GPS時刻同期機構を用いた通信遅延測定ツールの開発

原　三英　本多弘樹　弓場敏嗣
電気通信大学大学院情報システム学研究科
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
Tel:0424-40-7508
Email:hara@yuba.is.uec.ac.jp

GPSによる高精度な時刻同期の応用の一例として、通信遅延測定への応用を検討する。一般に通信遅延測定にはラウンドトリップタイムが用いられている。ラウンドトリップタイムによる測定では、送受信経路の異なる環境での送信側から受信側までの片道の通信遅延時間を正確に測定することは不可能である。そこで、GPSにより得られる高精度な同期クロックを用い測定を行うツールを開発し、測定ツールの評価として、ラウンドトリップタイムによる通信遅延測定と比較した。その結果、送受信経路が異なる環境においてもRTTでは正確な測定が不可能な片道通信遅延が測定可能であることを示した。

A tool for measuring one-way communication latency based on GPS time synchronization

Mitsuhide Hara, Hiroki Honda and Toshitsugu Yuba
Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications. 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585 Japan
Tel:0424-40-7508
Email:hara@yuba.is.uec.ac.jp

High accuracy real-time synchronization is required to improve performance of distributed systems, where elimination of communication overhead is one of the most significant problems. One-way communication latency between two computers located at a distance is usually measured by using round-trip time. The method does not lead to high accuracy measurements, when a round-trip communication path traverses different nodes between two computers (nodes).

In this paper, we propose a tool for measuring one-way communication latency based on high accuracy GPS (Global Positioning System) time synchronization. This tool utilizes timestamps of synchronized clocks obtained from the GPS. We implemented the tool on Solaris2.3 computers in C for TCP/IP and UDP/IP protocols, and verified its usefulness and accuracy as a measuring tool of one-way communication latency. We also discuss its application to concurrency control of transaction systems and synchronization mechanism of multimedia systems.

1. はじめに

一般にGrobal Positioning System (GPS)は、全地球測位システムとして、海上、陸上を問わず、地球上のどの地域でも、連続的かつ単独で測位可能な衛星航法システムである。GPS利用者は24時間手軽に現在位置、現在時刻などを知ることができる。その精度は測位では100m以内、時刻では協定世界時(UTC)に対して$\pm 1\mu s$以内である。

現在、日本ではカーナビゲーションが急激に普及している。その影響でGPS受信機の価格が低下し、サイズも小型化され、今後GPSのアプリケーションは更に広がりつつある[6]。また、実時間同期の手段としてGPSの他にもWWVを用いた方法や、ISDNによる時刻同期[1]があり、実時間同期を行える環境が近年着実に整ってきている。

実時間同期の応用として、分散アルゴリズムへの応用が考えられているが、実用的なプログラムへの応用については十分に検討、研究がなされているとはいえない[2]。

GPSにより得ることができる$\pm 1\mu s$の精度をもつUTCを利用し、コンピュータネットワーク上での送信側から受信側までの片道の通信遅延の精密測定を検討する。

コンピュータネットワーク上のソフトウェアによる通信遅延測定は、送信側から受信側にメッセージを送り、その応答時間(ラウンドトリップタイム:RTT)を用いるのが一般的である。しかし、コンピュータネットワークが多様化し、送信経路と受信経路が異なる通信状況が考えられる。このような場合、従来のRTTを用いた方法では、RTTを1/2した時間が送信側から受信側までの通信遅延であるとは限らない。従って、RTTでは送信側から受信側までの通信遅延を精度高く測定することは困難である。

本研究では、GPSを時刻源として取得したタイムスタンプ(TS)を用い、送信側から受信側までの片道の通信遅延を測定するツールを開発し、従来の手法であるRTTを用いた測定法との比較を行った。

