

GNSS の基本知識

Version 1.0



測位衛星技術株式会社

2016 年 7 月 29 日

改訂履歴

日付	Version	ページ	改定内容	著者
2016/7/29	1.0	n/a	初版発行	吉田 直子

目次

1	はじめに	6
2	GNSS の基礎情報	7
2.1	衛星測位システム	7
2.2	GPS	8
2.3	GLONASS	10
2.4	Galileo	12
2.5	BeiDou	14
2.6	QZSS	14
2.7	各衛星システムの信号と周波数帯域	15
3	衛星測位の基本	17
4	主な誤差要因	19
4.1	衛星軌道	19
4.2	衛星クロック	21
4.3	電離層遅延	21
4.4	対流圏遅延	22
4.5	受信機	23
4.6	マルチパス	23
5	さまざまな測位方式	24
5.1	単独測位	24
5.2	相対測位	24
5.2.1	DGPS	24
5.2.2	干渉測位	30
5.2.1	スタティック測位	31
5.2.2	RTK	32
5.2.3	VRS	33
5.3	高精度単独測位	34
5.3.1	PPP	34
5.3.2	PPP-AR	35
5.3.3	PPP-RTK	36

6	受信機の基本技術	38
6.1	マルチパス緩和技術	38
7	アンテナの基本技術	41
7.1	帯域外干渉の緩和	43
8	参考文献	44

図表目次

図 - 1: GNSS の現状.....	7
図 - 2: 3 つの構成要素	8
図 - 3: GPS 衛星の外観図(出典:公式ホームページ)	9
図 - 4: GLONASS 衛星の外観図(出典:GLONASS 公式ホームページ)	11
図 - 5: Galileo 衛星の外観図(出典: ESA 公式ホームページ)	13
図 - 6: 準天頂衛星の軌道(出典: JAXA ホームページ)	15
図 - 7: 衛星測位システムと信号(出典: 内閣府ホームページ)	16
図 - 8: GNSS の主な測位方式と誤差要因	17
図 - 9: 単独測位	18
図 - 10: GPS 信号	20
図 - 11: 衛星軌道と電離層、対流圏	22
図 - 12: マルチパス	23
図 - 13: 海上ビーコン	25
図 - 14: 航空用 SBAS	27
図 - 15: ローカル設置の DGPS	27
図 - 16: RTCM のヘッダ部分とデータ部分	29
図 - 17: 干渉測位	30
図 - 18 RTK	32
図 - 19: VRS	33
図 - 20 PPP (StarFire の場合)	34
図 - 21: テラスター社の観測局網	35
図 - 22: PPP と RTK の融合	36
図 - 23: 一般的な受信機内部の信号処理	38
図 - 24: マルチパス緩和	39
図 - 25: APME	40
表 - 1: GPS の概要	10
表 - 2: GLONASS の概要	12
表 - 3: Galileo の概要	14
表 - 4: 主な誤差要因	19

1 はじめに

GNSS (Global Navigation Satellite System) とは、米国の GPS、ロシアの GLONASS、欧州の Galileo、中国の BeiDou、日本の QZSS、インドの Gagan など、それぞれの国や地域が構築している測位衛星とそれらを補完する静止衛星システムの総称です。本書は、測位衛星技術株式会社のホームページに掲載している内容をベースに、より総括的に、GNSS の基礎知識を 1 冊のドキュメントにまとめたものです。

本所では、まず、GNSS の基本知識について、簡単に解説した後に、衛星測位の基本と、さまざまな誤差要因、さまざまな測位方式を簡単に解説し、さらに受信機の基本技術に触れた上で、代表的な、測位精度への影響要因について解説します。

2 GNSS の基礎情報

2.1 衛星測位システム

「GPS (Global Positioning System: 汎地球測位システム)」は、カーナビ、スマートフォンだけでなくカメラや時計をはじめとしたさまざまな製品に搭載され、とてもなじみ深い言葉になっています。一方で、米国の GPS のみならず、ロシアの GLONASS、欧州の Galileo、中国の BeiDou の 4 つのグローバル軌道衛星群と、日本の準天頂衛星の QZSS、インドの IRNSS の特定地域衛星群に加えて米国、欧州、日本が持つ補強衛星群 (SBAS) を含めた測位衛星の総称である GNSS については、まだまだ一般的な言葉として浸透していない状況だと言えます。



図 - 1: GNSS の現状

「図 - 1: GNSS の現状」の中にある国と地域の旗と、システム名称の下にある括弧の中の数字は、計画衛星数です。またその下には、各衛星が放送している信号を記載しています。補強衛星群 (SBAS) は、測位精度を向上するための情報を放送していますが、その情報は後に解説する広域 DGPS で利用されています。SBAS は、米国の WAAS、欧州の EGNOS、日本の MSAS、インドの GAGAN で構成され、各地域に向けて同一の形式で補正信号を放送しています。ですから、現在では、GPS と呼ばれていても、幅広い製品に GPS 以外の衛星にも対応した GNSS 機能が搭載されており、今や、GNSS の時代が到来していると言えき現状にあります。

1970 年代に米国において主に軍事目的で開発がスタートした GPS の衛星測位システムは、当初、航空機や船舶のナビゲーションに利用されていました。その後、技術の進展とともに徐々に用途が広がっていき、カーナビはもとより、高精度が求められる測量や土木建設、農業、地殻変動研究、地震予知といった幅広い分野で、位置情報を提供する手段として利用されるようになってきました。

それ以外の分野でも、一般には知られていませんが、携帯電話網を始めとした通信ネットワークの周波数制御や、電力ネットワークの電力制御、測定機器の周波数校正などの時刻同期用のシステムとしても、日常的に利用されています。そして、多くの製品が現在、GNSS 対応を行っています。

それでは、GNSS の代表格である米国の GPS、次いで普及が進んでいるロシアの GLONASS に続き、欧州の Galileo、今後が期待される中国の BeiDou、日本の QZSS について、順を追って解説していきます。

2.2 GPS

米国における GPS の開発は 1970 年代に遡ります。GPS は、測位用の信号を送信する衛星(宇宙部分)と、衛星を地上から運用管理する管制局(地上部分)、利用者側で測位用信号を受信して測位計算を行う受信機(利用者)の 3 つの部分で構成されています。また、GNSS の他のすべての衛星システムも同様に、これらの 3 つの部分で構成されています。(図 - 2: 3 つの構成要素)

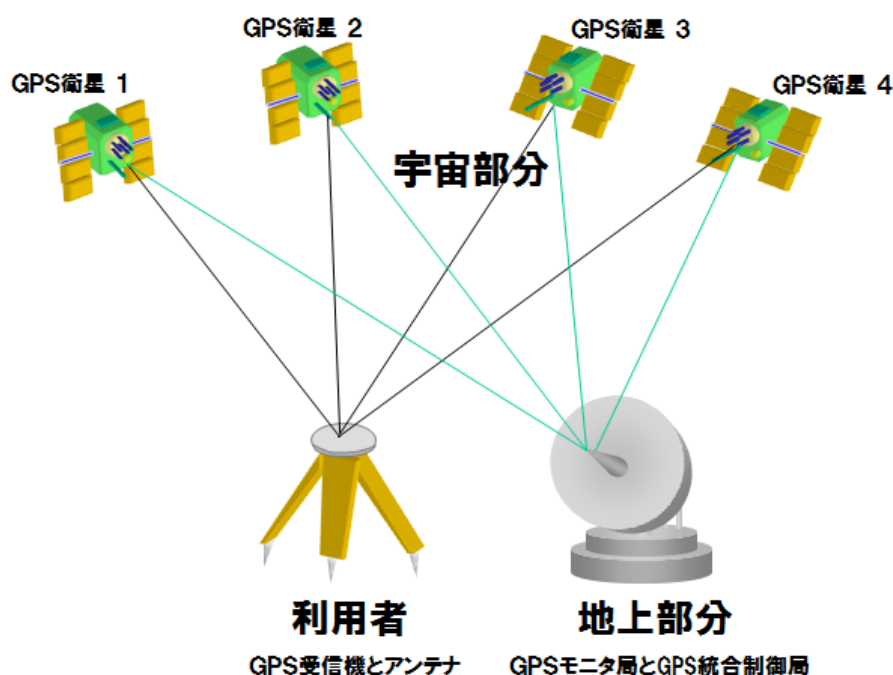


図 - 2: 3 つの構成要素

陸海空軍において別々に計画されていた衛星測位システムを統合する形で、1973 年に米国国防総省により開発が開始されて、実験機として打ち上げられたのが最初の GPS 衛星である Block I 衛星です。その後、合計 11 機の Block I 衛星が打ち上げられ(うち 1 機は打ち上げ失敗)、1989 年には初の実用機である Block II 衛星の打ち上げに成功しました。(図 - 3: GPS 衛星の外観図(出典:公式ホームページ))その後、1993 年 12 月には 24 機の衛星軌道配置のもと、米国国防総省による IOC (Initial Operational Capability) 宣言が発表されて、正式に運用が開始されることとなりました。さらに 1995 年 7 月には 24 機の Block II 衛星の完全運用をもって FOC (Full

Operational Capability) 宣言が発表されています。2015 年 10 月 5 日現在、実際に運用されている GPS 衛星の数は 32 機です。最新の GPS 衛星の状況は、米国沿岸警備隊のホームページ (<http://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>) などで確認することが可能です。

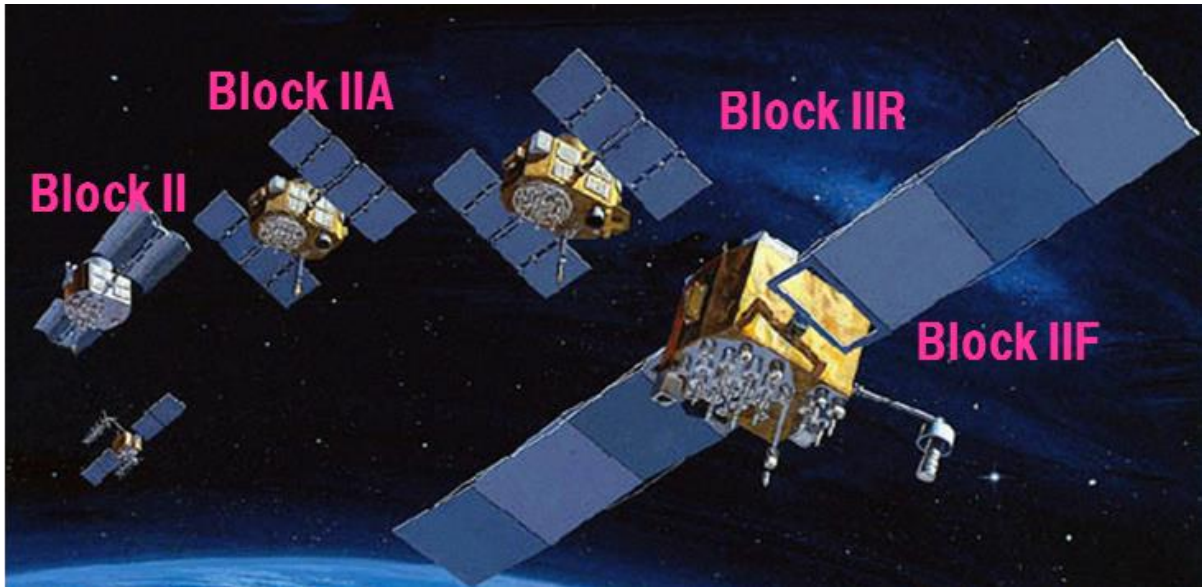


図 - 3: GPS 衛星の外観図(出典:公式ホームページ)

GPS は今日、軍事と民生用の 2 つの異なる枠組みでサービスを提供しています。民生用で一般に利用されているのは SPS(Standard Positioning Service)と呼ばれる サービスで、GPS 衛星から送信される 1575.42MHz 帯の L1 信号と 1176.45MHz 帯の L2 信号と呼ばれる 2 種類の測位用信号のうち基本的に L1 信号のみが利用可能でした。

90 年代までは、SA(Selective Availability)と呼ばれる精度劣化政策が敷かれていました。これにより、衛星の軌道情報と L1 帯 C/A コードのタイミングに意図的に誤差を与えることで、単独測位方式での精度が水平成分で 100m(95%)に抑えられていました。その後、SA は解除されましたが、L2 信号では、暗号化がされた P (Y)コードが使用されており、民生用途では完全にはコード測位ができない状態のままです。軍事用の PPS(Precise Positioning Service)と呼ばれるサービスで、L1 信号と L2 信号の両方が利用できるのは、米国当局から認可されている軍事関係機関のみです。軍事用では、P (Y)コードを利用することで単独測位により数 10cm 精度の測位が可能です。PPS に対応した受信機は SAASM 対応受信機と呼ばれています。

その後、2009 年に打ち上げられたブロック IIR-20M 衛星により、L5 信号の試験が開始されました。2010 年以降のブロック II F 衛星の打ち上げで本格的な運用が始まったこの信号は、L1 信号や L2 信号に比較して 10 倍のバンド幅で 3dB(2 倍)の尖頭電波強度で、10 倍の長さの拡散コードを使っています。L1 信号、L2C 信号に続く 3 番目の民生用信号として、L5 信号では、従来よりも高精度の位置測定が可能になっています。

しかし、コードに完全に依存することなく搬送波(キャリア)も利用する DGPS (Differential GPS)や RTK (Real Time Kinematic)と呼ばれる相対測位方式を利用することにより、民生用でも 1m～

1cm 精度の測位が実現可能となっています。各受信機メーカーがそれぞれ独自に開発している L2 信号の搬送波再生技術では、L2 信号のコード測位を完全には行わずに、搬送波で測位を行います。市販されている、L1 信号と L2 信号の両方を利用する 2 波の GPS 受信機はこの技術を利用しています。そして、長基線で相対測位を行う精密測量の分野においては cm 精度を達成するために不可欠な技術となっています。単独測位、相対測位、基線長といった聞きなれない言葉がでてきましたが、これらについては、追って詳しく解説をします。GPS 衛星の概要は、「表 - 1: GPS の概要」の通りです。

衛星数	24 衛星
軌道高度	20,180km
周波数	L1 (1575.42MHz) L2 (1227.60MHz) L3 (1381.05MHz) L4 (1379.913MHz) L5 (1176.45MHz)
軌道傾斜角	55°
周期	11 時間 58 分
多重方式	CDMA
時刻基準	UTC
測地系	WGS84

表 - 1: GPS の概要

2.3 GLONASS

現在では、GPS のみの利用は稀であり、ハイブリッド型の受信機や、製品へのハイブリッド型受信チップの搭載により、ロシアの GLONASS の利用が、かなり普及してきています。(図 - 4: GLONASS 衛星の外観図(出典:GLONASS 公式ホームページ))



