

# Introduction

## GPSの応用

### ナビゲーション/携帯電話から地上デジタル放送システムまで

GPS受信機は、地上2万kmを飛行する衛星が発射している電波をとらえて、地球上の自分の位置情報を出力してくれます。この電波には、非常に精度の高い時刻情報が乗せられているため、ナビゲーション・システムだけでなく地上デジタル放送システムや携帯電話システムの周波数基準としても利用されています。

「GPS」という言葉を聞くと、カー・ナビゲーションを思い浮かべる人が多いかもしれませんが、以前は、初めて訪れた地域を移動しながら、助手席で地図を広げて必死に進行方向を案内したものです。道を間違えることもしばしばで、そのうち運転手が怒り出したりしたものです。

小型の液晶ディスプレイに現在地付近の地図とともに自分の位置を表示してくれるカー・ナビゲーションは、今や標準的なアクセサリになり、そのような光景が見られることは減りつつあるのでしょう。

## 1

## GPSとは

### ◆ 米国が開発した全地球測位システム

GPSは、Global Positioning Systemの略で、衛星を使った測位システムの一つです。測位システムの一般名称は、GNSS(Global Navigation Satellite Systems)で、「全地球測位システム」と訳されます。

GNSSは、地上約2万kmのところを飛んでいる衛星からの電波に乗せられた時刻情報を受信し計算することで、地球上における位置(緯度、経度、高さ)を知るこ

とのできるスケールの大きなシステムです(図1)。

GPSは米国が開発したGNSSです。GNSSにはGPS以外に、ロシアのグローナス(GLONASS)、欧州のガリレオ(Galileo)といった測位衛星システムもあります。現状、この分野では米国のGNSS、つまりGPSが先行しています。

### ◆ 三つのブロックで構成された巨大システム

GPSの衛星測位システムは、次の三つのブロック(セグメントという)で構成されています。

#### (1) GPS衛星(スペース・セグメント)

GPS衛星は、約2万km上空の六つの軌道に4基ずつ、計24基配置され、約12時間で地球を1周しています。GPS衛星の数は保守や予備の関係で増減します。2009年1月現在は31基で運用されています。