2. 通信遅延測定法

本論文では、2台の計算機間の通信に関わる遅延時間として、伝送遅延と通信遅延の二つを区別して述べる。伝送遅延とはネットワーク上をデータが伝送されるのにかかる時間とし、通信遅延はアプリケーションプログラムの送信処理開始から受信側のアプリケーションプログラムが受信処理を終了するまでの時間とする。

計算機上でのソフトウェアによる通信遅延測定法として、まず従来のラウンドトリップタイム(RTT)を用いた方法を説明する。ついで本論文で提案するGPSによる高精度時刻同期したクロックから得られるタイムスタンプ(同期タイムスタンプ:STS)を用いた通信遅延測定法について述べる。最後に両者の測定方式について比較検討を行う。

2.1 ラウンドトリップタイムを用いた通信遅延測定

2台の計算機(ノードAとノードBとする)間のRTTを用いた通信遅延を測定する通信モデルを図1に示す。

ノードAが送信側、ノードBが受信側であり、各々のノードは時刻同期されていないローカルクロックを持つ。$TA_1 \sim TA_8, TB_1 \sim TB_4$は各ノードのローカルクロックの示す時刻、$\lambda A, \lambda B$は各ノード内での処理時間とする。また$\delta_{AB}, \delta_{BA}$はそれぞれノードAからノードB、ノードBからノードAまでの伝送遅延とする。

通信遅延測定に用いるタイムスタンプの示す時刻を特にTS_snd, TS_rcvと表記する。それぞれが示す時刻は図中に示した時刻TAと同一である。

RTTによる通信遅延測定の手順は次の通りである。

(1) ノードAが送信時刻を取得

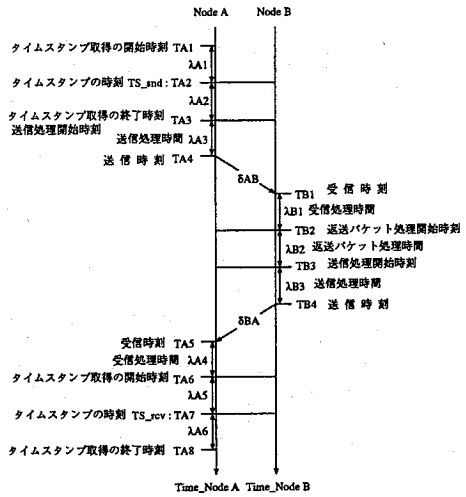


図1 RTTを用いた通信遅延測定

(2) ノードBに測定パケットを送出

(3) ノードBが測定パケットに対して応答パケットを送出

(4) ノードAが応答パケットの受信時刻を取得

図1に示すRTTによる測定では、ノードAからノードBへの通信遅延L_{rtt}は一般に$\delta_{AB} = \delta_{BA}$であると仮定し、測定に用いるタイムスタンプの時間差からノードでの処理時間を引いたものを1/2する。

$$L_{rtt} = \{(TS_{rcv} - TS_{snd}) - (\lambda A2 + \lambda A3 + \lambda B1 + \lambda B2 + \lambda B3 + \lambda A4 + \lambda A5)\}/2 \quad (1)$$

先に述べた通信遅延の定義から、送受信処理時間$\lambda A3, \lambda B1, \lambda B3, \lambda A4$は通信遅延に含まれる。従って式(1)の送受信処理時間を省くことにより次式が得られる。

$$L_{rtt} = \frac{(TS_{rcv} - TS_{snd}) - (\lambda A2 + \lambda B2 + \lambda A5)}{2} \quad (2)$$

式(2)の第2項は測定の誤差原因となるタイムスタンプの取得に要する時間と返送パケットの処理時間であり、厳密な測定では補正の必要がある。

この測定法は、送信時の遅延と受信時の遅延がほぼ同一であるという仮定の下に成り立つ。よって、送受信経路が異なる場合など送信時の遅延と受信時の遅延が明らかに異なる場合には、送信側から受信側までの片道の通信遅延の正確な測定は不可能である。

