

ディファレンシャル GPS ビーコン受信機

(株)光電製作所 設計部 栗村 静男
設計部 小林 研一(現ポジション(株)商品部 部長)

近年、正確な位置が分かっている基準局でGPSの測位誤差を求め、これを補正データとして、他の地点でGPS測位をする利用者にリアル・タイムで送り、その地点での測位値の精度を高めるようにした、ディファレンシャルGPS(以下、「DGPS」という。)は、その有効性が広く認められ、各方面で利用されている。

補正データの伝送手段に、海上無線標識の周波数帯域の電波を利用したDGPSビーコン放送サービスが、世界各地で運用されようとしている。これに伴い、この電波を受信し、補正データをGPS受信機に供給する、DGPSビーコン受信機が急速に普及しつつある。

1.まえがき

1990年、DGPSの標準フォーマットRTCM SC-104の完成を見て、米国沿岸警備隊は、このフォーマットのデータを、既存の海上無線標識の電波で伝送する各種試験を行い、良好な結果が得られたので、1996年の完成を目指して、DGPSビーコン基地局の建設を進めている。現在、米国のほとんどの沿岸が、DGPSビーコン波でカバーされつつある。

一方、欧州においても、各国がそれぞれ、DGPSビーコン基地局の開発を進めていて、多数の局が運用を始めている。

現在、海上無線標識の電波サービス・エリアは、広く世界各地に分布している。これと同様に、DGPSビーコン局が今後次第に増強され、DGPSビーコン波のサービス・エリアも、近い将来、広い地域に展開されていくものと思われる。

このような状況下で、GPS受信機は、RTCM SC-104フォーマットのデータを取り込んで補正計算ができるDGPS対応型GPS受信機へ、既に移行している。これに呼応して、DGPSビーコン波を受信してRTCM SC-104フォーマットのデータをDGPS対応型GPS受信機に送るDGPSビーコン受信機も、急速に普及している。

DGPSビーコン受信機は、広範囲の地域で、補正データを常時正確に受信検出する高感度、高選択度など、高性能な受信特性を有する。さらに、その地域に最適なDGPSビーコン局を自動選局し、データのポー・レート自動設定するなどの高機能を有している。

2.DGPS

2-1 GPS測位の概略

測位の基本は、測位点から各衛星までの距離を正確に測定することと、各衛星の正確な位置を知ることにある。

測位点の高さが分かっている2次元測位では2個の衛

星までの距離から、測位点の高さも同時に求める3次元測位では3個の衛星までの距離から、原理的には位置が計算できる。

距離の測定は、電波が衛星から発射された時刻と測位点に到着した時刻の差、すなわち、その間の伝搬時間と電波の伝搬速度(高速 3×10^8 m/s)の掛け算で求める。

この距離の計算値には、衛星側と受信側との時刻ずれ、伝搬経路による伝搬速度の変化などの誤差が含まれているので、擬似距離と呼ばれている。

衛星の時刻は、原子時計を基にしているもので、極めて正確である。しかし、受信側の時計はそれほど正確ではないので、受信側の時刻を未知数として計算する。そのため、2次元測位では3個の衛星、3次元測位では4個の衛星が必要となる。

2-2 誤差要因

擬似距離は、衛星と測位点間の伝搬時間と伝搬速度から計算される。そして測位は擬似距離と衛星位置から計算されるので、誤差はこれらに関連するものから生じる。したがって、誤差要因は次の項目に大別できる。

- (1)衛星の時計や、軌道の狂いに起因するもの。
- (2)電離層や対流圏など、電波伝搬に関するもの。
- (3)SA(選択利用性：故意に精度を劣化させる機能)によるもの
- (4)受信雑音やマルチパス(電波反射経路)によるもの。

雑音やマルチパス以外の要因による誤差は、同一時刻で、しかも比較的狭い地域内では、いずれの地点でも一定であると考えられる。したがって、一方の誤差で他方の誤差の大部分を相殺できる。これがディファレンシャルGPSの基本原理である。