#### (2) 地上管制(コントロール・セグメント)

地上管制は、GPS衛星を監視したり制御したりします。衛星の時刻や軌道が許容範囲を超えないように随時、保守を行っています。

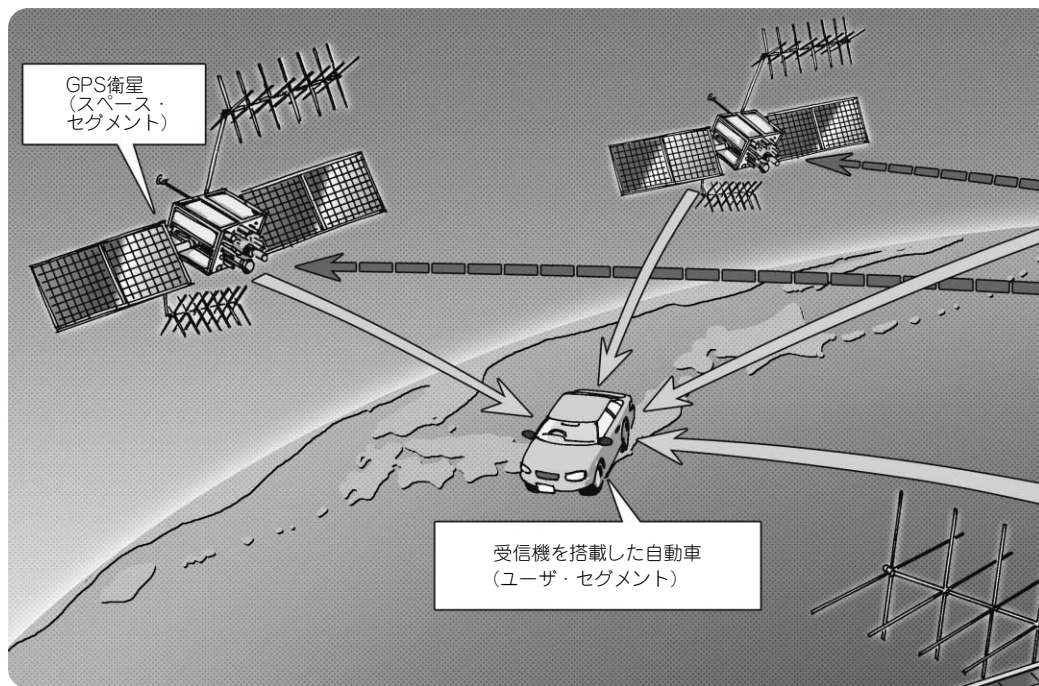


図1 GPS (Global Positioning System) は衛星と地上管制塔が連携した地球規模の巨大システム

## 第 1 章

# なぜ地球上の自分の位置がわかるのか？

世界標準時と位置がわかる地球規模の巨大システム「GPS」のしかけ

GPSシステムの構成や運用のしくみは、とてもエレガントで洗練されたものです。本章と第2章では、できるだけ平易な形で、GPSによる測位の原理や実際の受信機の動きなどについて解説します。

## 1-1

## システム全体の概要

◆ 軍用として生まれた地球規模の巨大システム

GPS関連の民生市場が世界で最初に立ち上がったのは日本だと思います。その

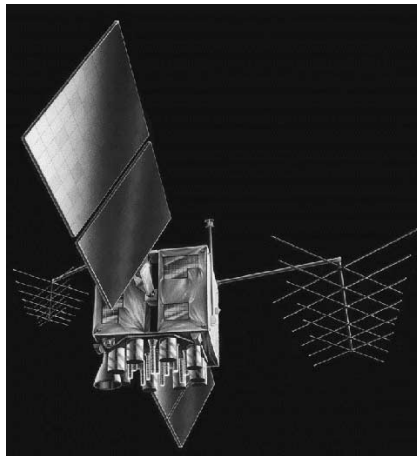


図 1-1 GPS衛星の外観

きっかけは、90年代中ごろから本格化したカー・ナビゲーションであり、さらにそれに続く携帯電話への搭載です。これらの民生市場の立ち上がりとともに、GPSはとても身近な存在となり、GPS関連の書籍も多く出版されています。

GPS(Global Positioning System)は、米国が運用する軍事用の測位システムです。

湾岸戦争のリアルな映像にあったように、もともとは艦船、戦闘機、軍事車両、さらにはミサイルなどのナビゲーションを行う目的で開発された人工衛星(図1-1)が送信する電波を使った航法システムです。

古くは、ロラン、オメガ、NNSSといったシステム(後出の図1-4参照)が、軍事用/船舶用の電波航法システムとして運用されていました。これらの技術や測位原理を踏襲しつつ、さらに高い次元に進化させた、現在もっとも優れた電波航法システムと言えると思います。

### ◆ 三つのブロックで構成される

身近なところでは、携帯電話などの小形の受信機にしかGPSの存在を見ることができませんが、その名のとおりグローバルでとても大規模なシステムです。

GPSは次の三つの要素で構成されています。

- (1) スペース・セグメント(space segment)：衛星系
- (2) コントロール・セグメント(control segment)：地上でGPS衛星をモニタし、GPS衛星が送信するデータを作る制御部分
- (3) ユーザ・セグメント(user segment)：カー・ナビゲーションや携帯電話などのユーザ部

カー・ナビゲーションは何気なく位置情報を表示しているように見えますが、その裏側で、上記(1)～(3)の三つのセグメントが、高度に洗練された形で連携して位置を求めています。

まずはそれぞれのセグメントについて解説します。

#### ① スペース・セグメント

図1-2と表1-1(USCGホームページ <http://www.uscg.mil/>から引用)に示すように、6面の軌道面A～Fそれぞれに4個以上の衛星が配備されており、2009年1月現在で31個の衛星が稼動しています。

高度20183 kmを11時間58分で周回しており、地球の自転を加味すると、同じところに23時間56分後に戻ってきます。

GPS衛星は、L1帯(1575.42 MHz)とL2帯(1227.6 MHz)と呼ばれる二つの周波数で航法用の信号を送信しています。L2帯の信号は長らく軍事用の信号しか送信されていませんでしたが、GPSの近代化計画のなかで、このL2帯の民生開放が決定