2.2 同期タイムスタンプを用いた通信遅延測定

2台の計算機間におけるSTSを用いた通信遅延測定の通信モデルを図2に示す。

ノードAが送信側、ノードBが受信側であり、各

ノードのローカルクロックはGPSを用い時刻同期精度$\pm\varepsilon_A, \pm\varepsilon_B$で同期されている。図中の$TA, TB, \lambda, \delta, TS$はそれぞれ図1と同様である。

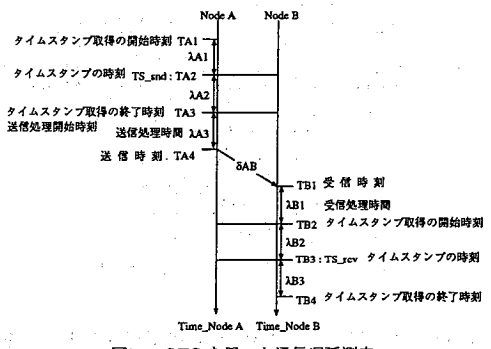


図2　STSを用いた通信遅延測定

STSによる通信遅延測定の手順は次の通りである。
(1) ノードAが送信時刻を取得
(2) ノードBに測定パケットを送出
(3) ノードBが測定パケットの受信時刻を取得

図2に示した、時刻同期を応用したSTSによる測定法ではノードAからノードBへの通信遅延L_{sts}は次の式で求めることができる。

$$L_{sts} = (TS_{rcv} - TS_{snd}) - (\lambda A2 + \lambda A3 + \lambda B1 + \lambda B2) \quad (3)$$

時刻同期精度εを考慮すると、式(3)は式(4)となる。

$$L_{sts} = (TS_{rcv} \pm \varepsilon_B - TS_{snd} \pm \varepsilon_A) - (\lambda A2 + \lambda A3 + \lambda B1 + \lambda B2) \quad (4)$$

先に述べた通信遅延の定義から、送受信処理時間$\lambda A3, \lambda B1, \lambda B3, \lambda A4$は通信遅延に含まれる。従って式(4)の送受信処理時間を省くことにより次式が得られる。

$$L_{sts} = (TS_{rcv} \pm \varepsilon_B - TS_{snd} \pm \varepsilon_A) - (\lambda A2 + \lambda B2) \quad (5)$$

式(5)の第2項は測定の誤差原因となるタイムスタンプの取得に要する時間であり、厳密な測定では補正の必要がある。

2.3　両方式の比較

RTTでは$\delta_{AB} \neq \delta_{BA}$の場合送信側から受信側までの片道の通信遅延の正確な測定が不可能である。また、STSでは測定精度に時刻同期精度がかかわるため、同期機構により得られる精度が異なるという問題点がある。

両方式の特徴として次のようなことが挙げられる。

- RTTを用いた測定
  (1) $\delta_{AB} \neq \delta_{BA}$の場合、片道通信遅延の正確な測定は不可能
  (2) 測定に用いている時刻はノードAのローカルクロックによるため、時刻精度は同クロックの精度に依存
  (3) 厳密な測定を要する場合、補正の必要となるタイムスタンプの取得時間は単一ノード上であるため比較的容易
  (4) ノードBにおける返送パケット処理時間$\lambda B2$はタイムスタンプの取得時間に比べ小さい
- STSを用いた測定
  (1) $\delta_{AB} \neq \delta_{BA}$の場合でも、片道の通信遅延の正確な測定が可能
  (2) 測定に用いている時間が複数のクロックのため、測定精度が各々の時計同期精度に依存
  (3) タイムスタンプ取得時間$\lambda A2, \lambda B2$は各ノードに依存しており、補正機構が必要
  (4) ノードBにおけるSTSのタイムスタンプ取得処理時間$\lambda B2$がRTTの返送パケット処理時間$\lambda B2$に比べ一般に大きい