2-3 誤差補正の方法

当初は、基準局の位置座標と、GPS測位で得られる緯度、経度、高さの誤差から補正值を作り、これを利用者側に送る方法も考えられていた。しかし、この方

法は、データの伝送量が少ない、という長所がある反面、補正データを利用できる範囲が狭い、基準局と利用者側が同一の衛星組合せで測位する必要があるなどの欠点がある。このため、RTCMは、次の方法を採用した。

衛星ごとの擬似距離、時刻、軌道データなどの補正値を基準局から利用者側に送る。利用者側は送られてきた補正データで、利用者側のGPS受信機で得られる、それぞれの衛星について擬似距離、時刻、軌道データ等を補正する。

この方法は、データの伝送量が多いが、次の長所があるので、現在のDGPSはほとんど、これを採用している。

- (1)広い範囲で利用できる。
- (2)受信側の衛星の選択に制限がない。
- (3)補正がより正確である。

3.DGPSビーコン波

3-1 海上無線標識との関係

DGPSビーコン波は、海上無線標識の周波数帯域、285～325kHzと同じ周波数帯域が割り当てられている。

米国における海上無線標識波は、無変調のメイン・キャリアと、変調、符号キーイングの役目をする、1020Hz高い周波数のサブキャリアで構成されている。DGPS波はこのメイン・キャリアを、RTCM SC-104フォーマットのデータで変調するように構成されている。

海上無線標識局のキャリアが利用できない場合は500Hz離れた所に新たに、DGPSビーコン波を作る方法が採られている。このような海上無線標識局と、DGPSビーコン局の周波数関係を表1に示す。

表1 デンマークにおける海上無線標識とDGPSビーコン局の例

局名	北緯度分	東経度分	周波数kHz	サービスエリアn mile	備考
BLAAVANOSHUK	55 43	08 05	296.00	48	
BLAAVANOSHUK	55 43	08 05	296.50	100	DGPS
GEDSER	54 48	12 47	303.50	48	
HALS BARRE	56 06	10 26	299.00	48	
HAMMERODDE	55 18	14 46	289.00	100	DGPS
HAMMERODDE	55 18	14 46	289.50	48	
NAKKEHOVED	56 07	12 21	306.50	48	
SJAELLANOS REV	56 06	11 12	310.50	48	
SKAGEN	57 44	10 35	298.00	100	DGPS
SKAGEN	57 44	10 35	298.50	48	
STEVNS KLINT	55 18	12 28	290.00	48	
SVANEMOEJEN	55 42	12 35	309.00	9	
THYBOROEN	56 43	08 13	306.00	97	

3-2 ボー・レートとMSK変調

電波の占有周波数帯域をできるだけ小さくするため、ボー・レートは低めであり、変調には帯域の広がりの少ないMSK(Minimum phase Shift Keying)変調が採用されている。

データ伝送のボー・レートは、当初、25、50、100、200ボーが予定されていたが、その後25ボーは完全に廃止され、200ボーは限定使用となった。現在運用されているDGPSビーコン局のボー・レートを見ると、ほとんどが100ボーで、一部200ボーの局が見られる。

MSKは、ボー・レートの1ビットごとのデータ、例えば50ボーのときは20msごとのデータが、“0”のときに90°遅相、“1”のときに90°進相するよう、キャリアを直線的に変調する方式である。図1はニューヨークMontauk Point局のDGPS電波を約20マイル離れた地点で測定したスペクトラムである。帯域の広がりが極めて少ないことが分かる。