図 - 4: GLONASS 衛星の外観図(出典:GLONASS 公式ホームページ)

GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System)は、旧ソ連が開発し、現在ロシアにより管理・運用されている GPS と同様の衛星測位システムです。衛星軌道、使用周波数(衛星ごとに異なります)、信号形式などに違いがあるものの、測位原理などの本質的な部分では GPS と共通項が多く、また同等の精度をユーザーに対して提供する衛星測位システムとして設計されています。最初の試験衛星が打ち上げられたのは 1982 年 10 月で、以後 GPS と競争する形で打ち上げ実験と衛星の改良などが繰り返し行われ、旧ソ連の崩壊後、ロシアが計画を引き継ぎ研究開発してきました。

1996 年 1 月に合計 24 機の衛星により構成されたシステムが完成し、実用段階へ入りましたが、衛星の設計寿命が GPS Block II 衛星の 5 年と比較して 3~5 年程度と短く、また 1996 年以降、1998 年 12 月まで新規衛星が全く打ち上げられなかったため衛星数は徐々に減少していきました。その後、ロシア経済の回復とともに徐々に衛星数が増え、2015 年 10 月現在では、23 機の衛星で運用しています。最新の GLONASS 稼動情報はロシア政府による GLONASS 公式ホームページ(<https://www.glonass-iac.ru/en/>)で確認することが可能です。

GLONASS では、当初、GPS で採用されている CDMA(符号分割多元接続)ではなく、FDMA(周波数分割多元接続)を採用していました。CDMA では、同一の周波数帯にあらかじめ分割されたすべてのデジタル信号が多重化されて送信されます。一方、FDMA では、異なる周波数帯域にデジタル信号が分割して送信されます。1 つの周波数で発生する電波遅延には、1 つの値しかありませんが、複数の異なる周波数では、電波遅延が周波数ごとに異なるため、搬送波の位相を使った干渉測位では、GPS と GLONASS では異なるアプローチで測位解を求める必要があります。

そして、これに対して各受信機メーカーは、それぞれ独自のアプローチをとっています。これにより受信機の利用者にとって、FDMA で送信される信号の搬送波測位において、異機種間の互換性の点で問題が生じていました。その後、2006 年 12 月にモスクワで開かれた GPS-GLONASS 相互運用性・互換性ワーキンググループの会合を受けて、GLONASS も GPS と同じ CDMA へと移行していくことが発表されています。搬送波測位や電離層や対流圏で発生する電波遅延については追って詳しく解説をします。GLONASS 衛星の概要は、「表 - 2: GLONASS の概要」の通りです。

衛星数	24 衛星
軌道高度	19,140km
周波数	L1 (1598.0625~1605.375MHz±0.511MHz) L2 (1242.9375~1248.625MHz±0.511MHz) L3 (1201MHz)
軌道傾斜角	64.8°
周期	11 時間 15 分
多重方式	FDMA (一部 CDMA)
時刻基準	GLO (=UTC)
測地系	PZ-90.11

表 - 2: GLONASS の概要

2.4 Galileo

EU が欧州主導による独自の次世代衛星測位システムの構築を目的とした「Galileo」計画を発表したのは、1999 年 3 月のことです。GPS、GLONASS に続く第 3 の衛星測位システムとして Galileo は、GPS や GLONASS との協調性を視野に入れながら、GPS、GLONASS とは独立して運用される独自の衛星測位システムとして構築が進んでいます。

当初、欧州では民生用の衛星航法システムの実現を目的とした GNSS-1 という構想に基づいて、静止衛星により衛星測位システムを補強する、EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) の構築を進めていました。その後、Galileo は、補強だけでなく単独で測位が可能な次世代衛星航法システムである GNSS-2 として、GNSS-1 を統合する形で位置付けが変更されています。Galileo は、2015 年 10 月現在で、8 機が稼働中です(表 - 3: Galileo の概要)。

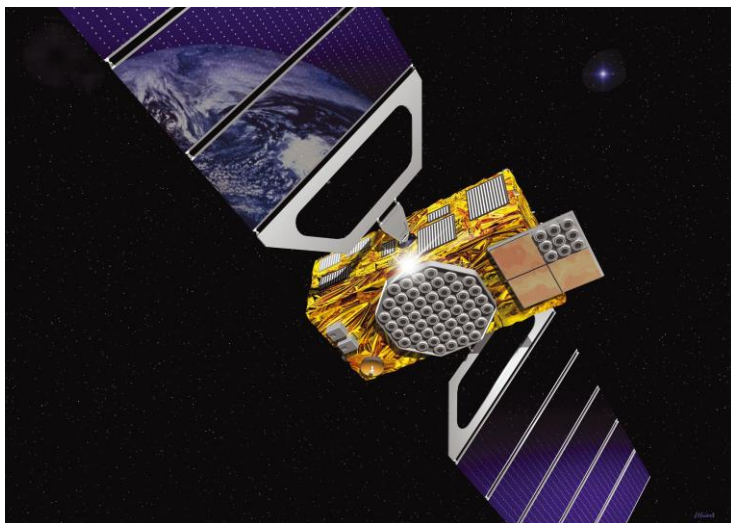


図 - 5: Galileo 衛星の外観図(出典: ESA 公式ホームページ)

EU と ESA (欧州宇宙機関) が共同で計画全体を主導している Galileo の基本的な構想は、GPS や GLONASS と同様な全世界を対象とした測位サービスの提供です。一般ユーザー向けに提供される OAS (Open Access Service) と政府機関などの限定されたユーザーを対象とした CAS (Controlled Access Service) という 2 種類のサービス体系を通じて、95% の確率で 10m 程度を実現する測位精度を実現しています。GPS や GLONASS、QZSS の L1 信号と同一帯域である、E1 信号と、GPS の L5 信号と同一帯域である、1176.45MHz および、独自の帯域である、1207. MHz を利用する E5 信号に加えて、独自の帯域である、1278.750MHz を利用する、E6 信号がある。最新の Galileo の情報については、欧州連合による Galileo 公式ホームページ (<http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/>) や、(ESA) 公式ホームページ (<https://www.glonass-iac.ru/en/>) で確認することが可能です。

衛星数	30 衛星
軌道高度	23,222km
周波数	E1 (1575.42MHz) E5 (1176.45MHz および 1207.MHz) E6 (1278.750MHz)
軌道傾斜角	56°
周期	14 時間 22 分
多重方式	CDMA
時刻基準	NAGU (=UTC)
測地系	GTRF

表 - 3: Galileo の概要

2.5 BeiDou

2012 年 12 月 27 日にアジア太平洋地域で運用が開始された BeiDou(北斗)システムは、3 つの衛星軌道システムにより構成され合計 14 衛星が運用されています。静止衛星 5 機で構成された GEO は、中国付近の赤道上に軌道を置き、5 機の傾斜軌道衛星で構成された IGSO は、地域衛星として中国上空を 8 の字に周回している一方で、4 機の中軌道衛星で構成された MEO は、全地球上を周回しています。さらに、2020 年までに第 3 段階として、MEO と IGSO システムが合計 30 機に拡張されて、合計 35 機で運用される計画となっています。最新の BeiDou 稼動情報は中国政府による BeiDou 公式ホームページ (<http://en.beidou.gov.cn/>) で確認することが可能です。

BeiDou では、第 2 段階と第 3 段階で異なる周波数帯域で、モジュレーション方式などが若干異なる信号を放送しています。大きく分類すると、B1 信号、B2 信号、B3 信号の 3 種類があります。B1 信号は、独自の帯域である 1561.098MHz に加えて、GPS や GLONASS、QZSS の L1 信号や、Galileo の E1 信号と同一帯域の 1575.42Hz を利用しています。B2 信号は、GPS の L5 信号と同一帯域の 1176.45MHz と、Galileo の E5 信号と同一帯域の 1176.45MHz および 1207.MHz を利用しています。そして、B3 信号は、独自の帯域である 1268.52MHz を利用しています。

2.6 QZSS

準天頂衛星システムは、2010 年 9 月 11 日に種子島宇宙センターから打ち上げた準天頂衛星初号機「みちびき」によって開始された、日本独自の測位衛星システムです。補強信号の送信などを行うことで、これまで数 10m 程度の誤差だった GPS に比較して、より高精度な、1m 程度、さらには cm 級へ測位精度の向上を目指しています。準天頂衛星は、日本上空で仰角 60°~90°という高い位置が可視範囲となるように、南北非対称の「8 の字軌道」で航行しています。(図 - 5: 準天頂衛星の軌道) 北半球に約 13 時間、南半球に約 11 時間留まり、日本付近に長く留まります。現

在は、1 機のみが運用されていますので、利用可能時間が限られていますが、今後、さらに 2 機が打ち上げられ、日本から 24 時間利用できるようになる予定です。

他の測位衛星システムとの違いは、ビルの谷間や林間でも受信しやすいように、高い仰角で航行する「8 の字軌道」ではありません。GPS と同一の信号である、L1C や、L2、L5 も送信しつつ、Galileo と同一周波数の 1278.75MHz で、独自の信号である L6 (LEX) 信号で補強信号も送信することで高い測位精度を実現可能としています。一般的に受信機が測位可能な衛星の数が多ければ多いほど、高い精度と安定性を実現可能ですが、準天頂衛星システムを GPS と一体で利用することで、測定誤差の低減が可能となっています。(図 - 7: 衛星測位システムと信号 (出典: 内閣府ホームページ)) また、屋内でもシームレスに測位が行えるように、IMES システムを全体システムの一環として法制化し、土地の登記などで利用されている国土地理院の管理の下で、正式に屋内測位結果を場所コードとして運用する方向性が検討されている点も、他の国や地域の衛星測位システムと大きく異なっています。

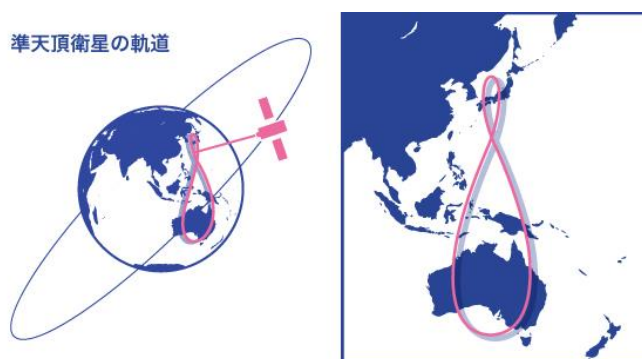


図 - 6: 準天頂衛星の軌道 (出典: JAXA ホームページ)

2.7 各衛星システムの信号と周波数帯域

ここまで、各国や地域のグローバル軌道衛星群と日本の地域特定衛星群について簡単に解説しましたが、インドにおける地域特定衛星群である IRNSS を加えると、各衛星システムの信号と周波数帯域は、「図 - 7: 衛星測位システムと信号 (出典: 内閣府ホームページ)」の通りとなります。昨今では、受信機のマルチ衛星システム、マルチ信号対応、マルチチャンネル化が進展しており、これらの複数衛星システムと、複数信号を有効に活用することで、測位精度を向上させることが可能となっています。まさに、GNSS の時代が到来しているのです。

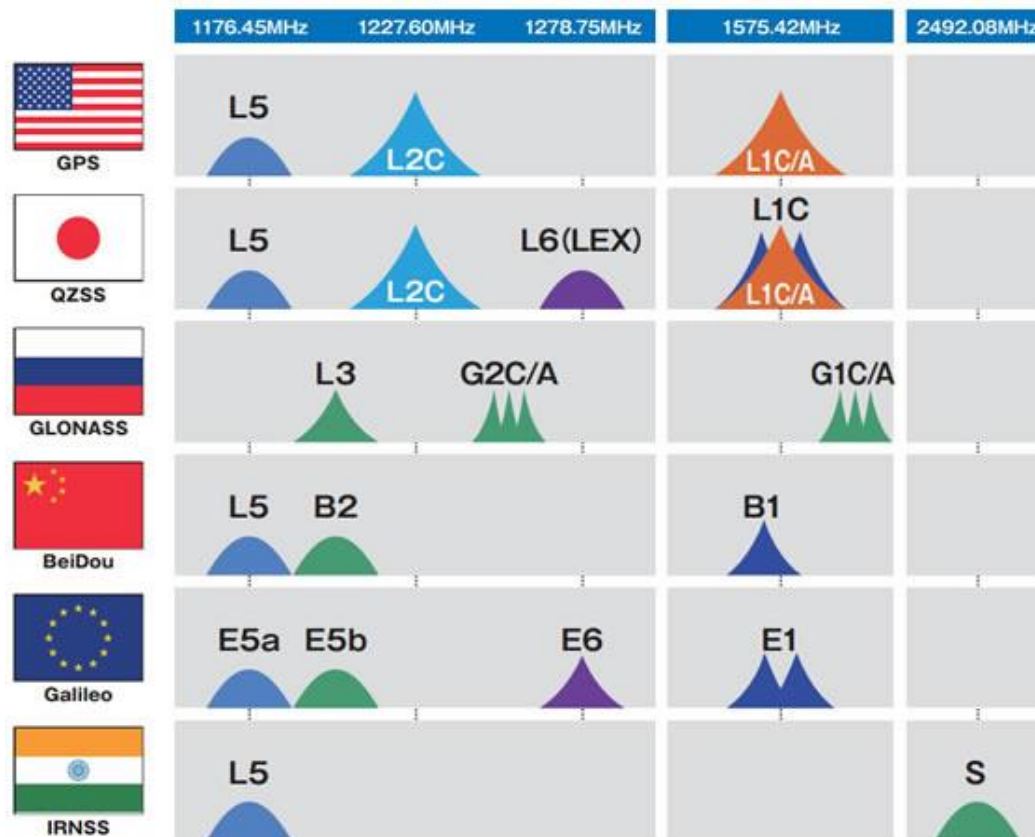


図 - 7: 衛星測位システムと信号 (出典: 内閣府ホームページ)

3 衛星測位の基本

現在までに、さまざまな測位方式が開発されてきました。「図 - 8: GNSS の主な測位方式と誤差要因」にあるように、1 台の受信機で行う 10~20m の精度の単独測位にはじまり、精度を高めるために複数の受信機の受信情報を利用する相対測位において、幅広い用途に向けてそれぞれの用途に適した技術が開発されてきています。測位方式によって精度が異なるのは、主な誤差要因である衛星軌道、衛星クロック、電離層遅延、対流圏遅延、受信機内部の誤差、マルチパスによる誤差への対処方法が、それぞれ異なっていることに起因しています。それでは、まず衛星測位の基本である、単独測位について、簡単に解説します。