3. 通信遅延測定ツール

通信遅延測定ツールは、C言語によりSolaris2.3上でソケット通信を用い、TCP/IPおよびUDP/IPプロトコルに対して実装した。ツールはクライアントプログラムとホストプログラムからなる。クライアント、サーバ両プログラム共に送信側から受信側までの片道の通信遅延を返す。

本論文では、測定ツールの評価のために開発した測定ツールに、RTTでの測定を同時に行えるように機能を付加したものを用いた。使用した測定ツールの通信モデルを図3に示す。

ノードAが送信側、ノードBが受信側であり、各々のノードのローカルクロックはGPSを用い時刻同期精度$\pm\varepsilon$で同期されている。図中の$TA, TB, \lambda, \delta, TS$はそれぞれ図1, 図2, と同様である。

通信遅延測定の手順は次の通りである。
(1) ノードAが送信時刻を取得
(2) ノードBに測定パケットを送出
(3) ノードBが測定パケットの受信時刻を取得
(4) ノードAに応答パケットを送出
(5) ノードAが応答パケットの受信時刻を取得

RTT、STS各々を用いた通信遅延時間L_{rtt}, L_{sts}は図3の斜線で示した補正すべき値を、タイムスタンプの時刻差に補正することで以下のように求められる。

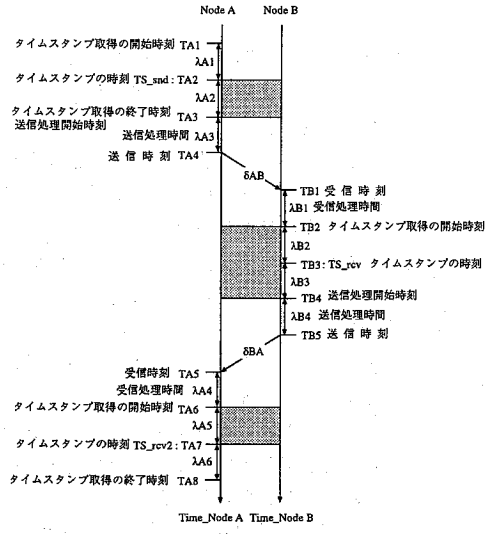


図3　時刻同期を用いた通信遅延測定

$$L_{sts} = (TS_{rcv} - TS_{snd}) - (\lambda A2 + \lambda B2 + 2\varepsilon) \quad (6)$$

$$L_{rtt} = (TS_{rcv2} - TS_{snd}) - (\lambda A2 + \lambda B2 + \lambda B3 + \lambda A4) \quad (7)$$

4. 通信遅延測定ツールの評価

評価環境として、図4, 図5 に示す 10Mbps Ethernet LAN 環境を用いた。

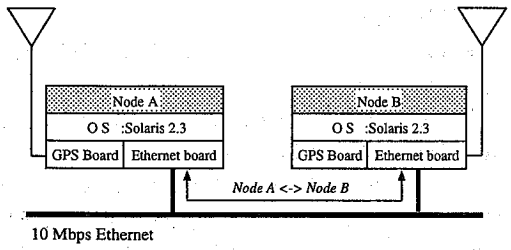


図4　送受信経路が同一の測定 LAN 環境

図4 は Node A から Node B への通信経路と Node B から Node A への通信経路が同一である。図5 は Node A から Node B への通信経路上に仮想のネットワーク遅延として、Node C が存在する。Node C は Node A から受信したパケットを Node B に対して送出するのみの動作を行う。Node B から Node A への通信経路は直接通信を行う。

時刻同期用のハードウェアとして、測定に用いたワークステーションに Datum inc. 社の GPS レシーバーボード bc637S を接続した。同レシーバーボードはハードウェアにより GPS からの信号から UTC を算出し、ボード上のレジスタに格納している。また、取得時刻の精度は $1\mu s$ 以上が保証されている[3]。GPS ボードからの時刻読みだしは μs 単位であるため、$\varepsilon = 1\mu s$ とした。