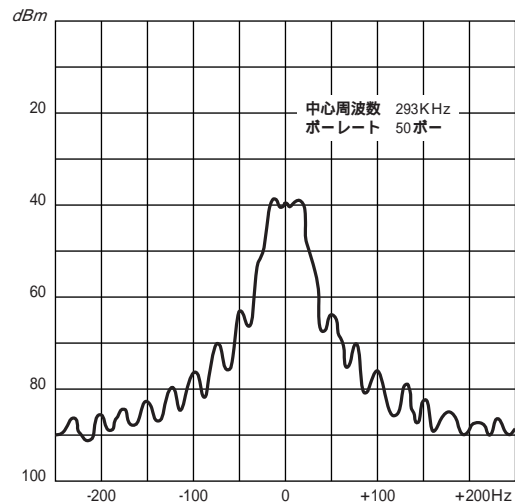


図1 Montauk Pointのビーコン波スペクトラム

3-3 RTCM SC-104標準フォーマット

海上無線技術委員会(RTCM)は、米国運輸省(DOT)、米国沿岸警備隊(USCG)の協力を得て、1983年に特別委員会(SC-104)を発足させ、幅広いDGPSの評価、検討を行い、1994年に現在使用している標準フォーマット2.1版の完成を見た。

メッセージフォーマットは、30ビットで1ワードを構成し、データ量に応じて増減するNワードで1フレームを構成している。各ワードの最終6ビットはパリティ符号に割り当てられ、各フレームは、必ず第1、第2ワードで始まっている。(図2参照)

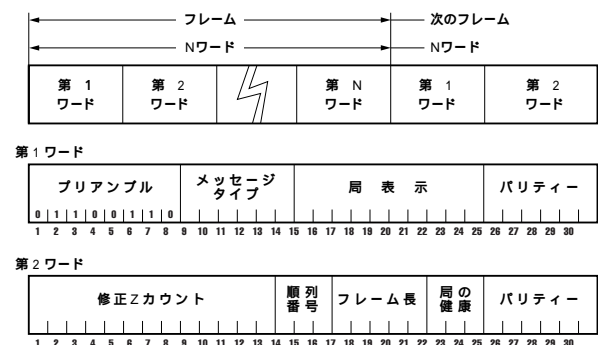


図2 一般的メッセージフォーマット

第1ワードは、プリアンブル(8ビット)、メッセージタイプ(6ビット)、局表示(10ビット)、パリティ(6ビット)、計30ビットで構成されている。プリアンブルは同期のための符号で、66(16進)または99(16進)の固定値を取る。メッセージタイプは、表2に示す型式番号で、第3～第Nワードのデータ内容が、表2のメッセージ内容で構成されていることを示している。また、局表示は局の識別番号である。

第2ワードは修正Zカウント(13ビット)、順列番号(3ビット)、フレーム長(5ビット)、局の健康状況(3ビット)、パリティ(6ビット)の計30ビットで構成されている。修正Zカウントは、補正値の時間の示す計数である。順列番号は、数値0～7を順次表示する。フレーム長は、フレーム中のワード数を示す。また、局の健康は、補正データの信頼度を示している。

表2 型式番号とメッセージ内容

形 式 番 号	メッセージの内容	備 考
1	DGPS 補正值	確定
2	デルタ DGPS 補正值	確定
3	基準局座標	確定
4	測量用パラメータ	廃止
5	衛星の健康	確定
6	ゼロフレーム	確定
7	無線標識アルマナック	確定
8	擬似衛星アルマナック	仮
9	高レート DGPS 補正值	確定
10	Pコード DGPS 補正值	保留
11	C/Aコード L1,L2デルタ 補正值	保留
12	健康メッセージ	仮
13～15	予備	
16	特別メッセージ	確定

4. DGPSビーコン受信機

DGPSビーコン波の周波数は、海上無線標識の周波数帯に重複して割り当てられている。そのため、海上無線標識周波数帯の専用受信機であるDGPSビーコン受信機は、極めて狭い隣接周波数選択度が必要である。また、補正データの変調に、位相偏位が最も少ないMSK変調が採用されているため、データの復調に特殊な考慮が必要であるなど、在来受信機では代替できない特性が要求される。

さらに、この受信機は、ビーコン波で送られてくる補正データを受信復調して、DGPS対応型GPS受信機に送るといふ、補助装置の性格を持っているため、他の受信機より一層の小型、軽量、低コスト化が要求されている。

