Atomique International 仏語)は、GPS電波によって各国の原子時計の値を比較集計して作られている。

3-1 GPS時と他の時系

GPS衛星上の原子時計の刻む時刻をGPS時(GPStime)と称している。GPS衛星の時計と地上の受信装置の時計による電波の到達所用時間から距離を求めるので、GPSシステムの中で時系を統一するために、このようなGPS時を設定してある。また、一般相対論の影響を考慮して、衛星上の原子時計には周波数オフセットが与えられているので、地上で受信される1秒の長さは他の時系、すなわち通常われわれが使っているUTC(Universal Time Coordinated 協定世界時)の1秒に一致している。

このGPS時では、秒だけの刻みとしては国際原子時と同じものであるが、UTCで行われる閏秒の調整をしていない。また、1980年1月6日0時UTCを同年同月同日0時GPS時としてスタートさせた。そのためそのときのUTCとTAIの差がそのまま残って国際原子時に対しては常に19秒遅れている。

3-2 時刻同期と周波数校正への応用

GPS衛星のC/Aコードを測定すれば、0.1 μ sの精度で時刻同期や比較が確実に実行できる。C/Aコードで得られるぎりぎりの精度は20-30nsにまで達している。この精度は従来のロランC電波によるものより数倍優れている。その上、ロランCで問題になる内陸部での誤差や伝播遅延による誤差の心配もない。GPS時とTAIは同期しているの、1整数秒の差を別にすれば時刻の基準として利用できる。また、GPS衛星の時計を単なる仲介として地上の精密時計を相互に比較することも可能である。

3-3 衛星からのコード信号タイミング

GPS衛星から送信されているC/AコードやPコードはある種のタイムマークであって、これらの符号の各部分は衛星上の原子時計と厳格に関係づけられている。しかし、伝播遅延を別にしても、実際に受信したコードの波形の立ち上がり(又は、立ち下がり)そのものが常に正確な時刻になっているのではない。なぜなら、衛星上の原子周波数標準とそれに連動する時計は、いわば走りっぱなしであって、地上の追跡管制局によって誤差を測定し、修正値を航法メッセージで利用者に知らせているからである。すなわち、衛星からのコード信号タイミングの精度はソ

フトウェア的に確保されているから、これらを利用するときもソフトウェアによる修正操作が必要となる。

3-4 受信機時計の修正の意味

GPS測位の過程で受信機の時計もGPS時に同期させられる。これもソフトウェア的な意味での同期であって、受信機の水晶時計の出力そのものが必ずしも同期しているわけではない。しかし、ソフトウェア的に修正された受信機時計は、航法メッセージを受信解読して上記衛星時計の誤差を修正するので非常に正確である。

一方、通常のGPS測位用受信機では、自分の時計の修正値も、水晶時計の直接の時刻信号も外部に出力されていない。

3-5 時刻同期用GPS受信機

上述した理由によって、測位専用で作られたGPS受信機をそのまま時刻同期には利用し難い。そのため、時刻同期・比較専用の受信機が作られている。

測定する場所の緯度経度と高さを受信機に設定し、1個の衛星を受信し擬似距離を測定する。同時に、航法メッセージを解読して衛星の軌道情報や電離層補正係数を取得する。次に、測定した擬似距離に電離層補正等を施し時計のオフセットを求める。

時刻同期の精度0.1 μ sの時間に電波が進む距離は30メートルであるから、これと比べ十分正確な距離を受信場所の座標として設定する必要がある。この所要精度は在来の測量で十分実現できるし、必要ならばGPSによる測位を行えばよい。

時刻比較用受信機は、ソフトウェア的に取得した修正値で内蔵時計の信号を電氣的に修正して、正しい信号として出力できる。

時刻比較では、測定する場所の位置は既知で固定点の場合が多いので測位の機能は必要ない。したがって、受信チャンネル数は必ずしも4チャンネルを必要としないとされている。衛星の位置と測位点の位置の双方を既知として求めればよいから、未知数は1個であるためである。すなわち、受信チャンネルは、1チャンネルでよいとされてきた。