## 第2章

# GPS受信機のハードウェア

## 高周波回路とCPUの混載モジュール

本章では、実際の受信機を例に、受信機を構成する回路ブロックの働きと動作を説明します。GPS受信機はアンテナ、増幅回路、フィルタ、RF IC、ベースバンドICなどで構成されています。

表2-1にGPS受信モジュールGN-80(写真2-1)主な仕様を示します。GPSの衛星信号は、L1帯(1575.42 MHz)とL2帯(1227.6 MHz)の2波で送信されています。L1帯には民生用コード(C/Aコード)と軍用コード(Pコード)が乗せられています。GN-80は、この民生用コードだけを使用するSPS(Standard Positioning Service)に対応しています。

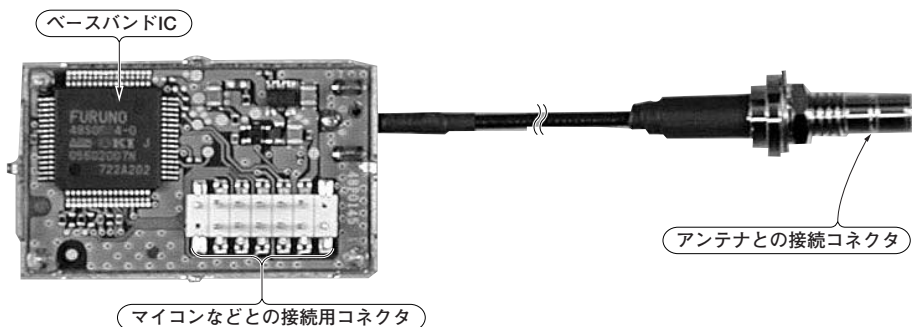


写真2-1 本章で題材にした実際のGPSモジュール(GN-80, 古野電気)

表 2-1 本章で題材にした実際のGPSモジュール(GN-80)の仕様

項目	仕様
受信周波数	1575.42 MHz
受信コード	C/A コード
チャンネル数	16 チャンネル, パラレル
追尾感度	- 141 dBm
インターフェース	3.3 V, CMOS
データ・フォーマット	NMEA0183
出力更新周期	1 秒
1PPS 出力	1 秒 UTC 同期パルス
電源電圧	DC3.3 V
消費電流	64 m ~ 48 mA

## 2-1 受信機のブロック図

図 2-1 に示すように、GPSの受信機は次の三つのブロックから構成されています。

- アンテナ
- RFブロック
- ベースバンドIC

RF回路とベースバンド回路はIC化が進み、TCXO、SAWフィルタなどの機能

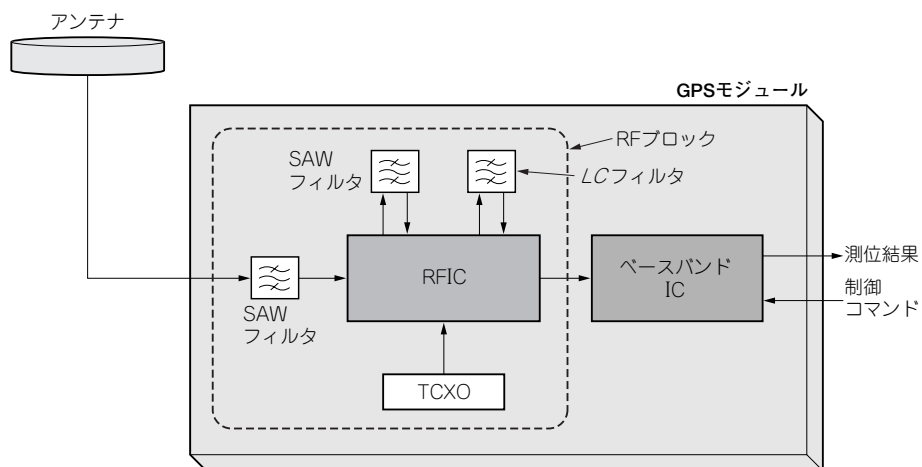


図 2-1 GPS受信機はアンテナ、RFブロック、ベースバンドICの三つで構成される

## 第3章

# 受信データの中身と 現在地の算出方法

## GPS時刻や衛星の健康状態がわかる

GPS受信機は複数の衛星から「航法メッセージ・データ」を受け取ります。このデータには、GPS受信機の位置の算出に必要な衛星の軌道データや各種補正データが含まれています。ここではGPS受信機の位置の算出方法や航法メッセージ・データの構成について解説します。