主な仕様を次ぎに挙げる。

- (a)受信周波数帯域 285～325kHz、500Hzステップ
- (b)受信方式 ダブルスーパーヘテロダイン
- (c)選択度 3dB ± 200Hz以上
33dB ± 500Hz以下
- (d)感度 10 μV/m以下
- (e)検波方式 MSK復調、又はFM検波

(1)受信方式

小型狭帯域フィルタを使用するため、比較的高い周波数に変換し、MSK復調に最適な周波数に再び変換するダブルスーパーヘテロダイン方式を用いるのが一般的である。

(2)感度

感度には色々の表示法があるが、いずれにしても、白色雑音の下で、電界10 μV/mの信号からデータを確実に再生する能力が必要である。

4-1 系統図

装置は、アンテナ・カプラと受信機本体で構成されるのが一般的である。

受信機本体は、RF増幅、第1ミキサ、第1IF増幅、第2ミキサ、第2IF増幅を1チップのICで組み、これに、局部発振回路、復調回路を加えて受信回路を構成し、全体をCPUによるコントローラで制御するのが最近の傾向である。図3に受信機本体の回路系統図を示す。

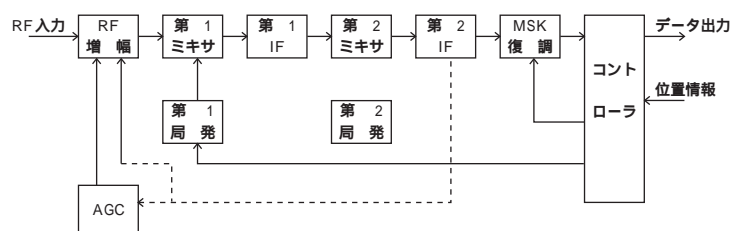


図3 受信系統図

4-2 アンテナ・カプラ

一般のアンテナ・カプラと同様に、避雷器、インピーダンス整合、フィルタ、増幅の回路で構成されている。しかし、次の理由で、他のカプラより厳しい性能が要求される。

海上無線標識周波数帯域の近傍にラジオ放送局があり、これら電波の影響を除去する必要がある。また、DGPSビーコン波は、位相偏位が少ないMSK変調を採用している。そのために、搬送波の位相ゆらぎを起こす混変調、雑音を抑えることが一層重要になる。

(1)整合

アンテナに誘起する受信信号を、電力損失なく後段に伝えることを目的にしているが、実際には次の方法が用いられている。

- (a)整合に関係なく直接受信信号を後段に接続する方法
- (b)高入力インピーダンスのFETを用いる方法

(c)トランスによるインピーダンス変換を行う方法回路の選定には、あらゆる条件下で、後段の増幅を含め、混変調が最小で雑音指数が最良になるよう、総合的に検討する必要がある。

(2)帯域フィルタ

帯域外不要受信信号を除去するためのフィルタである。世界各地の電波状況に対応するには、高性能のフィルタが必要になる。このような場合、インダクタンス素子が最小で済むHPFとLPFの組み合わせで構成することが多い。

通常は、HPFをアンテナ側、LPFを増幅側に接続する。これを逆に、LPFをアンテナ側、HPFを増幅側に接続すると、無シールドのカプラでは、アンテナ・ケーブルに誘起する受信信号が、増幅入力端に直接漏れ込み、フィルタ特性を十分に発揮できないことがある。図4にフィルタ特性の一例を示す。