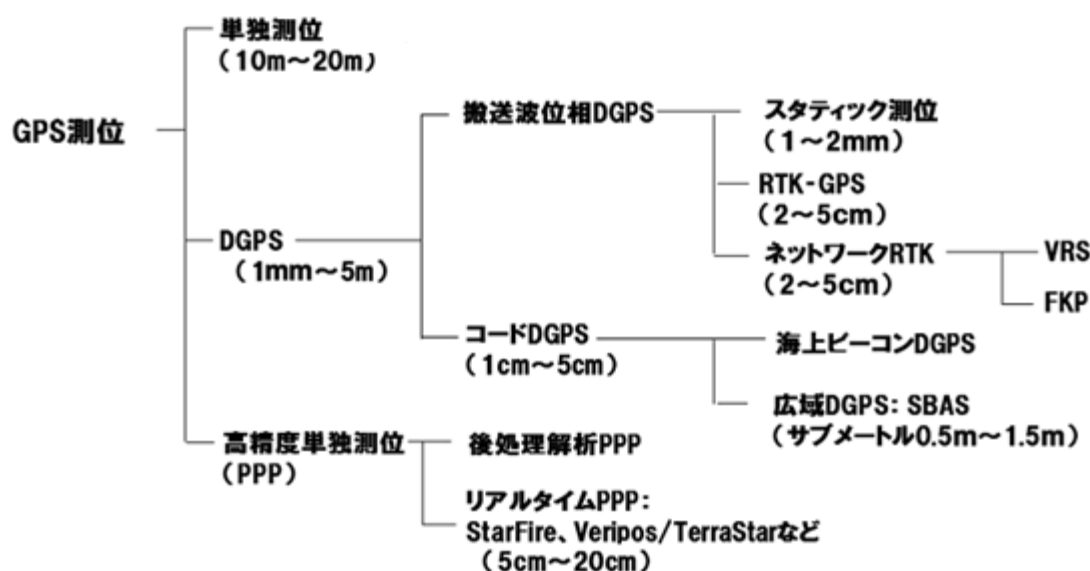


図 - 8: GNSS の主な測位方式と誤差要因

単独測位では、最低でも 4 機の衛星から信号を受信する必要があります。ここで、同一帯域にある L1 信号などの同一の種類 of 信号の衛星からは、同一の長さのコードが繰り返し放送されています。単独測位では、信号が衛星から出発して受信機に到達するまでの時間差を、繰り返されているコードの中のどの部分を受信しているか検知することで、スードレンジ(GPS からの疑似距離)を求めます。そして、4 つの未知数である、 x 、 y 、 z の 3 次元座標と、 t であらわされる受信機の時計誤差を方程式で解くことで、同距離線の交点を求めます(図 - 9: 単独測位)。

コード測位による単独測位で、10~20m の測位精度が限界となっている理由のひとつは、上記の時計誤差と、主な誤差要因のひとつである、GPS 信号の中に含まれているナビゲーションメッセージにある大まかな衛星軌道についてのみ、誤差要因への対応が行われている点にあります。コード測位と搬送波測位の差については、後ほど説明しますが、もともと GPS は、コード測位のみを行

うことを目的として開発され、運用開始後に、他の誤差要因へ対応する新たな測位方式が確立され、測位精度が向上してきた歴史的背景があります。

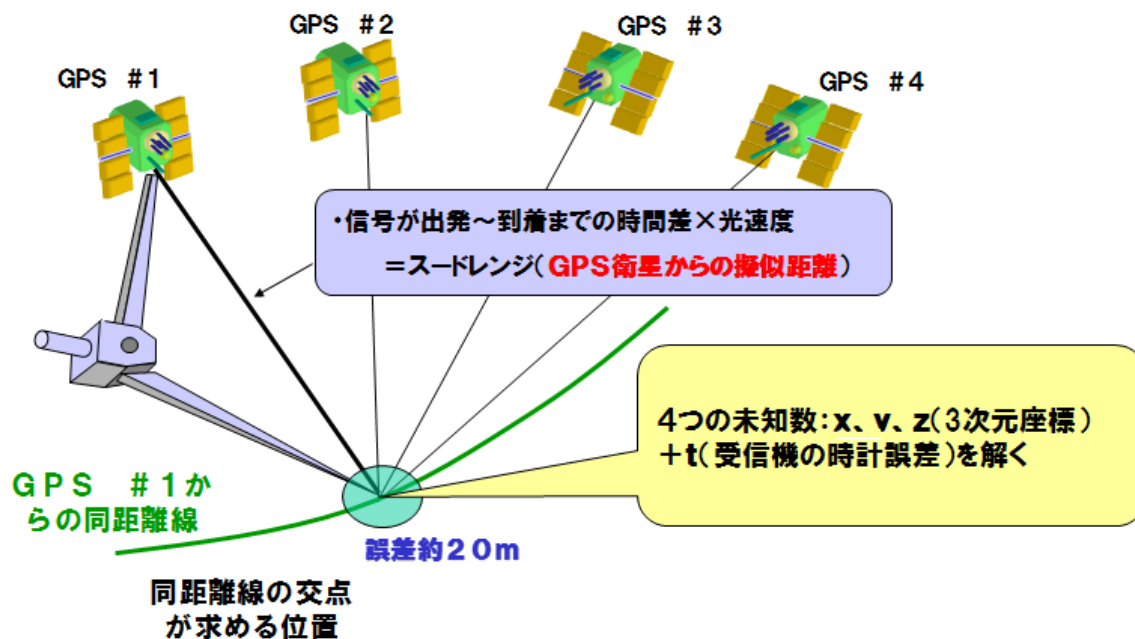


図 - 9: 単独測位

4 主な誤差要因

それでは、他の測位方式の解説をする前に、さまざまな測位方式が生まれた理由を理解する上で重要となる誤差要因について簡単に解説を行います。ここでは、一般的に、衛星測位の基本である、コード単独測位で主な誤差要因(表 - 4: 主な誤差要因)となっている、衛星軌道、衛星クロック、電離層遅延、対流圏遅延、受信機と、マルチパスについて簡単に説明します。

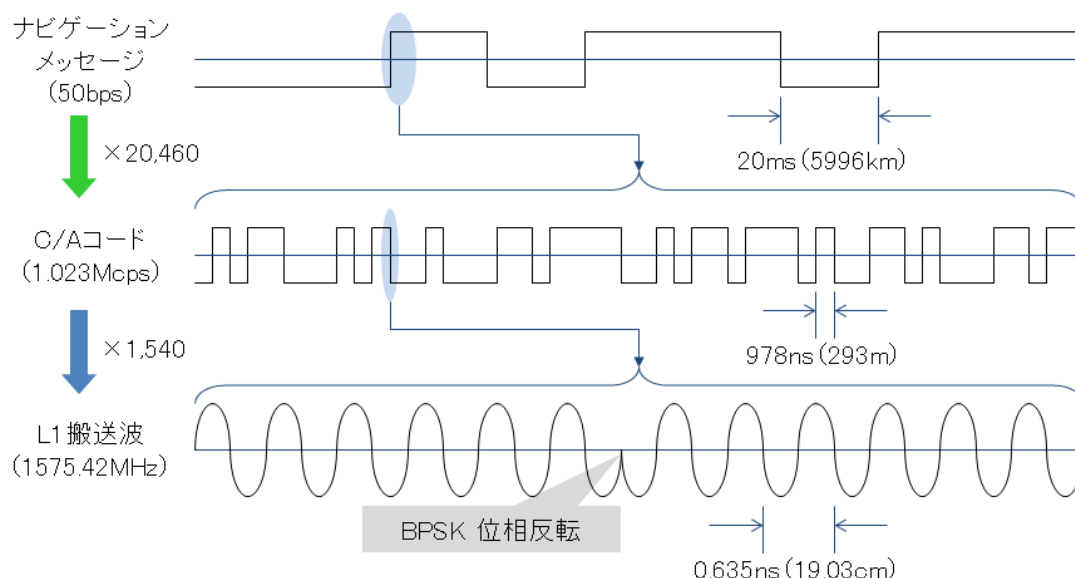
誤差要因	誤差量
衛星軌道	最大で約 10m
衛星クロック	最大で約 3m
電離層遅延	最大で約 10m
対流圏遅延	最大で約 0.5m
受信機	最大で約 0.5m
マルチパス	約 1~10m

表 - 4: 主な誤差要因

これ以外の誤差要因や測位精度への影響要因は、後ほど詳しく説明することとします。

4.1 衛星軌道

衛星信号は、BSPK で変調されて、搬送波に乗せられて衛星から放送されています。「図 - 10: GPS 信号」の通り、GPS L1 信号には、50bps のナビゲーションメッセージと、1.0Mcps の C/A コードが含まれています。C/A コードは、受信機内で生成した搬送波と同一の周波数の信号を利用し復調されます。衛星は絶えず動いているため、ドップラーシフトが生じているので、ドップラ周波数を検出しながら、コード位相を出力します。ここまでが信号の捕捉です。



GPS L1 信号波 = ナビゲーションメッセージ(±1) × C/Aコード(±1) × 搬送波

図 - 10: GPS 信号

信号を捕捉した後に行われる処理は、信号追尾です。各衛星からの C/A コードには、衛星により異なる PRN コードが含まれています。これを、受信機内部にあるコードレプリカと照合することで、どの衛星から送信された信号なのか特定します。1,023Mcps(1,023ビット)長の 0 と 1 からなる、C/A コードは、1 ミリ秒ごとに繰り返し放送されています。受信機は、捕捉した C/A コードと、受信機内部にあるコードレプリカの位相を 1 チップずつずらしながら照合する、相互相関処理によって SV 番号 (Space Vehicle Number: 各衛星固有の番号) を判別します。

その後、50bps で送信されている、各衛星固有のナビゲーションメッセージデータとの間でビット反転位置を検出してナビゲーションメッセージを復調します。これにより、衛星クロックの補正データ、健康状態、エフェメリスデータ(衛星の軌道データ)、アルマナックデータ(衛星の軌道歴)を得ます。ここまでの信号の追尾です。

次に、演算部において、PVT(位置、速度、時刻)の推定を行います。エフェメリスパラメータ、衛星クロックの補正データ、アルマナックを使用して、スードレンジを求めることで、測位計算を行ないます。通常、ナビゲーションメッセージ上で、衛星の位置情報が含まれているエフェメリスパラメータは、2 時間に 1 回、軌道歴であるアルマナックデータは、6 日に 1 回、更新されています。

軌道を推定するために必要となるエフェメリスパラメータと衛星のクロックは、GPS のモニタリング局で観測されたデータに基づいて衛星から放送されています。しかし、これらの現在値は、カルマンフィルタによる推定値です。エフェメリスパラメータが更新されるタイミングまでの間に動いてしまう衛星位置の推定には、受信機側でも、カルマンフィルタが利用されています。これらの要因により、「表 - 4: 主な誤差要因」に示す通り、数メートルから約 10m の誤差が生じています。

4.2 衛星クロック

衛星信号のナビゲーションメッセージには、衛星軌道情報と同様に、軌道クロック情報も含まれています。通常、このクロックパラメータは、エメリフェスパラメータと同様に、2 時間に 1 回、更新されています。コードによる単独測位では、既に説明した通り、受信機の時計誤差を解いていますが、それぞれの衛星からの信号経路に電波遅延が生じているため、受信機が受信した信号のみで計算をすると、実際の時間との間に誤差が生じてしまいます。これが衛星クロックの誤差です。「表 - 4: 主な誤差要因」の通り、最大で約 3m の誤差があると言われています。

4.3 電離層遅延

電離層は、「図 - 11: 衛星軌道と電離層、対流圏」の通り、上空、50km から 1000km までの高度に存在している、太陽活動の影響などから、大気に含まれている気体の種類や密度にばらつきが生じている領域です。電離層は、異なる高度に存在するいくつかの層(D、E、F1、F2 と呼ばれる)によって構成されていて、それぞれの層では、異なる密度の自由電子が消滅を繰り返しています。電子密度は、F2 層である、高度 250~400Km の範囲がピークとなっています。衛星からの電波は、電子密度のばらつきが大きいこの電離層を通過する際、光の屈折の原理により伝搬速度が遅くなります。

地域や季節、時間帯により常にその電子密度が変化するため、電波遅延の影響度は、これに合わせて常に変化しています。また、衛星配置により、受信機からの仰角が低くなるとそれだけ通過する距離も長くなります。これを係数で表した数字が傾斜計数です。搬送波とコードで変調された信号は、電離層の通過中に異なる速度で伝搬する性質があります。コード位相は遅れ、搬送波位相はコード位相が遅れた分だけ進みますが、これをコード搬送波間ダイバージェンスと呼んでいます。

電波遅延の影響により、スードレンジと、実際の衛星と受信機との距離との間に、「表 - 4: 主な誤差要因」に示す通り、最大で約 10m の誤差が生じます。

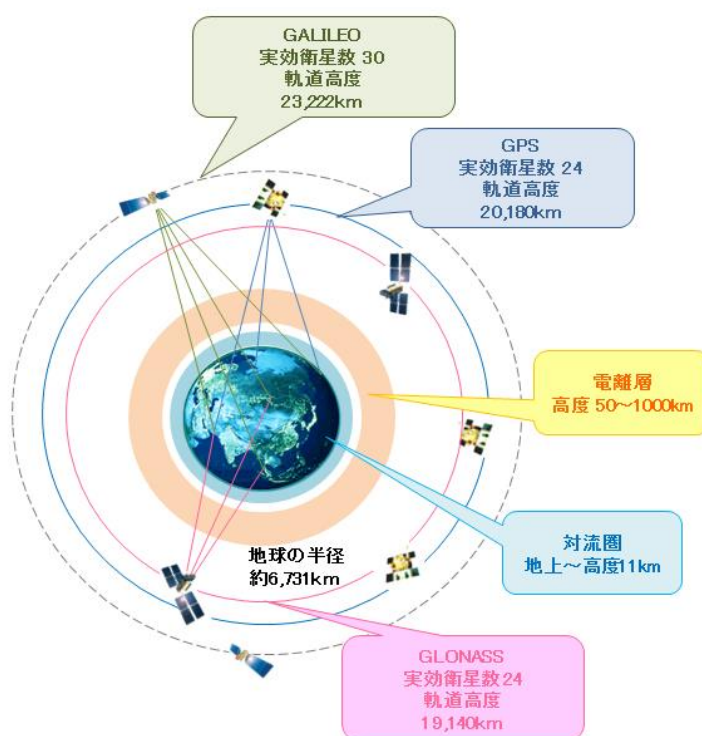


図 - 11: 衛星軌道と電離層、対流圏

4.4 対流圏遅延

対流圏は、「図 - 11: 衛星軌道と電離層、対流圏」の通り、地上から高度約 11Km の間に存在しています。対流圏でも、電離層と同様に、電子密度のばらつきが大きく、光の屈折の原理により衛星からの電波の伝搬速度が遅くなります。ここには、乾燥大気に起因する静水圧遅延と、湿潤大気に起因する湿潤遅延の 2 種類の伝搬遅延が存在していますが、地域や季節、時間帯により、静水圧遅延量は気圧に依存して変化しています。また、湿潤遅延量は、複雑な気圧の変化によりもたらされている各地の気象に依存しています。