GPS受信機は、3基以上のGPS衛星が送信した電波を受信して、時刻と現在位置を測定する装置です。この装置はカー・ナビゲーション・システムに広く利用され、車の位置を地図上に表示する目的に利用されています。

本章では、位置を計算するために必要な疑似距離の測定方法や航法メッセージ・データの内容について解説します。

### 3-1 GPS受信データの復調

#### ◆ GPS受信機の構成

図3-1に示すように、GPS衛星から送信された電波は、一般にロー・ノイズのプリアンプ(LNA)を内蔵したGPSアンテナで受信します。受信された信号は、GPS受信機内部のLNA(高周波増幅器)で増幅され、一般の無線機と同様に局部発振器と混合されて中間周波数(IF)信号に変換されます。

IF信号は中間周波数増幅部で増幅され、A-D変換器を通してデジタル信号となります。このA-D変換器は、1~2ビットのデジタル信号に変換するものが一般に使用されています。

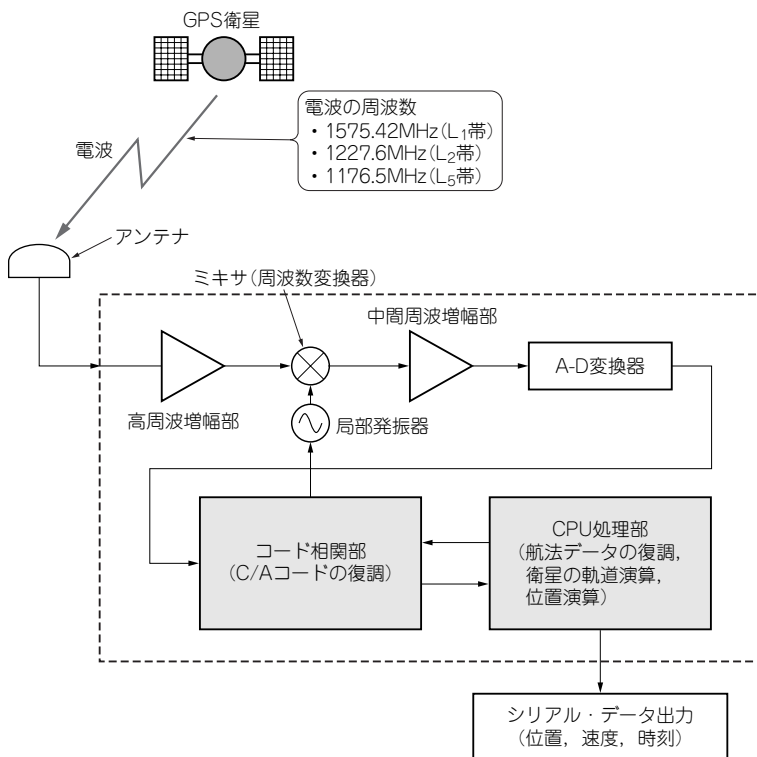


図3-1 GPS受信機の内部構成

デジタル化した信号は、1.023 MHzの周波数で1023個の乱数(疑似ランダム・コード)で構成されるC/Aコードです。主にハードウェアで構成されたコード相関部で各衛星固有のC/Aコードと比較され、コード復調が行われます。各GPS衛星には衛星の登録数の1～32までの固有のコードが割り振られています。

C/Aコードを復調すると、C/Aコードで180°位相反転された航法メッセージ・データが現れます。この復調はCPU処理部で行います。この航法メッセージ・データには、GPS受信機で位置の算出に必要な衛星の軌道データや各種補正データが含まれています。