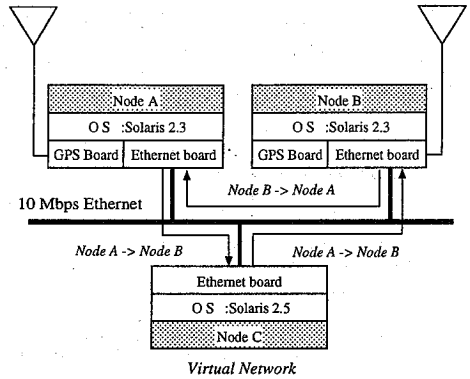


図5　送受信経路が異なる測定 LAN 環境

また、タイムスタンプの取得時間に相当するλは時刻取得を行うシステムコールを 10 万回発行して計測し、その平均時間を補正値とした。補正した値は $(\lambda A3 + \lambda A4) = (\lambda B2 + \lambda B3) = 22\mu s$ である。

測定は通信プロトコルとして UDP/IP を用いた。図4 に示す環境では、次の状況で測定を行った。

(1) 夜間のユーザが少ない状態
　(ネットワークの輻輳が少ない場合を仮定)

(2) 日中でユーザが複数 LAN 内の計算機を使用している状態
　(ネットワークの輻輳が多い場合を仮定)

また、図5 に示す環境で上記の (1) の状態で測定を行った。なお、通信遅延時間の算出には前述の (6)(7) 式を用い、補正値である各λ, εは次のように定めた。それぞれの測定結果を図6～図8 に示す。

図6、図7 は送受信経路が同一である環境での測定結果である。図6 は、LAN 内の計算機の利用者が少なく、ユーザプロセスもごく少数である状態で測定を行った。この状態はネットワークの輻輳が少ないためと考えられる。従って、輻輳による遅延が少なく、送信時の遅延と受信時の遅延がほぼ同一となることが多いと考えられる。そのため、RTT,STS 各々による測定結果が一致する箇所が多い。

図7 は、LAN 内の計算機の利用者が多く、ユーザプロセスも多数実行されている状態で測定を行った。この状態は、ネットワークの輻輳が多いと考えられる。従って、輻輳による遅延が多く、送信時の遅延と受信

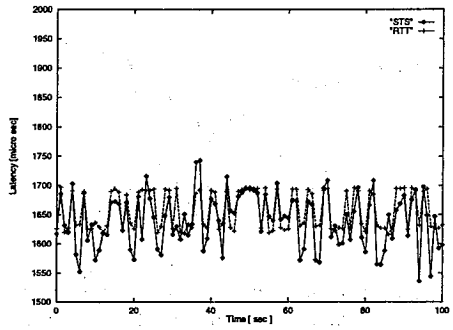


図6　送受信経路が同一のLAN上での測定(状態1)

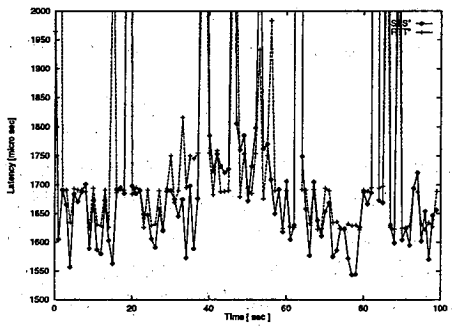


図7　送受信経路が同一のLAN上での測定(状態2)

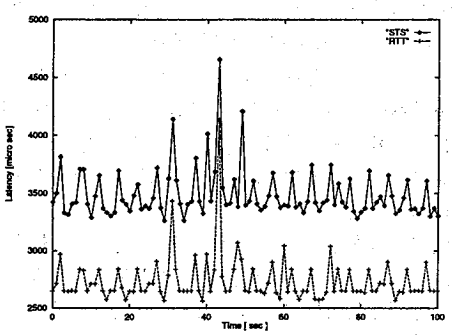


図8　送受信経路が異なるLAN上での測定(状態1)