しかし、現実には測定した結果が必ずしも正しいとは限らない。複数のGPS衛星を同時に測定すると稀ではあるがその時刻が同期しないことがある。その主な理由として以下の二つがあげられる。

第1は複数のGPS衛星から受信機までの電波伝播による誤差等が生じることによる。

第2はGPSでは、地上の追跡管制局が誤差を測定し修正値を航法メッセージで利用者に知らせていることによって正確な時刻を得ているが、追跡管制局が誤差測定をしてから航法メッセージとして放送するまでに数時間を要する場合があり、その間は単独の衛星間で時刻情報に誤差を生じるためである。

4. 航法メッセージ

受信機内では、衛星の軌道情報や衛星の時計の補正值、電離層の補正係数等の情報が必要である。これらは、衛星からスペクトラム拡散方式を用いて放送されている。これを航法メッセージという。

4-1 航法メッセージのフレーム

航法メッセージは、ビット率50bpsで、全ビット数1500ビットをメインフレームとするデータである(図1)。したがって、1メインフレームを送るのに30秒かかる。メインフレームは6秒300ビットずつの5サブフレームに分割されている。サブフレームは1ワード30ビットの10ワードからなる。各サブフレームの頭にTLMと略されるテレメトリーをかねた同期パターンの1ワードとHOW(Hand Over Word)というPコードへ乗り換えるための1ワードが置かれている(図2)。

また、メインフレーム25個を1群、すなわち、12.5分間のデータからなるマスターフレームを形成している。サブフレームの1から3までの内容は、その信号を送信している衛星自身の時計や精密な軌道情報(エフェメリスパラメータ)に関するものであ

て、25フレームからなるマスターフレームの中で同一の内容を繰り返している。サブフレーム4と5の内容は全GPS衛星のシステムに関するもので、フレーム毎にその内容が変わる。これをページといい25フレームからなるマスターフレームの中で1から25ページまでである。これによって全GPS衛星群の軌道情報(アルマナックパラメータ)や電離層の補正係数等の共通なデータを利用者に送信する。

4-2 GPS時と航法メッセージ

航法メッセージはGPS時による週初めのC/Aコードのリセットに同期して、その第1サブフレームから始まる。したがって、1フレームが30秒である航法メッセージの頭はGPS時の毎正分と30秒毎に一致している。また、各サブフレームの頭(TLM)は6秒ごとに送られることになる。

受信機の時計が正しく合っていないくても、C/Aコードを用いて航法メッセージを解読できれば、週の初めからのGPS時による秒で表した経過時間が分かり、0.1秒の精度で修正できる。衛星の軌道は約20,000~27,000kmであるから、伝播時間は66.6~90ms程度である(図3)。これを補正することで、精度1msでUTCとの同期が実現できることになる。



図1 メインフレームの構成

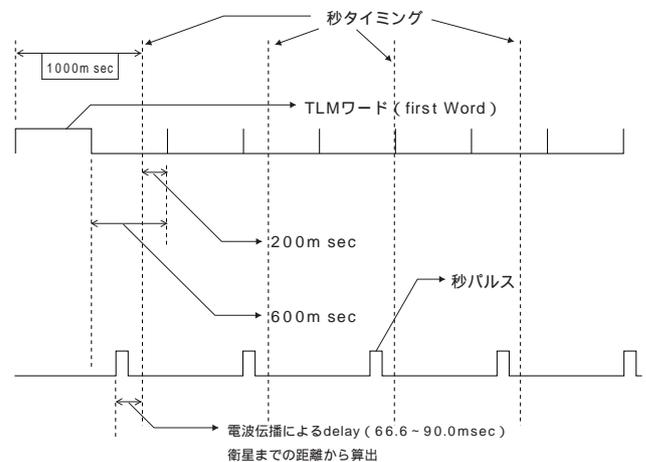


図3 秒パルスを発生させるタイミング



図2 TLMとHOWワード

5. 検証実験

今回の実験では、従来のGPS受信機のハードウェアを変更せずそのまま利用して、UTCに同期した秒パルスをGPS受信機から出力させた。そのため、パルスの出力回路にシリアル回線のUARTを使用したため、精度的には±4ms程度が限界となる。