対流圏のモデル化に関しては、代表的な手法がいくつか存在しています。ひとつはサースタマイネンモデルで、気体の法則に基づき、高度による気圧、温度、湿度の変化に関する過程を単純化することで導入されています。もうひとつは、ホップフィールドモデルで、広範囲の測定値に基づいて、実験的得られた地上と、特定の地上高における乾燥空気の屈折指数の関係に基づいています。これらに加えて、乾燥空気と水蒸気の構成様子の両方に対して、対流圏の傾斜計数に基づいて遅延量を求めるマッピング関数があります。「表 - 4: 主な誤差要因」の通り、約 0.5m の誤差があると言われています。

4.5 受信機

受信機内にはさまざまな誤差要因があります。アンテナから測位計算結果までのプロセスで、ケーブルや、回路上、電波が遅延するだけでなく、演算速度やメモリーのアクセス速度も影響します。アンテナにはさまざまな形状や方式があるため、実際の受信点がアンテナにあるかと、計算上、どこを受信点としているか誤差も生じてしまいます。これらすべてを合算すると表 - 4: 主な誤差要因の通り、最大で約 0.5m の誤差があると言われています。

4.6 マルチパス

マルチパスとは、一般に、電波が反射物に跳ね返って、直接、入射した電波と、反射物との間の距離に比例して遅延して入射する電波です。周囲の反射物の形状や材質により、さまざまな遅延時間のマルチパスが生じます。移動体で測位をする場合は、反射物との間の距離が変化するためにドップラーシフトにより周波数が上下に変異して電波が入射します。とりわけ、衛星信号の場合は、直接、入射した電波よりも、マルチパスの電波出力の方が大きくなる場合があります。そうすると、マルチパス信号の方を使用してスードレンジを求めてしまうために、スードレンジと、実際の衛星と受信機との間の距離との間に誤差が生じてしまいます。「表 - 4: 主な誤差要因」の通り、約 1～10m の誤差があると言われています。

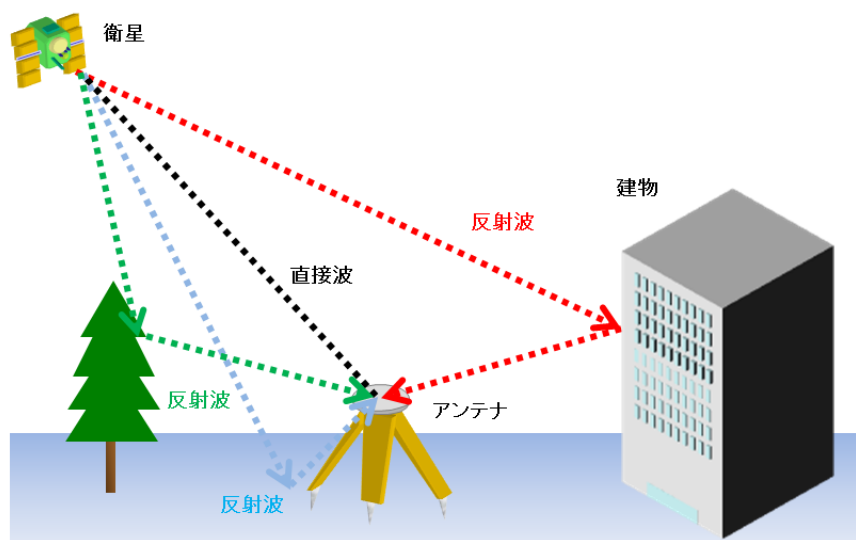


図 - 12: マルチパス

5 さまざまな測位方式

5.1 単独測位

単独測位については、既に簡単に説明しました。コード測位で求められるスードレンジには、さまざまな誤差が含まれているため、真距離とは 10～20m の隔たりがあります。ここでは、コードによる単独測位について、もう少し詳しく説明します。

衛星信号は、BSPK で変調されて、搬送波に乗せられて衛星から放送されています。L1 信号に含まれている C/A コードの場合、受信機内で生成した搬送波と同一の周波数の信号を利用して、復調されます。それぞれの衛星からの C/A コードには、それぞれ異なる PRN コードと呼ばれるデータが含まれています。復調後、受信機は、この PRN コードがどの衛星から放送されたものか、受信機内部にあるコードレプリカと照合することで特定します。

コードレプリカとは、受信機内に格納されている、すべての衛星が放送しているのと同じ C/A コードのことです。1,023 チップ (1,023 ビット) 長の 0 と 1 からなる、C/A コードは、1 ミリ秒ごとに繰り返し放送されていますが、受信した C/A コードと、コードレプリカの位相を 1 チップずつずらしながら照合する、相互相関処理によってどの衛星のものか特定しています。その後、1 秒間に 50 ビット送信されている、それぞれの衛星ごとに異なるナビゲーションメッセージデータとの間でビット反転位置を検出してナビゲーションメッセージを復調します。

ビット反転位置とは、50 bps で変調されているナビゲーションメッセージデータが位相反転 (1 → 0、0 → 1) するデータの位置です。これによって受信機は、ナビゲーションメッセージの復調を行い、衛星の位置情報であるエメリフェスパラメータ、クロックパラメータ、アルマナックも使用して、演算部で衛星測位の基本で説明した通り、スードレンジを求めることで、測位計算を行っています。

5.2 相対測位

相対測位には、既に正確な座標の求められている点 (基準点) と、実際に測定したい点 (未知点) とで同時に単独測位を行って、両方で共通する誤差を相殺する DGPS と、搬送波 (キャリア) 位相を用いて、2 地点間における電波の行路差を求める干渉測位の 2 種類があります。

5.2.1 DGPS

DGPS では、1 つの基地局で行った単独測位の情報を補正情報として RTCM というフォーマットで送信して、移動局が基地局から送られてくる誤差量を加減して高精度な位置を計測します。DGPS には、いくつかの利用方法があります。一般に、DGPS は、狭義では、GBAS (Ground-based Augmentation System: 地上型衛星航法補強システム) である海上保安庁のビーコンを使ったサービス、広義では、GBAS だけでなく、航空機向けの SBAS (Satellite-based Augmentation System: 静止衛星型衛星航法補強システム) や自ら設置した基準局からの補正情報を利用したコードディフェレンシャル測位全体を指します。RTCM フォーマットで、補正情報として、受信信号そのものが移動局に送られる RTK でも、周囲の環境により、測位モードが DGPS に切り替わることがあります。

5.2.1.1 海上ビーコン

船舶向けには、日本の沿岸に海上保安庁により設置された合計 27 局の中波ビーコン局を利用する方法がもっとも一般的です(図 - 13: 海上ビーコン)。各局より約 300kHz 前後の中波に乗せて RTCM フォーマットで DGPS 用の補正情報が放送されているので、DGPS ビーコン受信機を購入し、DGPS に対応した GNSS 受信機に接続することで、ビーコン局から半径 200km の範囲で、DGPS による測位が可能です。

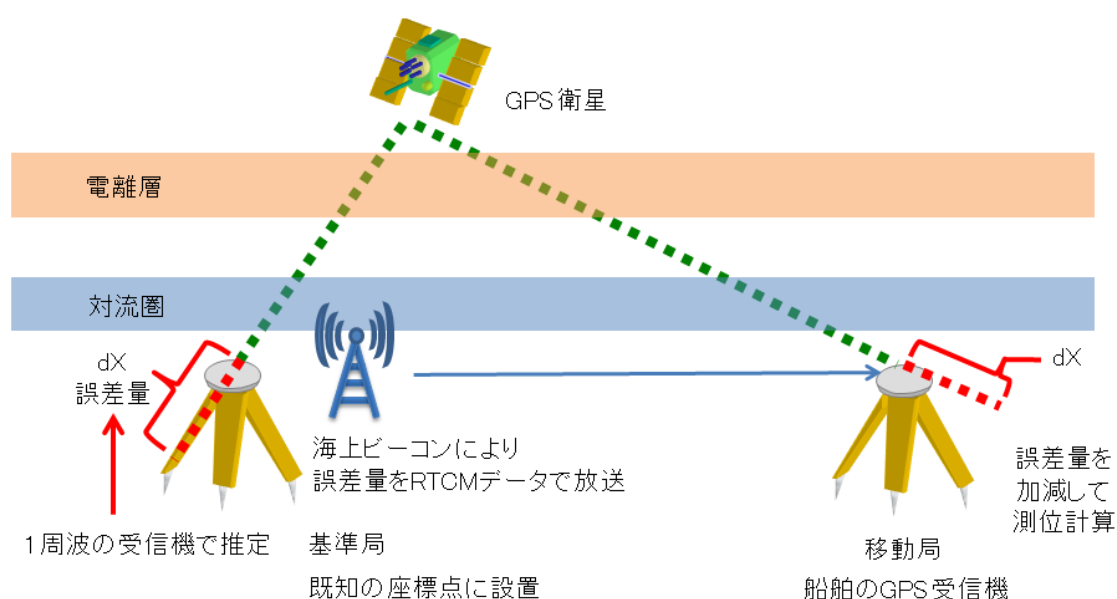


図 - 13: 海上ビーコン

宇宙にある測位衛星から送信された電波は、まず地球の上空にある電離層を通過し、さらに対流圏を通過してから地上にある受信機に到達します。電離層には、紫外線やエックス線により分子や原子が電離した状態で大気が存在しています。この層にある大気は、電波を反射させたり、その通過速度を遅延させたりする性質を持っています。その下にある対流圏も程度には差があるものの、電波の通過を遅延させます。また、電波遅延以外にも、衛星の時計誤差や軌道誤差もあります。DGPS では、これらの誤差を補正するためのデータと、基地局の座標情報を RTCM フォーマットで、補正情報として、受信機に向けて送信することで、より高精度な測位結果を得ることが可能となっています。

具体的には、1つの基地局で行った単独測位の情報を補正情報として RTCM と 2.0～2.3 で定義されたメッセージタイプを使用して送信し、移動局が基地局から送られてくるこれらの情報を基に位置を計測しています。DGPS では、エフェメリス予測値として、0.1m の残差にまで、誤差を低減します。電離層遅延では、基地局が 2 周波受信機を使用している場合、1m、1 周波受信機を使用している放送モデルの場合、1～5m の誤差低減化を実現し、残差は、0.2m となっています。対流圏遅延については、統計的な気象条件に基づいたモデルを使用し、0.1～1m の誤差低減化を実現し、残差は、0.2m となっています。さらに受信機雑音も、残差を 0.1m に低減することで、1cm～5cm の測位精度を実現しています。日本では海上保安庁が、沿岸を航行する船舶に対して、ビーコンを使って無償で補正情報を送信しています。これにより船舶では 1m の精度で測位が可能となっています。

5.2.1.2 航空用 SBAS

また、より広域で利用できるように、航空機向けに、静止衛星から補強情報が放送されている広域のコード DGPS は、一般に、航空用 SBAS と呼ばれています。日本では気象衛星のひまわりが MSAS (Multi-functional Transport Satellite: 運輸多目的衛星用衛星航法補強システム) として広域の DGP 測位向けの補強データが無償で放送しています。航空用には、航空無線技術委員会が定めた RTCA というフォーマットが利用されています。海上ビーコンに比較して精度は若干落ちますが、航空機のナビゲーション向けでは、インテグリティ機能(完全性情報の送信)が搭載されています。

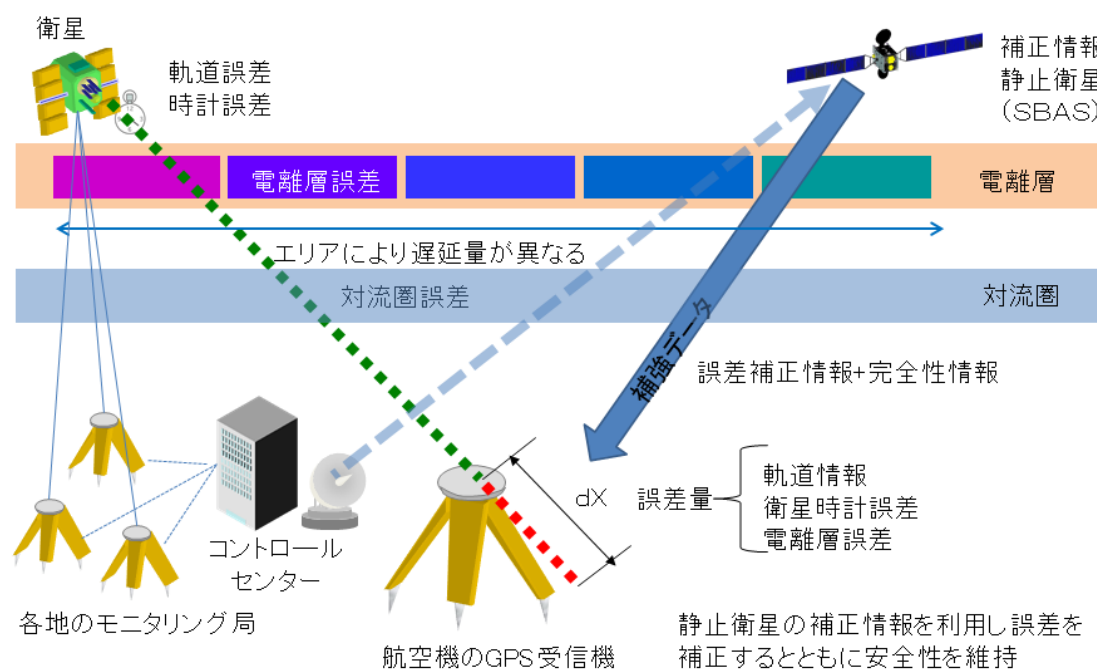


図 - 14: 航空用 SBAS

5.2.1.3 ローカル設置の DGPS

ローカル設置で、自ら基準局を設置する場合、基準局として、2 周波の受信機を利用することが可能です。2 周波の受信機では、対流圏伝搬遅延を測定するために、L1 と L2 の 2 周波を用いて、それぞれのコード測位を行いながら、搬送波のワイドレートの測定し、コード搬送波間ダイバージェンスを利用して遅延量を求めることが可能なため、高精度の測位が可能です。「図 - 15: ローカル設置の DGPS」のように、特定小電力無線機や、Wi-Fi 通信などでデータを基準局から移動局に送信することで、移動局は誤差量を加減して測位計算を行います。