時の遅延が異なることが多いと考えられる。このため、RTT、STS各々による測定結果が一致しない箇所が多い。

これらの結果から次のように考えられる。ネットワークの輻輳が少ないときはRTTでも高い精度で通信遅延の測定が可能であるが、ネットワークの輻輳が多いとき測定精度が低下する。それに対し、提案するSTSでは、ネットワークの輻輳にかかわらず、同一の精度で測定が可能であることから、RTTよりも提案したSTSの方が厳密な測定に場合有効である。

次に送受信経路の異なる環境での測定結果を図8に示す。同図ではRTTでの測定結果がSTSでの測定結果に比べ小さくなっている。図5に示したように、送信側(Node A)から受信側(Node B)への通信経路上に仮想ネットワーク(Node C)が存在し、通信遅延が受信側(Node B)から送信側(Node B)への通信遅延に比べ大きい。従って、送信から応答の受信までにかかる時間の1/2で遅延を算出するRTTでは、送信時の遅延と受信時の遅延の平均として通信遅延が求められるため、送信側から受信側までの通信遅延を測定したSTSに比べ小さくなる。

以上の結果より、送信側から受信側までの片道の通信遅延時間の測定には提案した時刻同期を利用した通信遅延測定法STSが有効であると言える。

5. 高精度時刻同期の応用

本論文では、GPSによる$1\mu s$を越える高精度な時刻同期の応用の一つとして通信遅延測定を行った。高精度な時刻同期の応用として、実時間的競合性を持つ要求に対する調停を必要とするシステムに対して有効であると考えられる。例えば、分散システムにおけるトランザクションの並行性制御、相互排他制御などは、トランザクションの発生とファイルへのアクセスが実時間的な競合性を持っているため制御が必要であり、その制御への応用が期待できる。

トランザクションの並行性制御には大別してロッキング方式とタイムスタンプ方式がある。ロッキング方式では、あるトランザクションが使用するファイルを使用中はロックし、ロックしたトランザクションが終了したのち、そのロックを解除するのが一般的な動作である。それに対し、タイムスタンプ方式はトランザクションは楽観的実行を行い、トランザクションの優先順位(タイムスタンプの大小)によりコミットもしくはアボートを行うことで制御する[4]。

ロッキング方式では、ノード間の通信遅延が大きい場合、実際にはトランザクションの処理が終了していても、ロックを解除する通信が到達するまではファイルに対するロックがかかっている。各ノードが高精度に同期した時刻を持っているならば、ロックの有効時間を指定することでロック解除の通信を省略する楽観的実行をする方法が考えられる。これにより並行性制御のパフォーマンス改善が期待できる。

また、分散マルチメディア同期への応用も考えられる。マルチメディアシステムでは、メディア間同期に同期プリミティブを利用している。分散システムなどで通信を伴う場合、オーバーヘッドや遅延が問題とな

る。同期をとるべきメディアを処理するノード間が実時間同期され、メディアデータ内に同期に必要な時刻情報含めることで、同期プリミティブを利用せずに実時間をもとにメディア間の同期をとることが可能である[5]。

これらの応用に対して、本論文で示した片道通信遅延が正確に測定できるツールが利用可能であると考えている。

6. ま と め

GPS を用いた高精度時刻同期を応用した通信遅延測定法による通信遅延測定ツールを開発し、従来の測定法として RTT による測定結果と比較した。

その結果、送信側から受信側までの片道の通信遅延時間の測定において、送受信経路が同一である環境において、ネットワークの輻輳が大きい場合に有効であり、また送受信経路が異なる環境においては RTT では測定不可能な片道の通信遅延が測定可能であることを示した。