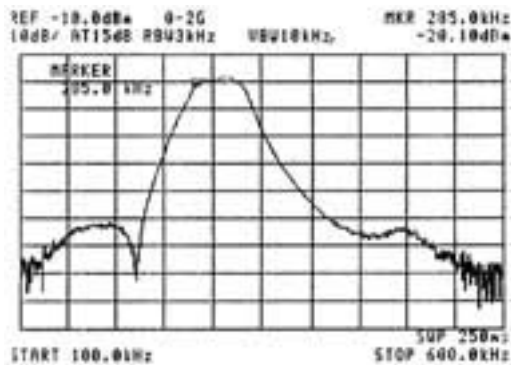


図4 帯域フィルタ特性

(3)増幅

この増幅は、アンテナ・ケーブルの損失補償、アンテナ・ケーブルに漏れ込む雑音の低減などを目的にしている。

また、この増幅は、受信機全体の雑音指数をほぼ決定するので重要である。したがって、増幅素子には、できるだけ低雑音の素子を使用する。実際には大気雑音の関連で決定される。

表3は、海上無線標識帯域内の大気雑音を、ある地点で年間を通して測定した結果である。(雑音帯域100Hz)

入力インピーダンスは、アンテナの整合損失を少なくするため、できるだけ高く設定する。出力インピーダンスは、受信機本体との関係で決定されるが、50オームにするのが一般的である。混変調が少なく直線性の良い回路の選択が重要である。増幅度は、アンテナ(2m)から出力端子(50オーム)までの総合利得が、電圧で約0dB、電力で約30dBにする。

表3 ビーコン帯の大気雑音レベル変化
(帯域幅100Hz)

単位 dB/m(1uV=0dB)

時間	冬	春	夏	秋
0000 - 0400	22	16	27	20
0400 - 0800	20	2	14	17
0800 - 1200	-14	-5	8	-5
1200 - 1600	-10	10	25	5
1600 - 2000	9	18	26	20
2000 - 2400	4	19	26	20

4-3 RF増幅

同調型の増幅回路が使用できれば理想的であるが、最近の受信機は、ほとんどが帯域増幅の形を採っている。DGPSビーコン受信機でも、コストの関係もあり帯域増幅型にするのが一般的である。

(1)入力インピーダンス

アンテナ・カプラとの整合が取れれば、どのような値を用いても良いが、測定などの関係上、通常は、50オームに設定される。

(2)帯域フィルタ

帯域外の不要信号を除去するためのフィルタで、その大部分の減衰は、アンテナ・カプラ側で受け持ち、本体側では補助的減衰を行う。

(3)増幅度

帯域の内外を問わず、すべての受信信号がRF段で飽和しないことが条件になる。したがって、アンテナ・カプラを含めて、RFの利得配分を十分検討する必要がある。飽和した場合、限界レベルにある目的の信号が抑圧されるばかりでなく、その搬送波が位相変調されて、極端にS/Nが劣化する現象がある。

(4)AGC

復調がアナログ処理の場合は、従来と同じ方式のAGC回路が用いられる。また、これとは別に、目的外の受信信号が予想レベルを超えたときの、RF段の飽和防止用として、RF終段信号でAGCを行う方法が考えられる。この場合、目的信号の搬送波に位相ゆらぎが起きないように十分注意する必要がある。