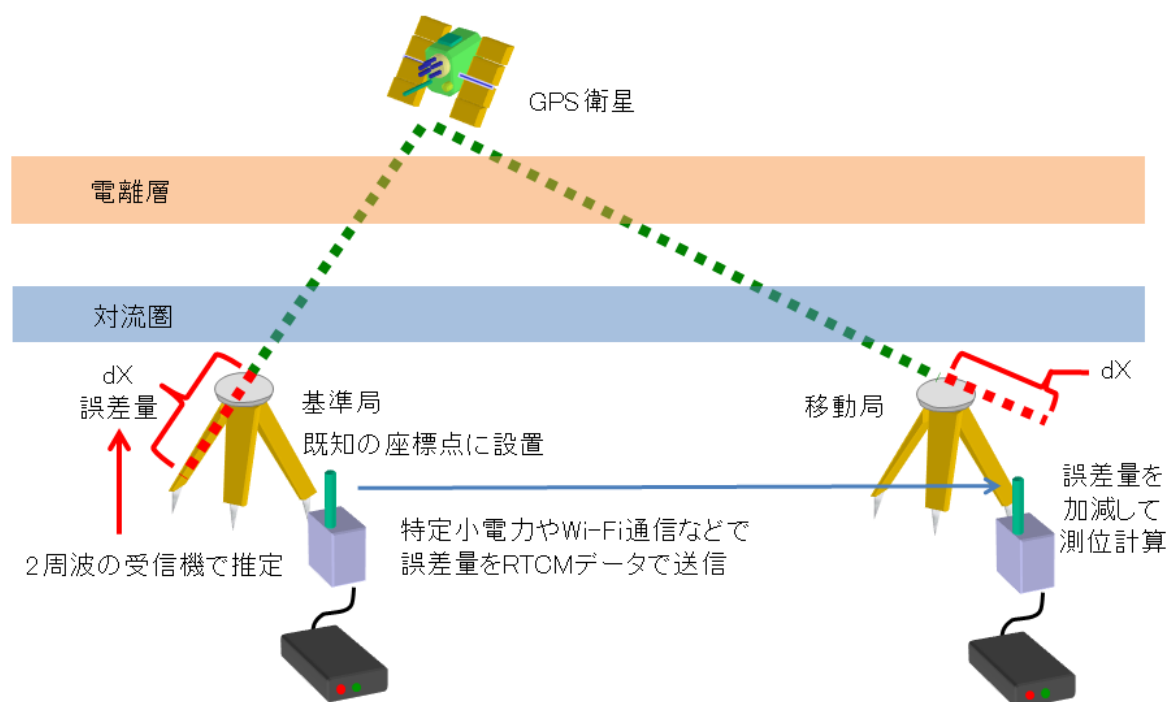


図 - 15: ローカル設置の DGPS

その後、測量やさまざまな移動体のナビゲーションに利用されるようになった RTK 測位では、後に制定された上位バージョンの RTCM が利用されています。RTK 測位の場合も、ローカル設置の DGPS と同様に、特定小電力の無線機や Wifi 通信、携帯のデータ通信などで基地局と移動局を結び、基地局から RTCM フォーマットで補正データを送って利用することが可能です、海外では、UHF 通信など別の通信方法を利用できる国もあります。後に、RTCM データをインターネット上で送信可能とするフォーマットである、Ntrip (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)

が標準化され、インターネット経由でも補正データを利用できるようになりました。日本では、株式会社ジェノバ、日本テラサット株式会社、日本 GPS データサービス株式会社などが提供している、Ntrip のデータ配信サービスを利用することで、PC やスマートフォンなど、インターネットが利用できる環境を用意することで、電子基準点や VRS のリアルタイムでの RTK や DGPS に加えて後処理解析が利用できます。

それでは、ここで、RTCM フォーマットについてもう少し詳しく説明しましょう。

5.2.1.4 RTCM フォーマット

DGPS と RTK では、ともに RTCM フォーマットを利用していても、それぞれの測位に必要な補正データは異なっています。DGPS では、衛星と受信機間の擬似距離(スードレンジ)で測位計算を行うため、基地局で観測された各衛星間に対しての計算された擬似距離補正データが必要となってきます。一方、RTK では搬送波(キャリア)を用いた搬送波測位なので、アンビギュイティの決定時に必要なデータとして、基地局で観測される各衛星の搬送波位相データ、擬似距離データ、基地局座標値が必要となってきます。このため、それぞれの測位方式に対する補正データ情報には、これらのデータが最低限含まれています。

DGPS では、1 つの基地局で行った単独測位の情報を補正情報として RTCM 2.0-2.3 で定義されたメッセージタイプを使用して送信し、移動局が基地局から送られてくるこれらの情報を基に位置を計測します。DGPS で必要となる RTCM のメッセージタイプは、擬似距離補正としてタイプ 1、もしくはタイプ 9、基地局の座標としてタイプ 3 です。擬似距離補正で使用されるタイプ 1 は、基地局で観測されたすべての衛星の擬似距離補正値を 1 パケットとして送信します。これに対し、タイプ 9 では 3 衛星ごとにパケット化されている。タイプ 9 では、補正データ受信中に 1 パケット分失われた場合でも、他のパケットから補正データを受けることで測位が可能となるため、より安定性が高いと言えます。タイプ 9 による DGPS は海上保安庁の中波ビーコンに採用されています。

RTK で必要となる RTCM のタイプは、搬送波位相観測データのタイプ 18、擬似距離観測データの 19、基地局座標値の 3、22 です。基地局座標にはタイプ 3 とタイプ 22 の 2 つがありますが、タイプ 3 は cm 精度の座標値で、タイプ 22 は mm 精度の座標値です。RTK で観測する際は、通常、常に値が変化するタイプ 18、1 秒ごとに値が変化するタイプ 19、値に変化のないタイプ 3、30~60 秒毎に出力するタイプ 22 を使用することが可能です。

RTCM は 30bit を 1word としたフレームで構成されています。各タイプとも、ヘッダとして 2 word (60bit) が先頭についています。このヘッダにはメッセージタイプ、基地局の ID、時刻情報の Z-Count やパリティ等が含まれています。(図 - 11: RTCM のヘッダ部分とデータ部分) また、RTCM では、各タイプの送信間隔を何秒ごとに送信するか任意に設定が可能です。

メッセージタイプ	タイトル
1	ディファレンシャル GPS 補正情報
3	基準局座標値 (cm 精度)
7	DGPS ビーコンのアルマナック
9	ディファレンシャル GPS 補正情報 (パーシャル)
16	GPS スペシャルメッセージ
18	RTK 搬送波データ (GLONASS も含む)
19	RTK 擬似距離データ (GLONASS も含む)
22	基準局座標値 (mm 精度)
31	ディファレンシャル GLONASS 補正情報
59	受信機メーカー独自フォーマット

表 - 1: RTCM で規定されている、主なメッセージタイプ

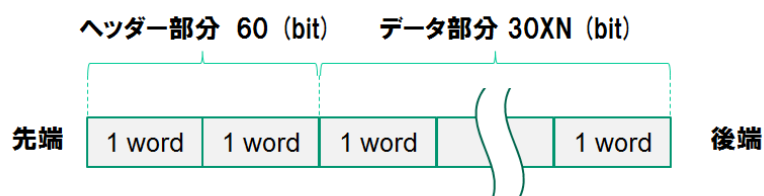


図 - 16:: RTCM のヘッダ部分とデータ部分

5.2.2 干渉測位

干渉測位においては、コードでスードレンジを計測した上で、さらに精度を上げるために、搬送波の位相(フェーズ)を計測します。位相差により行路差を求めることで、センチメートル精度での測位が可能です。しかし、衛星までの波数は不明なので、搬送波の波長の整数倍の誤差が生じる可能性があります。これをアンビギュイティ、または整数バイアスと呼んでいます。「図 - 17: 干渉測位」では、未知点が移動している状態を説明していますが、衛星自体が動いているので、未知点が固定されている場合も原理は同じです。

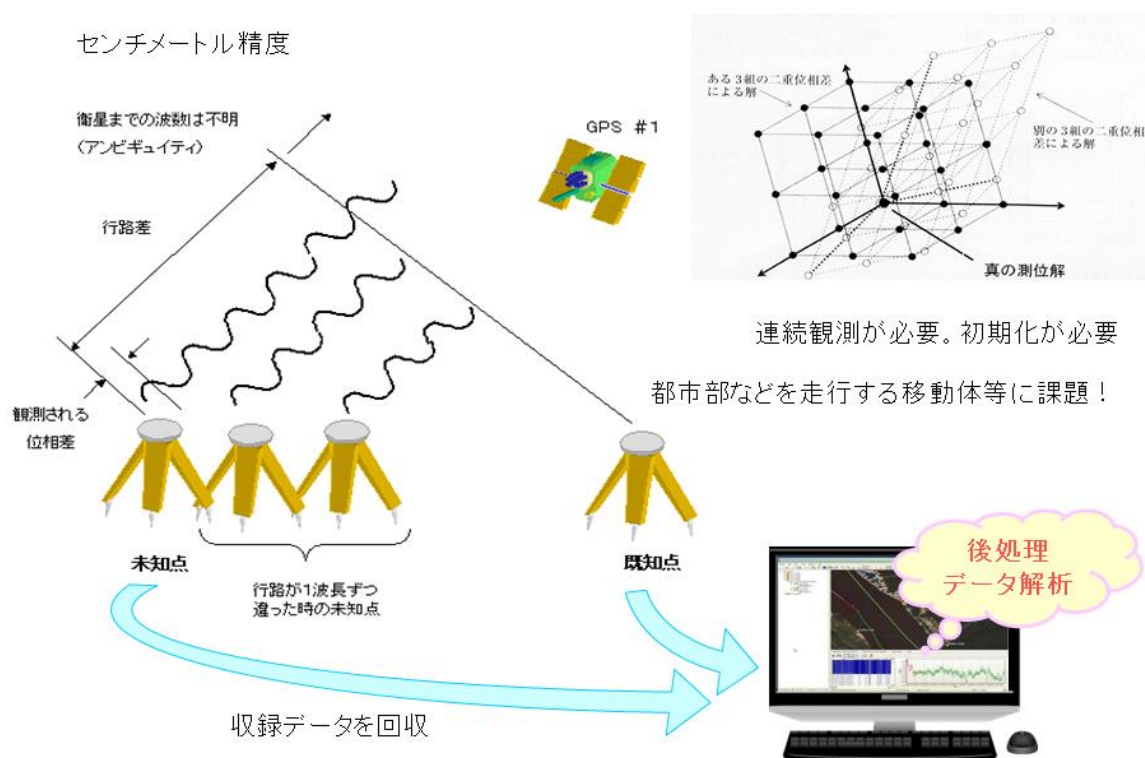


図 - 17: 干渉測位

主に測量で使用するスタティック測位と、移動体局のキネマティック測位があります。連続観測や初期化が必要です。スタティックの場合、なるべく長時間にわたり 2 台の受信機を既知点と未知点に固定設置して、衛星の移動で生じる受信信号の位相差を、後処理解析ソフトを利用して計算することで、精密な測位を行います。キネマティック測位の場合は、基準局を既知点に設置して、同様に、後処理解析ソフトを利用して測定します。

5.2.1 スタティック測位

スタティック測位は、測位精度が高いことから、公共測量や学術的な精密観測など、幅広く測量に用いられています。また、可降水量の測定といった気象学面（「GPS 気象学」という）にも応用されています。スタティック測位では、すべての測位方式の中で、もっとも高精度な測位が可能です。スタティック測位が他の GPS 測位と大きく異なるのは、単独測位、DGPS、RTK がリアルタイムで測位可能であるのに対して、スタティック測位では複数台の受信機を用いて、データを収録し、観測終了後にデータを収集して解析を行う後処理方式である点です。スタティック測位は、搬送波位相を利用し、あらかじめ座標の測定されている既知点から 1 つ以上の未知点の座標を相対的に計算します。

干渉測位では GPS から送信される搬送波の位相を既知点、未知点で同時観測し、この 2 点間ベクトル（これを「基線ベクトル」という）を計算します。C/A コードを利用して衛星－受信機間の擬似距離を計算して測位する単独測位や DGPS と異なり、スタティック測位や、キネマティック測位、RTK を含めたすべての干渉測位では、それぞれの点における搬送波位相を測定し、既知点、未知点で共通に観測される衛星の位相差を計算します。ここでは衛星－観測点間の搬送波数が分からないため、解は整数値バイアスとなって複数表れます。整数値バイアスについては、3 組の衛星を複数組み合わせることで、真の解を計算し未知点座標を決定します。

スタティック測位では、整数値バイアスの決定において、衛星の移動を利用します。衛星移動による整数値バイアスの相殺を三重位相差と呼んでいます。整数値バイアスは時間とともに移動しますが、真の解のみ移動がないため、長時間観測することで未知点座標の決定を行います。具体的には、観測場所、期間、取得するデータのサンプリング間隔などの観測計画を立てて、2 台以上の複数台の受信機を使って観測を開始します。この観測計画をセッションと呼んでいます。また、データサンプリングは エポックと呼ばれています。

観測時間は、基線間距離や測位精度の許容範囲にもよりますが、衛星移動を利用するため、3 時間以上が望ましいと言われています。また、基線距離に関しては、1 周波 GPS 受信機を用いる場合、電離層による影響により 10km 以内程度が望ましいとされています。2 周波受信機を用いる場合、収録されたデータは L1 帯、L2 帯を独立で解析しますが、解析ソフトウェアによっては 2 周波線形結合により電離層遅延を補正できるので、1 周波のものよりも長基線での解析が可能です。学術ソフトウェアでは数千 km 間の基線距離でも解析可能となっています。

解析結果では、既知点、各未知点座標値の他、セッション設定条件や、FIX 率、標準偏差値などが出力されます。収録データフォーマットには、各受信機メーカー独自のフォーマットと、受信機種種に依存しない共通フォーマットである RINEX (Receiver INdependent EXchange) ファイルがあります。現在の測量用受信機や解析ソフトウェアのほとんどが RINEX ファイル対応となっています。