#### ◆ キャリア信号とC/Aコードの関係

C/Aコードの変調波形の例を図3-2に示します。

L<sub>1</sub>帯のGPS電波のキャリア周波数1575.42 MHzで、各GPS衛星固有のC/Aコー

## 第4章

# 数mm～数cmの 高精度測位の方式とそのしくみ

二つの受信機でGHz搬送波の位相差を測定し誤差を除去する

本章では第1～3章で紹介した方法よりも数千倍、精度の高い位置の算出方法について説明します。

## ◆ 1.9 mmの高精度測定が可能

GPSによる測位は、通常使われる疑似雑音コードのC/Aコード以外に、GPS搬送波の位相を利用する方法があります。これは、受信機内部で発生させた信号と受信したGPS信号の搬送波を、図4-1のように比較して位相差を測定するものです。実際の受信機ではGPS信号の位相をロックして追尾し、エポック(サンプリング間隔)ごとに受信機の基準信号との位相差をとり、その変化分を扱います。従って受信機で発生する搬送波は存在しないのですが、便宜上、搬送波の位相比較を考えます。

位相差にはGPS衛星と受信機との距離の情報が含まれているため、複数の衛星との位相差を測定することで、受信機の位置を算出できます。搬送波の位相を利用すると1波長(約19 cm)の1/100程度(1.9 mm)の距離分解能が得られます。C/Aコードの到達時間差を利用する方法(10 m程度の精度)に比べ、約5000倍も高精度です。

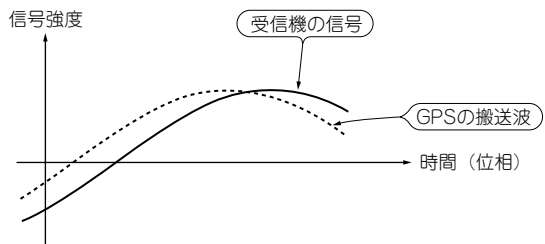


図4-1 受信機の内部信号とGPSの搬送波との位相を比較する

## 4-1 GPSを使った高精度測位のコモンセンス

GPSによる測位には、単独測位と相対(ディファレンシャル)測位があります(図4-2)。

### ◆ 単独測位

単独測位は一つの受信機で測位するもので、GPS電波をスペクトル拡散する疑似雑音コードの伝搬遅れを計測して、GPS衛星からの距離を求めて受信機の位置を求めます。測位精度は10 m程度(2 drms : 95%の測位結果が入る範囲)ですが、航空機や船舶、そしてカー・ナビゲーション・システムに広く用いられています。

### ◆ 相対測位

相対測位は、基準点を設けて基準点の誤差と計測点の誤差は同じと仮定して、基準点の誤差を補正值として計測点に送り、計測点の誤差補正に使用する方式です。従って基準点は動きのない固定点に設置され、補正に用いる基準点のデータは計測点のデータとリンクさせる必要があります。