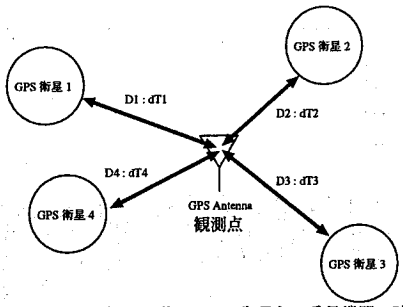
最後に高精度時刻同期の応用について検討した。

参 考 文 献

1) 山下高生, 小野諭: ISDN を用いた高精度時計同期方法, 信学論, vol. J81-D-I, no. 4, pp. 377–385 (1998).
2) Liskov,B.: Practical Uses of Synchronized Clocks in Distributed System, Proc. of the 10th Annual ACM Symp. on Principles of Distributed Computing, pp. 1–9 (1991).
3) Datum Inc. Bancomm Division.: bc637S SBus GPS Satellite Receiver System User's Manual, San Jose (1995).
4) A.S. タネンバウム著, 水野, 鈴木他訳: 分散オペレーティングシステム, プレンティスホール (1996).
5) 大澤 範高: 高精度時刻同期の応用, 研究室メモ epi-research-95-045, 電気通信大学 (1996).
6) 土屋 淳, 辻 宏道: GPS 測量の基礎, 社団法人 日本測量協会 (1995).

付録 GPS による精密時刻の取得

GPS は 24 個の衛星からなるスペース・セグメント、地上で衛星の運用管理を行うコントロール・セグメント、利用者のユーザ・セグメントの 3 セグメントで構成される。ユーザ数の制限なしで、全世界、全天候、24 時間無料で位置と時刻のサービスを提供している。サービスには民間用 (SPS:Standard Positioning Service) と軍用 (PPS:Precise Positioning Service) の 2 種類あり、民間用サービスの測位精度は±100m 以内で、



- 現在位置が既知の 4 基の GPS 衛星と、受信機間の時刻差から 4 つの衛星－受信機間距離を算出し、受信機の現在位置を算出する。
  距離 D ＝「時刻差 dT」×「光速 C」
- 時刻を厳密にするために、GPS 衛星内にはセシウム 1 次周波数標準器が搭載され、それを源振に電波は発射
- GPS 電波の航法メッセージを基準に高精度な時刻取得が可能

図 9　GPS による測位原理

軍用は±10m 以内での利用が可能である。軍用サービスは専用受信機が必要であり、一般には利用できない。また、民間用サービスもシステム的には±30m 以内の精度がある。しかし、選択利用性 (S/A:Selective Availability) と言われる故意の精度劣化政策を米国が採っているため、一般利用の測位精度は±100m 以内となっている。

図 9 に示す方法により前述の精度で測位を実現する。GPS では衛星内の時計の時刻と利用者の持つ受信機内の時計の時刻の差から、衛星－受信機間の電波伝搬距離を求める。それを 4 個以上の衛星に対し同時に行い、利用者の緯度、経度、高度を決定する。

この測位方法では、衛星内と利用者の受信機の時刻が正確に一致していることが条件である。しかし、受信機側にも衛星と同様なセシウム原子時計を備える訳にはいかない。従って受信機はまず最初に捕捉した衛星の時刻を受信地点での時刻する。他の衛星からの電波を受信することによって算出される複数の伝搬距離を求める。その値から共通に含まれる受信地点での時刻誤差を差し引き、正確な伝搬距離及び受信地点での時刻を決定する。

この方法により、利用者が持つ受信機の時計は、最低 4 つ以上の衛星を捕捉していれば、それほど精密な基準発振源を持たずに、衛星内の時刻に同期できる。衛星内にはセシウム原子発振器が搭載されており、その安定した周波数により高精度の時刻が生成されている。その周波数及び時刻は地上のコントロール・セグメントにより米国海軍天文台が維持管理する UTC を基準に常時校正されている[6]。