スタティック測位を利用した解析としては、国土地理院が地殻変動検出のため行っている全国 GPS 連続観測システム GEONET (GPS Earth Observation Network) があります。これは日本全国で 1200 点以上設置された電子基準点により、24 時間連続観測が行われています。この解析結果は国土地理院のホームページに公開されています。また、これら GPS 電子基準点における RINEX ファイルも公開されています。絶対的な位置を求める測量にこれらを用いることはできませんが、科学的な意味合いにおいて相対的な位置を知る目的であれば、申請が必要となりますが、

これらのデータは利用可能となっています。世界的には世界各地に設置された IGS 観測点により、プレート運動検出や、ITRF 系座標の決定にも利用されています。

5.2.2 RTK

干渉測位のキネマティック測位と同様に、基準局を既知点に設置して測定しますが、RTK では、後処理解析を利用せずにリアルタイムで測位を行います。測量のように定点を観測する場合にも、利用の手軽さから大きく普及してきています。(図 - 18 RTK) RTK では、RTCM フォーマットで基準局の受信データそのものを送信します。DGPS でも送信されている擬似距離観測データと基地局座標値データに加えて、搬送波位相観測データも送信することで、航路差を搬送波によって求めるためです。

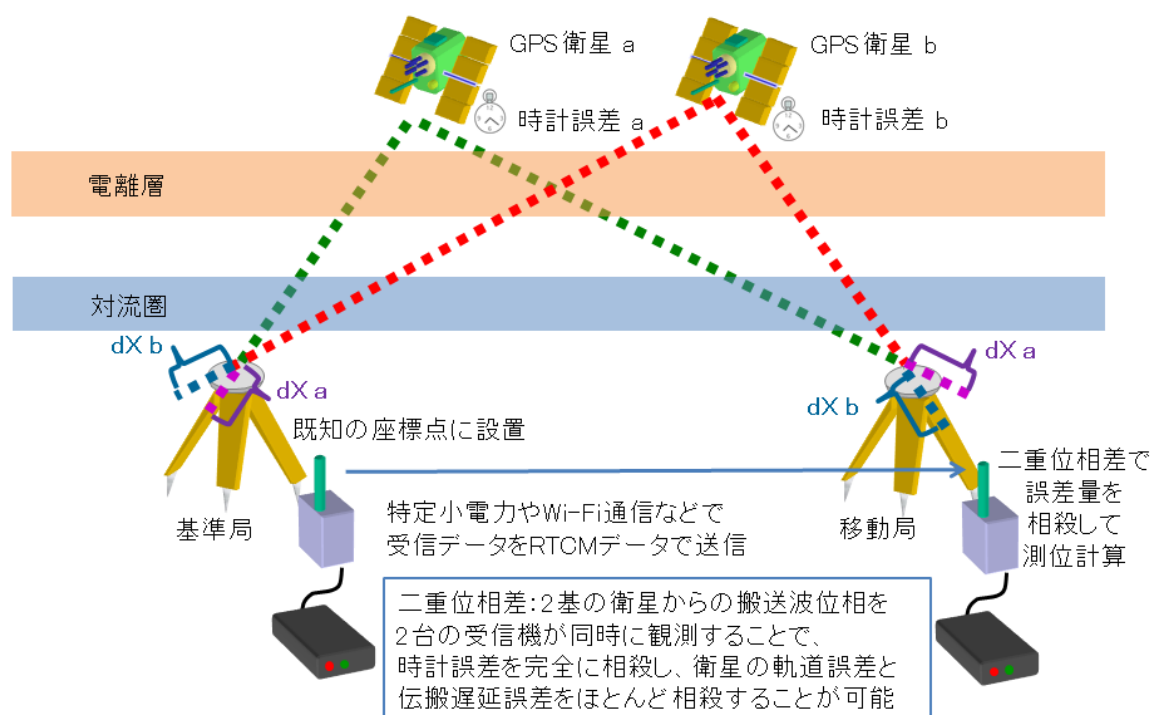


図 - 18 RTK

その結果、移動局は、2 基の衛星から放送されている信号を、ふたつの異なる受信点で観測して、測位計算を行うことができます。測位計算において、搬送波の二重位相差を求めることで、衛星時計誤差と受信機時計誤差が除去され、さらに、基線長が、十分に短距離であれば、各疑似距離に同一の値が誤差として含まれている電離層と対流圏の伝搬遅延誤差や衛星軌道誤差がほとんど除去されます

搬送波の整数倍を航路差の疑似距離の解として求めることで、アンビギュイティ解決を行うことができます。搬送波の整数倍となる解は、4 基の衛星の観測では、1 エポックで、求めることができませんので、複数エポックにより計算を行ないます。ここで、整数解を求めずに、実数解を求める方法が、Float モードです。そして、整数解まで求める方法が、Fix モードです。

RTK 測位の精度として一般に言及されている 2~5cm という数字は、Fix モードの測位結果です。移動体に受信機を搭載した実環境における測位では、マルチパスの影響などにより連続して Fix モードで測位解を得ることは困難で、断続的に Float モードに移行することで測位精度が低下します。2 周波受信機における Float モードの測位精度は、環境や受信機性能、基線長などにより異なりますが、20cm から 1m となるという検証結果があります。

5.2.3 VRS

VRS は、国土地理院の複数の基準局をネットワーク化して誤差をモデル化して、移動局の近くに「仮想的」な基準局を作成し、そのデータを移動局に配信することで、仮想基準局と移動局間で RTK-GSP 測位を可能とする技術です。(図 - 13: VRS) これにより、サービスの提供範囲内であれば、どこにいても台の受信機のみで RTK-GPS 測位ができるようになっています。VRS ネットワーク配信は、株式会社ジェノバ、日本テラサット株式会社、日本 GPS データサービス株式会社などが行っています。

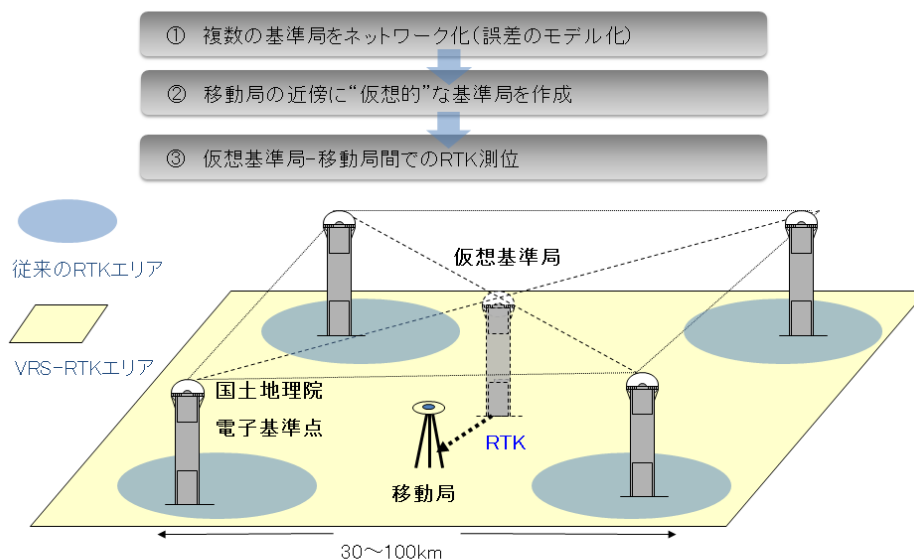


図 - 19: VRS

5.3 高精度単独測位

5.3.1 PPP

受信可能な全衛星の精密軌道暦とクロックデータを衛星から補強情報として送信し、受信機と衛星間を搬送波で直接測定するのが高精度単独測位 (PPP) です。コード測位である GDGPS の補正情報サービスは、現在、Trimble 社 (Trimble RTX)、Fugro 社 (OmniStar)、John Deere 社 (StarFire)、Veripos 社 (Veripos/TerraStar) の 4 社が有料で提供しています。また、準天頂衛星システムも、このサービスを無料で提供していく計画です。PPP には厳密には、精密軌道暦と、衛星クロックデータを手し、軌道誤差と時計誤差のみを解消する方式ですが、電離層伝搬遅延や、対流圏伝搬遅延の誤差解消にも対応した PPP-AR (図 - 20 PPP (StarFire の場合)) も、一般的には、単に PPP と呼ばれることも多いのが事実です。

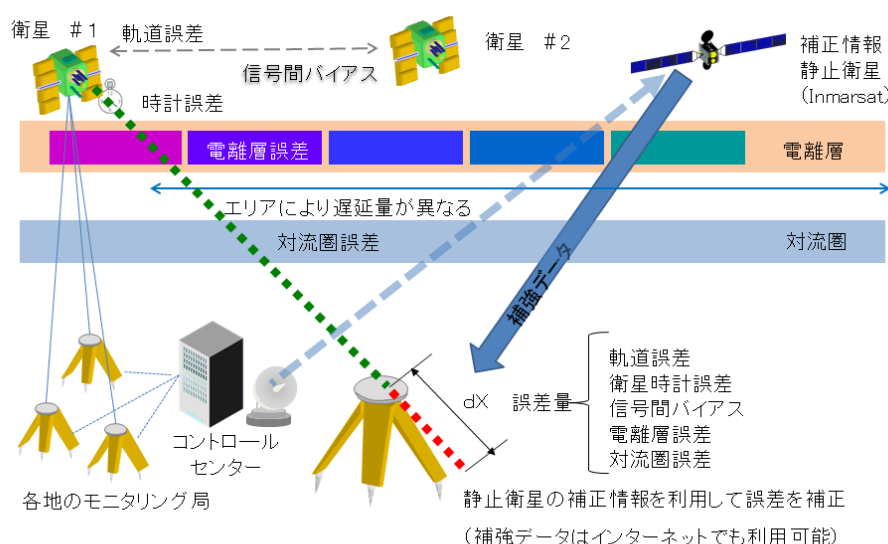


図 - 20 PPP (StarFire の場合)

RTK などの高精度測位との最大の相違点は、近傍に基準局の設置の必要がないことです。また、GNSS の精密軌道暦と、クロックデータは、全世界共通なので、PPP は全世界で利用が可能です。後処理解析で、インターネット配信された補正データを利用して PPP 測位を行うことも可能です。

この方式を実現するためには、全世界に観測局 (GNSS Reference Station) を配備して、過去と現在の衛星配置を監視し、現在と、一定時間経過後の未来の時点の衛星配置情報、つまりは「精密軌道」を高い精度で計算し、計算結果を静止衛星にアップリンクすることで、静止衛星から受信機に配信するインフラが必要です。精密軌道と、衛星のクロック情報を静止衛星から提供することで、PPP アルゴリズムが搭載され、2 周波の搬送波の測位が可能な GNSS 受信機は、1~10cm オーダー (高さ方向は 20cm) の精度を実現可能です。

5.3.2 PPP-AR

高精度単独測位(PPP)の場合、衛星からの信号が途切れると、再度、初期化をするのに最初の初期化時間と同じ 30 分以上かかってしまいます。そこで PPP のアルゴリズムをベースに、整数アンビグイティ解決を行うことで、初期化時間を短縮し、再初期化を瞬時に行える PPP-AR という技術が、近年、注目を集め実用化が待望されていました。2015 年 3 月に、テラスター-C により、この技術が実用化され、初期化時間が約 25 分に短縮されるとともに、再初期化が瞬時に行えるようになりました。更に、PPP に比較して精度も向上しています。

従来の PPP では、精密衛星軌道と、クロック情報のみが衛星から受信機に提供されていましたが、PPP-AR では、考えられうるベストのデータ品質とデータ遅延で、観測バイアスの情報を提供することで、受信機が整数アンビグイティ解決を行えるようになりました。これらのデータは、静止衛星から、L-バンドの周波数帯域で、受信機に送信されます。

Veripos 社の場合、観測バイアスの補正情報は、全世界の 85 か所を超える設置拠点に広がる基準局のネットワークからリアルタイムで収集された観測結果をベースに、イギリスとシンガポールの 2 か所に設置され、冗長化されたネットワークコントロールセンターで計算が行われ、静止衛星(Inmarsat)にアップリンクされています。



図 - 21: テラスター社の観測局網

5.3.3 PPP-RTK

高精度単独測位 (PPP-AR) は、RTK に比較すると、やはり初期化時間が長い点が大きなデメリットになっています。インターネット接続や他の通信手段と無線が利用可能な環境下で、近隣に RTCM データの利用を公開された基準局がある場合や、VRS サービスが利用できれば、すでに一般的に普及している RTK が有利です。しかし、RTK の補正情報サービスは地域によって、可用性が異なりますし、静止衛星から補正情報を受信せざるえない環境下では利用することができません。高精度単独測位 (PPP-RTK) は、RTK 並みの初期化時間で、静止衛星から補正情報を受信するだけで利用できる PPP と RTK を融合させた測位方式です (図 - 22: PPP と RTK の融合)。衛星毎に異なる位相端数バイアス (Fractional Cycle Bias: FCB) と呼ばれる補正情報を追加することで、アンビグイティ解決を行うことが可能になったことで、初期化時間の短縮と精度の向上が実現可能となっています。

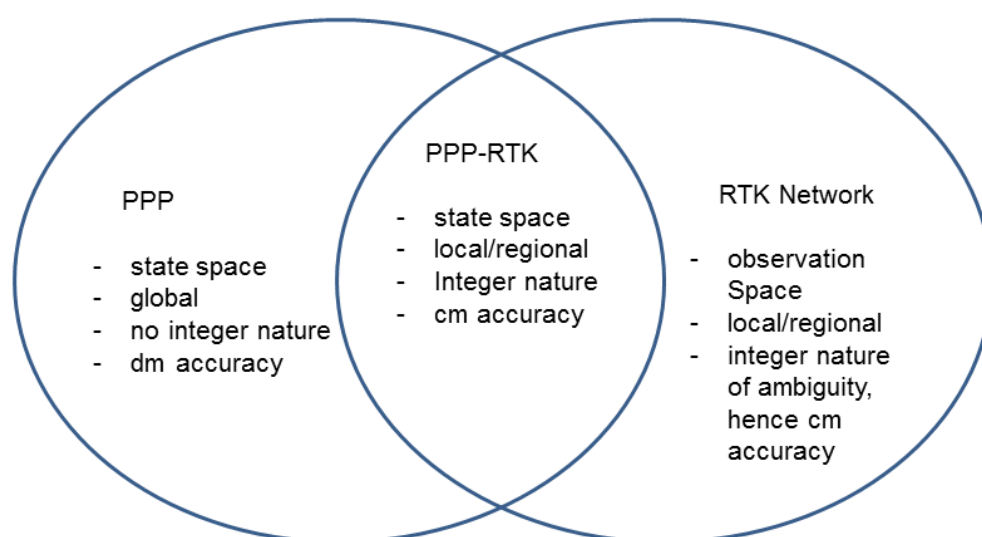


図 - 22: PPP と RTK の融合

PPP-RTK も、PPP 同様に、受信機が衛星の精密軌道暦と衛星のクロックデータを受け取ります。さらに、PPP-RTK では、これらに加えて、衛星の位相バイアス情報も受信機が受け取り、アンビグイティ解決を行うことで初期化時間を短縮します。RTK ネットワークでは、基準局の観測結果と共に、距離に依存した誤差に関するデータや、VRS のデータが、RTCM フォーマットで移動局に送信されますが、これを OSR (Observation Space Representation) と呼びます。これとは対照的に、実際の状態空間データ (state-space data)、つまりは、完全な GNSS の状態である、SSR (State-