GPS衛星は地上から2万 km 上空にありますので、基準点と計測点の距離(基線長

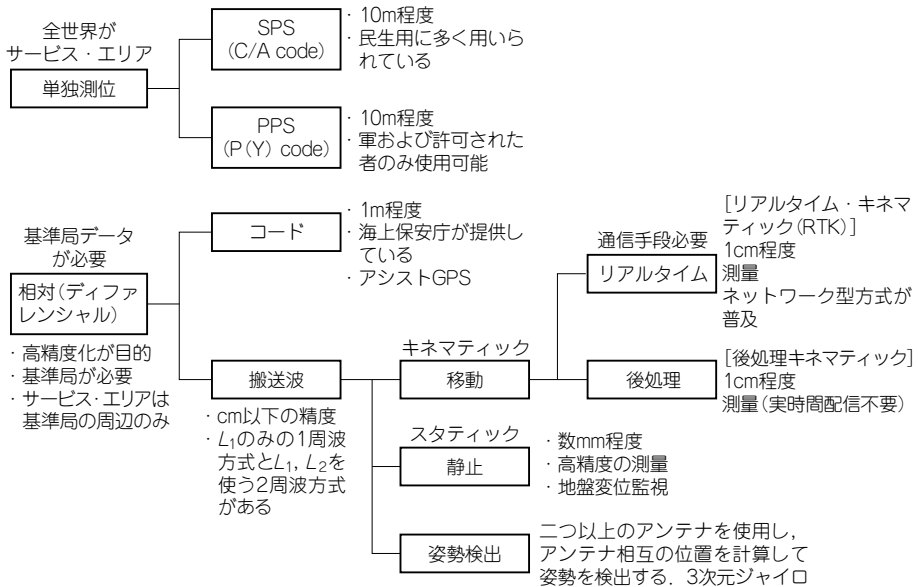


図4-2 GPSによる測位には単独測位と相対測位がある

## 第5章

# 1GHz 高感度 フロントエンドの試作

## GPS衛星の微弱電波を増幅しフィルタリング

高度2万kmの上空から飛んでくる電波は、 $-130\text{ dBm}$ ～ $-150\text{ dBm}$ と微弱です。これを復調用の信号処理ICに渡すために、受信性能の良好なフロントエンドが求められます。

携帯電話、無線LAN、GPS、Bluetooth、WiMAXなど、1GHz以上の超高周波信号を利用したさまざまな携帯型のワイヤレス機器が普及しました。高い周波数を利用すれば、アンテナを小形化でき、携帯性が良くなります。携帯性の良さと移動のしやすさは、どんなワイヤレス機器にも求められます。

ワイヤレス機器の入り口には、アンテナや微弱で周波数の高い信号を増幅する低雑音増幅回路(LNA：Low Noise Amplifier)、搬送波を抽出するBPFなど、繊細なアナログ信号を処理する回路(フロントエンド)が組み込まれています(図5-1)。

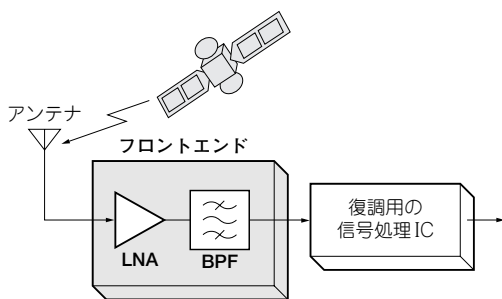


図5-1 ワイヤレス機器のアンテナの後段には低雑音増幅回路(LNA)やBPFなどの高周波アナログ回路がある  
これをフロントエンドと呼ぶ

送信機との距離が大きい場合や、利用者が移動して電波が障害物でさえぎられても通信が途絶えないようにしたい場合には、受信性能の良好なフロントエンドが必要です。

今回は、携帯電話やカー・ナビゲーションに組み込まれている1 GHz以上の超高周波アナログ回路の一つの設計過程をお見せします。取り上げるのは、GPS衛星の送信信号(1.57542 MHz)をアンテナで受信したあとのアナログ信号処理回路(LNAとBPF)です。

## 5-1

## 低雑音増幅回路の試作

### ■ 働き

GPS衛星から送られてくる電波は、とても微弱です。

この信号を安定して受信するためには、アンテナで受信した微弱な信号をアンプで十分に増幅してから、復調用のデジタルICに入力する必要があります。

アンプの設計が悪く、アンプ自体から発生する雑音レベルが増幅後の信号レベルよりも大きいと、受信した信号が雑音に埋もれてしまいます。

アンテナで受信した信号はとても微弱で雑音に埋もれやすいため、雑音の発生が小さいLNAが使われます。LNAで信号を増幅すると、後段に接続されるフィルタやミキサなどで発生する雑音の影響も受けにくくなります。もちろん、復調用のデジタルICにも、高い受信感度を実現するためのさまざまな工夫が施されています。

### ■ 求められる性能

LNAに求められる性能は次の三つです。

- ① 低雑音特性のICやトランジスタを使って低雑音指数を実現すること
- ② ゲインが高いこと
- ③ 入力部のインピーダンス整合が最適であること

### ◆ 低雑音

もっとも大切な性能は低雑音です。指標になるのが、増幅回路で一般的に利用されている雑音指数( $NF$ : Noise Figure)です。

雑音指数は、回路を通過した信号の $S/N$ の悪化量を表します。雑音指数が大きい回路ほど、その内部で発生する雑音が大きいことを意味します。

# GPS用アンテナの試作

## 1.5 GHzの電波を $-150$ dBm超の高感度で捕らえる

カー・ナビゲーション・システムなどに利用されているGPS受信モジュールにおいては、軽薄短小を実現するためにマイクロストリップ・アンテナを用いることが多いようです。ここではマイクロストリップ・アンテナの特性や設計例を紹介します。