4-4 中間周波回路

第1ミキサ、第1IF、第2ミキサ、第2IFで構成される。

(1)第1ミキサ

第1ミキサの目的は、RF増幅出力信号と、シンセサイザ方式の第1局発信号を混合して、狭帯域フィルタに適合する、比較的高い周波数の第1IFを作ることにある。

混合で発生する多くの不要信号を抑圧するため、

混合器には、二重平衡変調器が用いられるのが一般的である。混合器の出力には、狭帯域フィルタを通して、第1IFが送出される。図5に、狭帯域フィルタ特性の一例を示す。

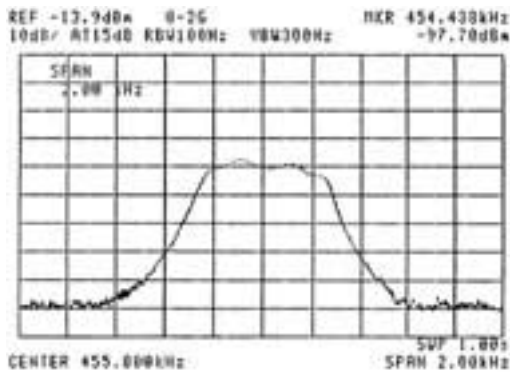


図5 狭帯域フィルタ特性

(2)第2ミキサ

第1IF信号と第2局発信号を混合して第2IF信号を作る回路である。第2局発信号は、シンセサイザ方式の第1局発に用いられている基準水晶発振器の信号を分周して作る。

(3)中間周波増幅

狭帯域フィルタを通過した信号には、不要信号がほとんどなく、混変調など信号を劣化させる要因がないため、増幅は比較的容易である。IFの帯域は狭帯域フィルタに任せ、後は広帯域増幅にするのが一般的である。しかしこの場合には、セット内の雑音を拾い込まないように、また発振気味にならないよう第1IF、第2IFの利得配分を考慮する必要がある。

4-5 MSK復調

MSK復調方式についての、具体的な資料がなかったため、ボー・レート1ビット毎に90°進相、又は遅相する方式のMSK変調の特長を活かした、独自の復調回路を試作し試験した。その結果、測定上ではFM検波方式に比し、S/Nが数dB改善されたが、実際の電波では、ほとんどその差は見られなかった。

ここでは、広範囲の変調方式に対応して、安定に作動するFM検波方式採用のMSK復調回路について述べる。

(1)MSKの周波数偏位

ボー・レート100ボーで、MSK変調の位相が連続進相の状態にある場合を考えてみる。MSKでは1ビット分で90°進相するので、4ビットでは360°進相することになる。言い換えると4ビットで1サイクル周波数が増えることになり、100ビットすなわち1秒間では25サイクル増加する。同様に遅相の場合を考えると、当然25サイクル減少する。

以上のようにMSK変調では100ボーで±25Hz、50ボーで±12.5Hz、200ボーで±50Hzの周波数偏位が生じる。

しかし、MSK変調の周波数偏位量は、通常のFS変調の周波数偏位量に比し極めて小さく、そのままでは、FM検波に適さない。そこで、相対的周波数偏位量を増加させ、FM検波を可能にする方法として、搬送波を低い周波数に変換する方法が採られている。

(2)FM検波回路

図6は、フェーズ・ロック・ループ(以下、PLLという)ICMC-14046Bを用いた、PLLによるFM検波回路である。図において、5kHzに周波数変換された第2IFの周波数が25Hz増加すれば、位相コンパレータの出力電圧が上がり、電圧制御発振器(以下、VCOという)の周波数が25Hz増加する。また、IFの周波数が25Hz減少すれば、位相コンパレータの出力電圧が下がり、VCOの周波数が減少するように動作する。したがって、位相コンパレータの出力電圧をR3、R4、C2のロー・パス・フィルタで平滑させた信号は、そのまま変調データの波形になる。このFM検波器は、電源の安定化に留意すれば、VCOの発振時定数R1、R2、C1を適当に選ぶことで、±5Hz以下の周波数偏位にも、十分対応できる能力を有している。

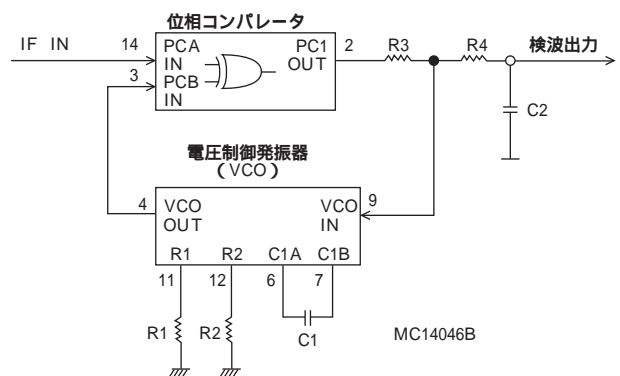


図6 PLLによるFM検波

(3)波形整形回路

S/Nが悪い状態では、波形に割れなどを生じ満足な復調データが得られないことがある。このような場合、積分回路を用いるのが一般的である。積分時定数を大きくすれば、波形整形の効果が大きくなるが、大きくすると波形の位相遅延を生じ満足な結果が得られない。そのため本試作では、ボー・レート1ビット分以下の時定数を持つ積分回路と、インバータなどを組み合わせて、回路を多段接続する方法で良好な結果を得ている。