Space Representation) を使用して、RTK ネットワークを基に、正確絶対測位を行う方式が PPP-RTK です。PPP-RTK なら、数秒の初期化時間で、後処理およびリアルタイムでセンチオーダーの測位が可能です。

2012 年に PPP-RTK & Open Standards Symposium がドイツ、フランクフルトにて開催され、RCTM の新仕様や、全世界の電離層情報をモデル化する手法、各地域の観測局のデータを利用した補正情報などの技術と、既に市場で利用可能な Trimble 社 (Trimble RTX)、Fugro 社 (OmniStar)、John Deere 社 (StarFire)、Veripos 社 (Veripos/TerraStar) のような GDGPS 差ビスの現状、国土地理院の GEONET ベースの PPP 補正情報を提供する QZSS の動向、今後の普及やツールについて情報共有と議論が行われました。QZSS では、L6 の仕様を定めた IS-QZSS-L6 で、RCTM SC-104「RTCM STANDARD 10403.2」3.5.12 項に規定される SSR メッセージ (PPP-RTK) 互換の圧縮形式である Compact SSR に準拠したメッセージを送信することが決まっています。この Compact SSR は、RCTM SC-104 QZSS/SSR WG で規格化を進めている段階です。

Compact SSR とは、以下のコンセプトに従ってフォーマットが設計されています。

- 衛星放送サービスに向けた、コンパクトなデータサイズ
- 現状の RTCM SSR 標準に基づきフォーマットの維持が可能
- 既存の衛星信号と将来の衛星信号をサポートするのに十分な柔軟性
- PPPRTK の初期化時間の短縮のために、斜め方向の TEC (STEC) データと対流圏遅延データ
- 利用者側のシステムインテグリティ監視をサポート

毎年、GNSS の最新の研究成果や技術を、全世界の大学や研究機関、GNSS 技術に関連した企業が一堂に会して発表する ION (The Institute of Navigation) の 2016 年のセッションでは、三菱電機が、本技術に関する発表を予定しています。

各国の大学や、研究機や、衛星測位技術関連企業が、この日本の独自技術にどのように反応し、今後、世界がどの方向に進んでいくのかは、まだはっきりしていません。

6 受信機の基本技術

アンテナから入ってきた信号は、まず高周波増幅部で、信号レベルを増幅します。ここでは、当然、GNSS 信号だけでなく、自然電波ノイズや他の電波も含めて信号強度が増幅されます。次にミキサ（周波数変換器）でデジタル化に最適な中間周波にダウンコンバートされます。ダウンコンバートされた信号はさらに中間派増幅部で増幅され、A/D 変換部に受け渡されデジタル波形データに変換されます。次に、コード相関部で、ループ処理で C/A コードの復調が行われ、CPU 処理部とのデータのやりとりで、相互相関 (Cross-Correlation) を求め、どの信号がどの衛星のものを特定した上で、航法データの復調、衛星の軌道演算、位置演算により、位置や速度、時刻 (PVT) をシリアルデータの形で出力します。(図 - 16: 一般的な受信機内部の信号処理)

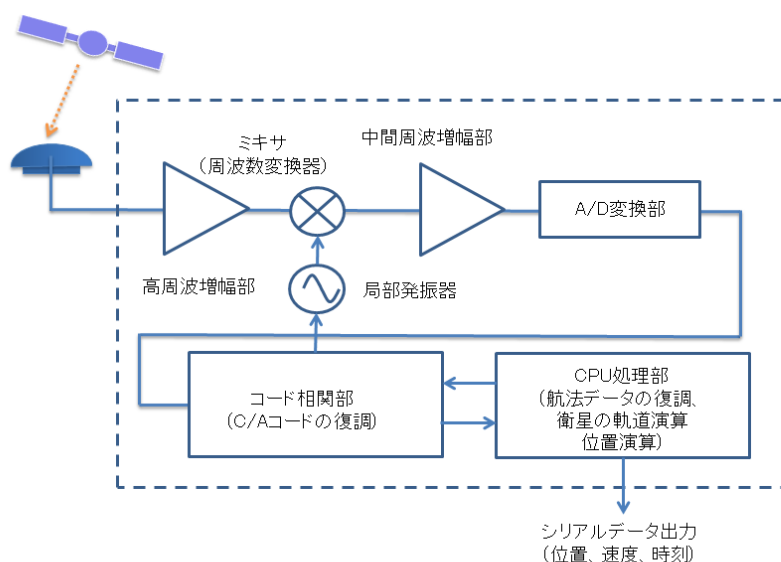


図 - 23: 一般的な受信機内部の信号処理

コード相関部や、航法データの復調については、「5.1 単独測位」ですでに説明した通りです。衛星の軌道演算、位置演算による、位置や速度、時刻 (PVT) の出力については、これまでに説明した測位方式により異なります。多くの受信機は、標準フォーマットである、NMEA や RINEX、メーカー独自フォーマットで、PVT データの外部システムへの出力が可能となっています。

それでは、受信機に搭載されているマルチパス緩和技術について簡単に説明します。

6.1 マルチパス緩和技術

コード測位では、C/A コードと、コードレプリカの位相を 1 チップずつずらしながら照合する相互相関処理を行います。マルチパスの影響は、フロントエンドにおける信号のダウンコンバート処理後

の、中間周波数に関係しています。2.0MHz にダウンコンバートされている場合は、帯域が広いいためマルチパスの誤差は、最大で 80m となります。

1990 年から 1993 年までの間には、0.1 チップの短い間隔で遅延させた 2 つのコードレプリカとの照合を行うように、8.0MHz の狭帯域で相互相関処理を行う Narrow Correlator により、40m 程度の距離にある反射物からのマルチパスの影響を 10m 以下に緩和することが可能となりました。Standard Correlator とのマルチパス遅延とコードレンジエラーの差は、「図 - 24: マルチパス緩和」に示す通りです。

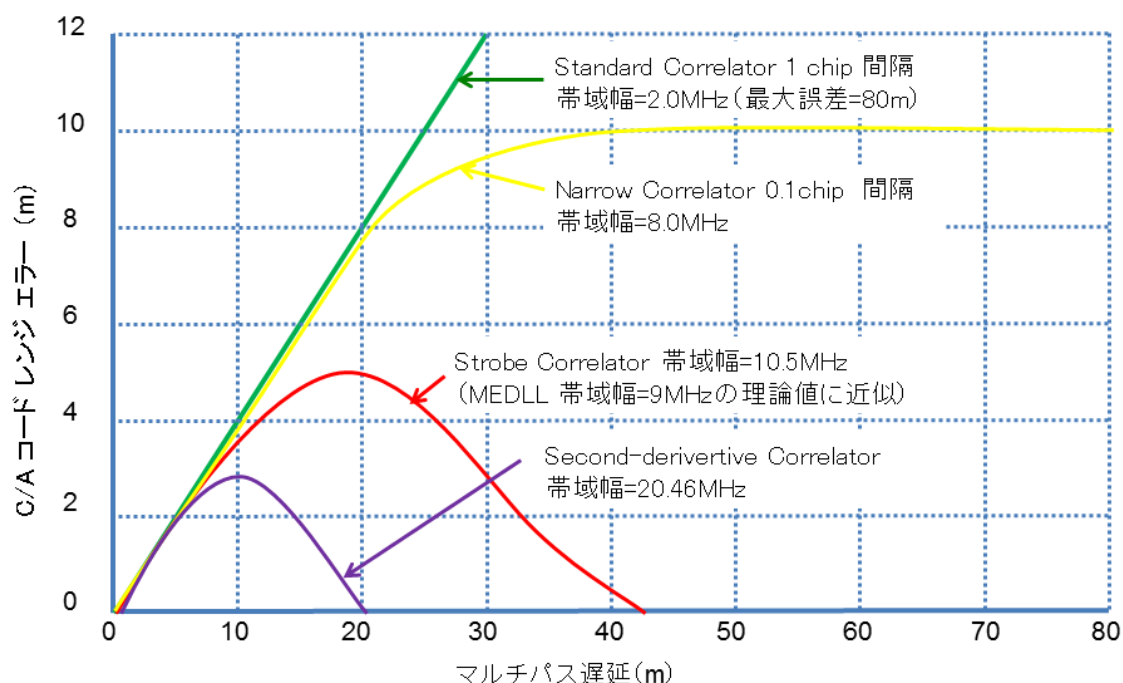


図 - 24: マルチパス緩和

これを一歩進めて、複数の遅延速度の複数のコードレプリカに対して、相互相関処理を行うことで、信号レベルや、遅延、位相が異なるマルチパスのパラメータに応じて、信号レベルがノーマライズされた補正機能を実現するアプローチが考案されました。そして、1994 年から 1995 年までの間に、各メーカーが独自のマルチパス信号のカーブを用いた機能を開発しました。10.5Mhz の帯域幅を使用する Strobe Correlator や、8Mhz の帯域幅で行う MEDLL により、40m までの遅延速度のマルチパスを 5m 以下に緩和できるようになったのです。

しかし、ここまでのマルチパスの緩和は、すべてコード位相に関するものであり、搬送波測位において、大きな影響を与えるアンテナから短い距離にある電波反射物からのマルチパスには有効な対策とはなっていません。Trimble 社の EVEREST も、搬送波測位で一定の効果が認められていますが、手法としてはコード位相における相互相関処理です。

APME (A Posteriori Multipath Estimator)

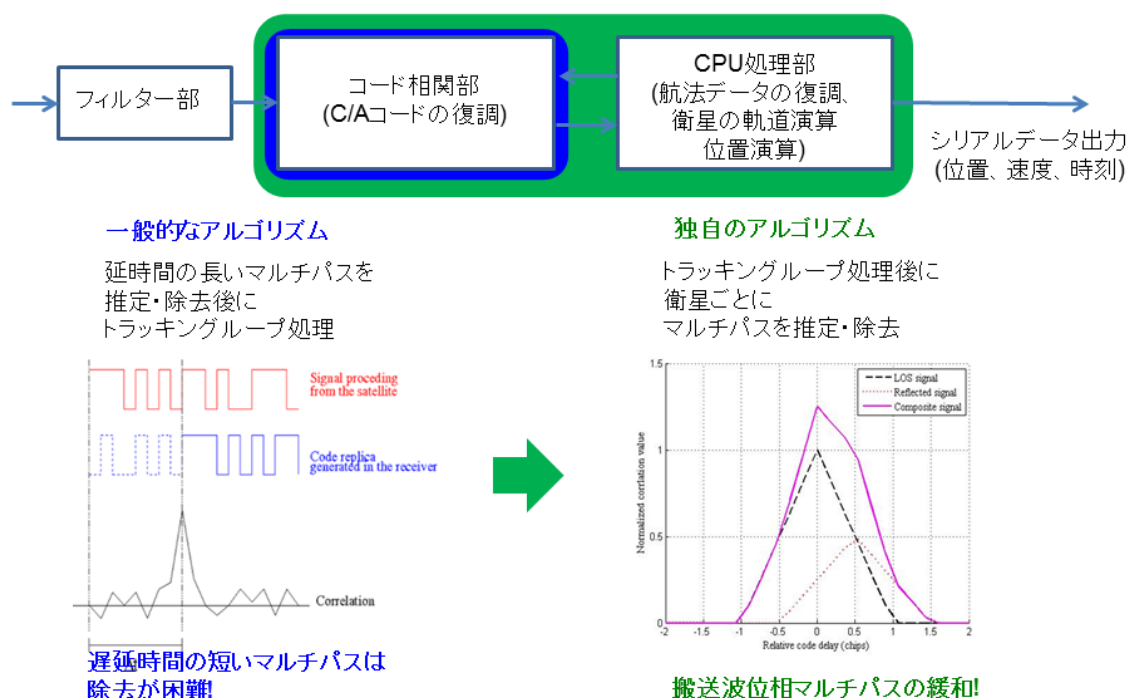


図 - 25: APME

その後、Septentrio 社が、搬送波に対して有効なマルチパス緩和技術である、APME (A Posteriori Multipath Estimator technique)を開発しました。「図 - 25: APME」の通り、CPU 処理部の出力結果を含めて、搬送波レベルで影響を与えるアンテナにごく近い場所にある電波反射物からのマルチパス除去する独自のアルゴリズムにより、従来、不可能であった数メートル単位の短い距離にある電波反射物からのマルチパスの緩和が可能となりました。

7 アンテナの基本技術

GNSS アンテナの方式、形状として一般的なのは、マイクロストリップパッチアンテナ（パッチアンテナ）です。パッチアンテナでは、周波数帯域に合わせて異なる平面の面積を持つ誘導板を内蔵した製品が市販されています。一例として、「写真 - 1 : Septentrio 社 PolaNt-x MF」のような外観で、ほとんどのアンテナの背面に、測量用の三脚や一脚、専用架台などに固定するためのねじ穴が付いています。L1 信号と L5 信号の帯域が近いため、一般に、2 周波以上に対応したパッチアンテナは、誘導板が 2 層構造となっています。パッチアンテナは、導体に一定の体積があるため、厳密には導体のどこが受信点になっているか特定することはできないため、導体の大きさが誤差要因となります。



写真 - 1 : Septentrio 社 PolaNt-x MF

一方で、クロスダイポラアンテナである、チョークリングアンテナは、受信点が円状のアンテナの中心点となるため、 x 、 y 軸方向での測位精度が高まると言われています。また、マルチパスからの影響を受けにくいという特徴もあります。チョークリングアンテナは、全国の電子基準点で利用されている他、とりわけ高い精度が求められる地殻変動の観測などの用途でも利用されています。一例として、チョークリングアンテナは、「写真 - 2: Javad GNSS 社 RingAnt-DM」のような外観で、殆どの機種で、カバーを取り付けられるようになっています。写真には、DM アンテナ（Dorne-Margolin Antenna）の上部カバーが並んで映っています。