GPSのシステムを動作させるためには、はるか上空のGPS衛星からやってくる電波(中心周波数: 1575.42 MHz)をしっかりと受信する必要があります。そのための受信アンテナは、とても重要な設計要素です。ここでは、GPS衛星から送られてくる電波の受信に適したアンテナ特性を調べて試作してみました。

### 6-1 電波の強さとアンテナの要件

#### ◆ 地上に届く電波の強さは理想条件下でも $-132$ dBmと微弱

GPSの衛星は、地球の中心から約25000 km、地表から約20000 kmの高度を飛んでいます。また、その衛星から送信される電波の出力は50 W以下です。50 Wというと非常に大きな送信出力のように思われるかもしれませんが、皆さんの家の近くにある携帯電話の基地局からも同じくらいの出力の電波が送信されています。

皆さんが持っている携帯電話と基地局との距離はせいぜい数kmです。ところがGPSの場合、その1万倍前後の距離から送信された電波が地表付近に届くので、電波のレベルは非常に低くなります。それでは、地表にはどの程度の強さの電波が到来しているのでしょうか。

仮にGPS衛星の送信アンテナのゲイン  $G$  が2倍(理想的な半波長ダイポール・アンテナ比), アンテナの効率  $\eta$  を100%, 送信出力  $P_{TX}$  を50 W, 衛星から地表までの距離  $d$  を20,000 km, GPS衛星が天頂方向(真上)にあり, 大気等での減衰がゼロ, そして地面の影響もないとすると, 地表での電界強度  $E$  [V/m] は,

$$E = \frac{7 \times \sqrt{\eta G P_{TX}}}{d} = \frac{7 \times \sqrt{1 \times 2 \times 50}}{20000 \times 10^3} = 3.5 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (6-1)$$

になります。

GPS衛星から到達したこの電波を, 理想的な半波長ダイポール・アンテナで受信したとすると, 受信電力  $P_{RX}$  は次式で求まる電力  $P$  [W] の1/2になります(GPS衛星からは円偏波の電波が送信され, 半波長ダイポール・アンテナは直線偏波アンテナのため受信電力は1/2になる)。

$$P = \frac{\left(E \frac{\lambda}{\pi}\right)^2}{4R} \dots\dots\dots (6-2)$$

ただし,  $\lambda$ : 受信電波の波長[m],  $R$ : 半波長ダイポール・アンテナの放射抵抗(73.13  $\Omega$ )

GPSの電波の自由空間における波長  $\lambda$  [m] は,

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300000 \times 10^3}{1575.42 \times 10^6} = 0.19 \dots\dots\dots (6-3)$$

ただし,  $c$ : 自由空間における光の速度[m/s],  $f$ : 周波数[Hz]

となり, 従って受信電力  $P_{RX}$  [W] は,

$$P_{RX} = \frac{\left(3.5 \times 10^{-6} \times \frac{0.19}{\pi}\right)^2}{4 \times 73.13} \div 2 = 7.66 \times 10^{-17} \text{ [W]} = 7.66 \times 10^{-14} \text{ [mW]} \dots\dots\dots (6-4)$$

になります。これは非常に小さな電力です。高周波回路で一般に使われている dBm 単位で表すと,

$$P_{RX}[\text{dBm}] = 10 \log_{10}(7.66 \times 10^{-14}) = -131.16 \dots\dots\dots (6-5)$$

になります。

実際, 上記の計算で仮定した条件よりも悪い条件での受信になると予想されるので, 受信レベルはもっと低くなってしまいます。屋内やビルの陰に入ってしまうと, GPS衛星から直接届く電波の受信は期待できず, あちこちで反射して届いた電波の受信になってしまうので, さらに低いレベルになります。そのため, GPS受信機には -159 dBm といった非常に高い受信感度が必要になります。