4-6 コントローラ

コントローラの処理内容は、DGPSビーコン受信機の機能が、ビーコン波で送られてくる補正データを受信復調して、そのデータをGPS受信機側に送るだけの単純なものか、GPSセンサにも適応できる機能まで持ったものかによって異なってくる。

しかし、ビーコン波を受信するための受信周波数の設定、MSK復調に必要なポー・レートの設定、復調補正データをGPS受信機へ送るためのデータ形式に変換、などの処理内容は共通している。

また、DGPSビーコン波は、補正データの他に、隣接するビーコン局のデータ(ビーコン・アルマナック)を放送している。コントローラ部は、このビーコン・アルマナックを記憶しておき、GPS受信機からの位置情報によって最適なビーコン局を設定する役目も持っている。

(1)受信周波数の設定

受信周波数の設定は、コントローラ部からリセット信号、周波数データ、及びクロックをシンセサイザ方式局発部に送り、局発の周波数を設定する。

(2)ポー・レートの設定

復調回路、信号処理回路などの動作を最適にするため、送られてくる補正データのポー・レートに合わせて、受信機内のポー・レートを設定する。

(3)データ出力

DGPSビーコン受信機から、GPS受信機へ送るデータの形式については、8ビットのデータを300～9600ポー(一般には4800ポー)で送るよう、RTCMによって決められている。

図7に示すように、50～200ポー(一般には100ポー)で連続的に送られて来る補正データを、コントローラ部で6ビットずつ取り出し、先頭に2ビットの専用コード"01"を付加して8ビットのデータを作る。

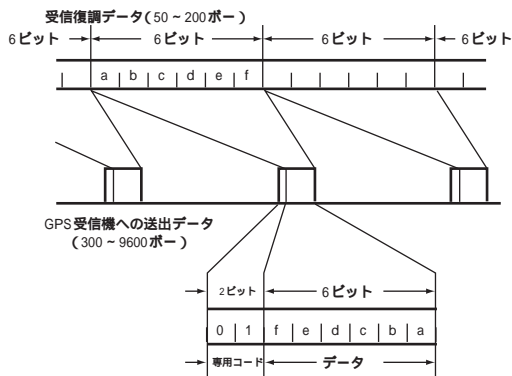


図7 データ変換フォーマット

5.あとがき

現在、DGPSビーコン受信機が急速に普及している。しかし、各機種の詳細な内容までは明らかになっていない。本稿では、KBR-90DGPSビーコン受信機の試作、試験で得られた経験をもとに、DGPSビーコン特有の事項を重点に取りまとめた。

今後、DGPSビーコン受信機は、その性質上、益々、小型、低コスト、高性能が要求されてくるものと思われる。これを実現するには、シンセサイザ方式局発小型化、要求を満たす狭帯域フィルタの採用、効率的なMSK復調回路の設計、合理的コントローラの構成などの開発がポイントになるものと思われる。

6.謝辞

関連資料を提供して下さったNAV設計グループ長、藤野輝久参与、デジタル部についてご助言を頂いたソフトグループ、大沢不爾男部長、執筆にご協力下さったNAV設計グループ、三井田幸広氏に深く感謝します。

参考文献

- 1)衛星測位システム協議会編：GPS導入ガイド、日刊工業新聞社(30、10、1993)
- 2)Coverage Prediction of DGPS Radio - Beacon System;Dorothy C.Poppe, Dr.Mark D.Searle;University Wales

出典

光電技報第11号 平成7年5月
(株)光電製作所 多摩川事業所出版