写真 - 2: Javad GNSS 社 RingAnt-DM

チョークリングアンテナについては、DM アンテナや、SCIGN レドームアンテナのように、アンテナ上部に最初からカバーが取り付けられたタイプのももあります。これらのカバーは、電波屈折を生じさせるために、電波屈折が誤差要因となります。DM アンテナでは、カバー表面のどこに電波が届いたかによって、屈折した電波の飛来方向がカバー内部のどこに進むかが異なっています。一方で、「写真 - 3: UNAVCO の SCIGN レドームアンテナ」のような、半球型のレドームアンテナは、カバー表面のどこに電波が届いても、屈折した電波がすべて受信点に進むので、誤差要因がより小さいと言われています。



写真 - 3: UNAVCO の SCIGN レドームアンテナ

加えて、すべての方式に共通して、電波感度による誤差要因が存在しています。GNSS の信号は、-130 dBm 程度の微弱信号ですので、電波感度が受信機における S/N 比に大きく影響を与えます。感度と大きさはトレードオフの関係にありますが、パッチアンテナな、携帯用途で、長年にわたり小型化が求められてきたため、材質、形状でさまざまな工夫がされています。また、L バンド対応アンテナのように、受信帯域を広げると、帯域外干渉の影響に対して脆弱性が高まるため、

受信機内部で干渉波による測位精度の低下を生じさせる可能性があります。外部環境によっては、帯域幅も誤差要因に関係しています。

アンテナの技術による誤差は、測位結果に対して x 、 y 、 z の 3 軸方向の精度に影響を与えます。とりわけ、高精度の測位が求められる測量や、地震や火山などの地殻変動の観測などの用途で問題となります。高精度の測位では、主に後処理解析ソフトウェアを使いますが、DM アンテナや SCIGN レドームアンテナなどの屈折率に対する対策として、PCV 補正と呼ばれるパラメータを入力することで補正し、測位計算を行うことが可能になっています。

アンテナは、位相中心で入射する電波の位相を測定していますが、入射する電波は、その入射角度によってわずかに位相が変化するため、アンテナの物理的な底面に対する位相中心の位置と一致しくなくなります。これを、(Phase Center Variation: 位相中心変動)」と呼んでいます。入射角に合わせて位相のずれを補正することで位相中心変動を補正するのが、PCV 補正です。

位相のずれはアンテナの機種によって異なるため、各々のアンテナに対して理想的な観測状態で位相のずれを算出しますが、このような、位相のずれのモデルは、アンテナ位相特性モデルと呼ばれています。基線解析の際にアンテナ位相特性モデルを適用して PCV 補正を行うことで、より精度の高い基線解析が可能となります。

ここで、最近、日本市場において、地域によっては、問題となっている帯域外干渉の対策について、簡単に説明します。

7.1 帯域外干渉の緩和

日本市場においては、他国よりも早くから LTE が普及しており、周波数帯域が 1,575MHz である L1 信号や、SBAS 衛星が利用している、1,525 ~ 1,559MHz と帯域が隣接している、上がり 1447.9 ~ 1462.9MHz、下り 1495.9 ~ 1510.9MHz の、バンド 21 と呼ばれる周波数帯域を NTT ドコモが使用しているため、一部のメーカーの受信機や、アンテナの組み合わせにより帯域外干渉によって十分な測位精度が得られないケースが報告されています。

帯域外干渉は、GNSS 受信機だけでなく、RF 信号を受信するすべての機器において、さまざまな問題の原因となっています。一定の帯域外にある信号パワーの大きい信号からの電波干渉への対処方法は、1990 年代から携帯電話、テレビチューナ、無線 LAN などの信号入力部である、フロントエンドにあるアナログ回路で、SAW フィルターが用いられています。表面弾性波フィルターとも呼ばれているこのフィルターは、高周波で、一定範囲の周波数帯域の信号のみを取り出すことができるので、アンテナ、受信機のいずれかに実装することで、帯域外干渉を除去することが可能です。

アンテナ側、もしくは、受信機側に SAW フィルターが実装されていなくても、受信機のフロントエンドで、ダウンコンバート処理、A/D 変換処理後に、デジタル化された波形データに対して処理を行うことにより、一定範囲の周波数帯域に対してさまざまなフィルター処理を行うことも可能です。受信機の CPU とメモリー負荷がかかりますが、近年、CPU の演算速度やメモリー容量が上がってきているため、音響機器などで実績がある波形データの加工によるフィルター処理が有効な対策となっています。Septentrio 社の受信機には、この技術による電波干渉緩和機能が搭載されています。

8 参考文献

「精説 GPS(改訂第 2 版)」原著 Prataap Misra、Per Enge 測位航法学会訳、正陽文庫、2004 年 12 月

“Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance (Revised Second Edition)” Prataap Misra, Per Enge, Ganga-Jamuna Press, December 1, 2010

「GPS のしくみと応用技術」トランジスタ技術編集部 編集、CQ 出版社、2009 年 11 月

「GPS ハンドブック」杉本 末雄、柴崎 亮介 編纂、朝倉書店、2010 年 9 月

Positioning Error, Navpedia, EESA Website, Retrieved from http://www.navipedia.net/index.php/Positioning_Error#Predicted_Accuracy:_Dilution_of_Precision as of July 16.

"GLONASS 0.2mm Dynamic Calibration", JAVAD GNSS Website, Retrieved from <https://www.javad.com/ignss/products/options/gclb.html> as of July 16, 2016

"StarFire™: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning" by Kevin Dixon, NavCom Technology Inc., Navcom Website, Retrieved from https://www.navcomtech.com/navcom_en_US/docs/download_center/white_papers/current/starfire_global_sbbs_for_sub_decimeter_precise_point_positioning.pdf as of July 16, 2016

海上保安庁ホームページ ディフェレンシャル GPS
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/soshiki/koutsuu/dgps/>

"Orbit Determination with NASA's High Accuracy Real-Time Global Differential GPS System," Muellerschoen, Ronald J., Reichert, Angie, Kuang, Da, Heflin, Michael, Bertiger, Willy, Bar-Sever, Yoaz, Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001), Salt Lake City, UT, September 2001, pp. 2294-2303.

最近のアンテナ技術、手代木 扶 著、通信総合研究所季報 Vol.39 No.4 、pp. 287-297、December 1993

GNSS アンテナ位相特性と PCV 補正、国土地理院ホームページ
<http://www.gsi.go.jp/KOUKYOU/pcvtop.htm>

"Leica GNSS Reference Antennas White Paper", Leica Geosystem Website, Retrieved from http://leica-geosystems.com/-/media/files/products/white%20papers/leica_reference_antennas_whitepaper_tpa_en.ashx?a=en as of July 16, 2016

準天頂衛星の必要性、準天頂衛星システムホームページ
http://qzss.go.jp/overview/services/sv02_why.html

"Review and principles of PPP-RTK methods", P. J. G. Teunissen, A. Khodabandeh, Journal of Geodesy, Publisher: Springer Verlag, 89.3 (2015): 217-240

"PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks", Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Andreas Bagge, Presented at the 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California.

精密単独測位 (PPP) に関する調査・検討・評価、国土地理院ウェブサイト
<http://www.gsi.go.jp/common/000093939.pdf> 2016 年 7 月時点

GPS 測位におけるマルチパス誤差の低減化と高精度測位の可能性について
久保信明、東京大学リポジトリ
<http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/handle/2261/42871>
2005 年 9 月

"PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks", Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Andreas Bagge, Presented at the 18th International Technical Meeting, ION GNSS-05, September 13-16, 2005, Long Beach, California.

新規研究課題提案書、1. 研究課題名: 精密単独測位型 RTK (PPP-RTK) を用いたリアルタイム地殻変動把握技術の開発、<http://www.gsi.go.jp/common/000093905.pdf> 2016 年 7 月時点

Report, PPP-RTK & Open Standards Symposium 2012. Frankfurt am Main, Germany, P.J.G. Teunissen, Retrieved from <http://www.crcsi.com.au/assets/Resources/6f14cd27-33e7-43c8-88f7-0118dc83ee49.pdf> as of July 22, 2016

"Session F2: Precise Point Positioning (PPP) and L-band Services, Compact SSR Messages with Integrity Information for Satellite Based PPP-RTK Service", Rui Hirokawa, Yuki Sato, Seigo Fujita, Masakazu Miya, Mitsubishi Electric, Japan, <https://www.ion.org/gnss/abstracts.cfm?paperID=4051> as of July 22, 2016

"Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern", Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Gerald Boettcher, Christa Schumann, Geo++®, Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH, D-30827 Garbsen, Germany

"Selecting Antennas for GPS/GNSS", Tallysman Wireless, Retrieved from <http://www.tallysman.com/wp-content/uploads/2014/Resources/White-Paper-on-GNSS-Antennas.pdf> as of July 22, 2016

"GPS-704X Antenna Design and Performance". NovAtel Inc., Retrieved from <http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/GPS-704xWhitePaper.pdf> as of July 22, 2016

GPS/GLONASS Antennas and Ground Planes: Size and Weight Reduction

Perspectives, Dr.Dmitry Tatarnikov, Prof. Vladimir Filippov, Dr.Igor Soutiaguine, Dr.Andrey Astahov,, Dipl.Eng. Anton Stepanenko, Retrieved from
http://www.igs.org/assets/archive/04_rtberne/cdrom/Session8/8_3_Tatarnikov.pdf as of Julye 22, 2016

“Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle”, Laurence R. Weill, California University GPS World, April 1997

“A New Level of Accuracy for Differential GPS Mapping Applications using EVEREST Multipath Rejection Technology” Trimble

“Multipath Mitigation Techniques Using Maximum-Likelihood Principle”, Retrieved from <http://www.insidegnss.com/auto/novdec08-sahmoudi-v1.pdf> as of July 22, 2016

“Mitigating Short-Delay Multipath: a Promising New Technique”, Jean-Marie Sleewaegen, Frank Boon, Septentrio Satellite Navigation

「衛星測位システムの現状」河口 星也、DX アンテナ株式会社

「GPS の測位方式(1)」河口 星也、DX アンテナ株式会社

「GPS の測位方式(2)」齊藤 浩治、DX アンテナ株式会社

「GPS の測位方式(3)」齊藤 浩治、DX アンテナ株式会社

「補正データ情報」齊藤浩治、DX アンテナ株式会社

「GPS 測位へ及ぼす電離層、対流圏による伝播遅延効果」千田 克志、DX アンテナ株式会社

「仮想基準点方式を用いた RTK」河口 星也、アンテナ株式会社

「仮想基準局方式を用いた RTK(2)」河口 星也、DX アンテナ株式会社

「広域ディファレンシャルシステム」齊藤 浩治、DX アンテナ株式会社

「精度の決め手“マルチパス”」小神野 和貴、DX アンテナ株式会社

「SA 解除の状況について」齊藤 浩治、DX アンテナ株式会社

「GPS+GLONASS ハイブリッド受信機(1)」茶珎 俊一、DX アンテナ株式会社

「GPS+GLONASS ハイブリッド受信機(2)」鳥本 秀幸、DX アンテナ株式会社

* DX アンテナ株式会社 GPS 事業部は、2003 年 3 月をもって、測位衛星技術株式会社へ業務移転しております。

A	I
APME 40	IGS 観測点 32
B	IRNSS 7
B1 信号 14	L
B2 信号 14	L1 信号 9
B3 信号 14	L2C 信号 9
BeiDou 14	L2 信号 9
Block I 衛星 8	L6(LEX) 信号 15
Block II 衛星 8	M
BSPK 24	MEDLL 39
C	MSAS 7
C/A コード 9	N
CDMA 11	Narrow Collator 39
Compact SSR 37	NMEA 38
D	Ntrip 27
DGPS 9	P
DM アンテナ 41	P (Y)コード 9
E	PCV 補正 43
E1 信号 13	PPP 34
E5 信号 13	PPP-RTK 36
E6 信号 13	PPS 9
EGNOS 7, 12	PRN コード 20
EVEREST 40	PVT 20
F	Q
FDMA 11	QZSS 7, 14
Fix モード 33	R
Float モード 33	RINEX 31, 38
G	RTCA 26
GAGAN 7	RTCM フォーマット 24
Galileo 12	RTK 9, 32
GEONET 31	S
GLONASS 10	SA 9
GNSS 6	SAASM 対応受信機 9
GNSS アンテナ 41	SBAS 7
GPS 8	SCIGN レドームアンテナ 42

SSR.....	36
Standard Collator.....	39
Strobe Correlator.....	39
SV 番号.....	20

V

VRS.....	33
----------	----

W

WAAS.....	7
-----------	---

あ

アルマナックデータ.....	20
アンビギュイティ.....	30
アンビギュイティ解決.....	33

い

位相差.....	30
移動局.....	24

え

衛星軌道.....	17
衛星クロック.....	17
エフェメリスパラメータ.....	20
エポック.....	33

か

海上ビーコン.....	25
カルマンフィルタ.....	21

き

基準局.....	30
基地局.....	24
キネマティック測位.....	30

く

グローバル軌道衛星群.....	7
クロスダイポーラアンテナ.....	41
クロックパラメータ.....	21

こ

高周波増幅部.....	38
高精度単独測位.....	34
コード相関部.....	38

コード搬送波間ダイバージェンス.....	21
コードレプリカ.....	20
誤差要因.....	17

し

受信機内部の誤差.....	17
受信点.....	41
準天頂衛星システム.....	14
信号の追尾.....	20
信号の捕捉.....	19

す

スードレンジ.....	17
スタティック測位.....	30

せ

整数バイアス.....	30
-------------	----

そ

相互相関処理.....	20
相対測位.....	17

た

対流圏遅延.....	17
ダウンコンバート.....	38
単独測位.....	17

ち

チョークリングアンテナ.....	41
------------------	----

て

電波感度.....	42
電離層遅延.....	17

と

導体.....	41
特定地域衛星群.....	7
ドップラーシフト.....	19
ドップラ周波数.....	19

な

ナビゲーションメッセージ.....	19
-------------------	----

に	ま
二重位相差 32	マイクロストリップパッチアンテナ 41
は	マルチパスによる誤差 17
パッチアンテナ 41	み
搬送波位相観測データ 32	ミキサ 38
ひ	みちびき 14
ビット反転位置 20	ゆ
ほ	誘導板 41
補強衛星群 7	漢字
	航空用 SBAS 26



GNSS の基本知識
測位衛星技術株式会社

2016 年 7 月 29 日
Version 1.0

GNSS の基本知識

Version 1.0
2016 年 7 月 29 日

発行人

測位衛星技術株式会社
東京都新宿区新宿 6-14-5 松喜ビル 4F
電話: 03-5312-4600
Email: sales@gnss.co.jp
Web: <http://gnss.co.jp>