5-1 検証回路の構成

位置測定用GPS受信機(GSU-14)のソフトウェアを改造し秒パルスを発生させる。このパルスと、ルビジウム周波数標準の出力を分周して作成した1秒パルスとの差を測定する。このパルスの差をパラレル・シリアル変換し、デジタル化してパソコンを使って記録した(図4)。この方法ではUTCに対する誤差は測定できないが、そのパルス間隔の安定状態を知ることが可能である。

また、UTCとの差は従来の時報や他社製の秒パルス発生器と比較して確認した。

5-2 結果

上記の検証回路で24時間の連続測定を行った。その結果を図5と表1に示す。電源投入直後のパルスの差、すなわちオフセットが55msであったことから、その誤差が±5ms以下に収まっていることが分かる。

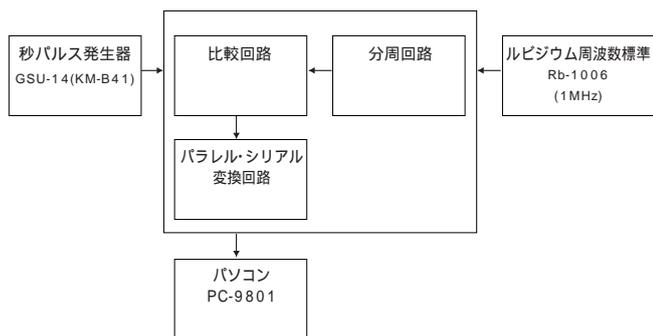


図4 検証回路の構成

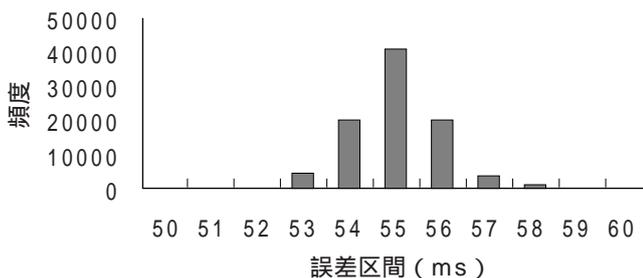


図5 連続24時間の誤差ヒストグラム

誤差区間	頻度	誤差区間	頻度
50	0	56	19563
51	12	57	2672
52	217	58	324
53	3885	59	0
54	19095	60	0
55	40560	—	—

表1 誤差ヒストグラムの数値

6. あとがき

現在、GPS受信機を測位装置として使用する以外の用途が着目されつつある。その理由は、GPSの最大の特長である「地球上のどこでも、いつでも、利用できる」と受信装置それ自体が安価になってきたためである。その最たる用途が計時装置としてであり、その市場も拡大しつつある。今回の実験では、アルゴリズムの確認と安価な秒パルス発生器の作成を目的とした。そのため精度は、システムの理論値には及ばない。しかし、これまでとは異なる用途・要望に応えられる可能性がある。また、一般的な時計の場合、その誤差は累積されるので定期的な較正が必要となるが、GPSを利用した時計の場合その必要はない。今後更に、時計の高精度化と操作性の向上を進める上で、水晶発振器の位相制御回路、温度補償回路、分周回路等のハードウェアの追加、及び位相検出後の誤差推定に安定なアルゴリズムが必要となる。

7. 謝辞

関係資料を提供していただいたコーデンアンドソフトウェア(株)小林研一氏、三井田幸宏氏に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 日本測地協会編：新訂版GPS—人工衛星による精密測位システム、社団法人日本測量協会
- (2) 土屋淳/今給零哲郎：GPS測量と基線解析の手引き、社団法人日本測量協会
- (3) 小林敦：電子材料制御機器News'97/4 200S、「GPS応用商品の動向と今後の展望」,松下電工マーケティング部

出典

光電技報第14号 平成10年6月
(株)光電製作所 多摩川事業所出版