



スペクトル拡散通信と測位への応用

Spread Spectrum Communication and Its Application to Positioning System

中川正雄*, 長谷川孝明**
Masao NAKAGAWA Takaaki HASEGAWA

Key Words: Electronics, Communication, Spread Spectrum, Positioning System, GPS

1. はじめに

半導体技術やプロセッサ技術に支えられて近年の通信技術の発展はめざましいものがある。その特徴は従来のアナログ通信からデジタル通信への移行にある。デジタル通信には大別して、狭帯域方式とスペクトル拡散方式がある。現在利用されているデジタル通信のほとんどが狭帯域方式(注1)であり、ここで解説するスペクトル拡散方式は古くは軍事に利用されてきたが、最近では、4章に示すすぐれた特徴から、一般の通信への利用が検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。本解説では、従来の狭帯域方式とスペクトル拡散方式との比較を行いながらスペクトル拡散通信の原理を明らかにし、その応用について述べる。応用の中では機械工学者に関連の深い測位、特にGPS (Global Positioning System) について述べる。

2. 狭帯域方式

デジタル通信における狭帯域方式とは伝送すべきデジタルデータとほぼ同じ周波数帯域かまたはそれより狭い帯域で通信する方式である。この中で最も広く用いられているPSK (Phase Shift Keying) 変調方式を例にして解説する。

PSK 信号は次の式で表すことができる。

$$x(t) = A \sin\{2\pi f_c t + \phi(t)\} \dots \dots \dots (1)$$

$$\phi(t) = 0, \pi \dots \dots \dots (\text{二相 PSK})$$

$$\phi(t) = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2 \dots \dots (\text{四相 PSK})$$

A は PSK 信号の振幅を、 f_c は搬送波周波数を表している。 $\phi(t)$ は位相項を示している。二相 PSK ではデジタルデータを

$$0 \rightarrow \phi = 0 \quad 1 \rightarrow \phi = \pi$$

と言うように、四相 PSK では

$$(0, 0) \rightarrow \phi = 0, (0, 1) \rightarrow \phi = \pi/2$$

$$(1, 1) \rightarrow \phi = \pi, (1, 0) \rightarrow \phi = 3\pi/2$$

と言うように二つのデータをまとめて一つの位相に対応させる。

最も簡単な二相 PSK のための変調器を図1に示す。二つの位相のみを変化させるので振幅変調器と同じ構成である。四相 PSK 変調器は二相 PSK 変調器を二つ組合わせて構成できる。図2には二相と四相の PSK 信号のパワースペクトルが示されている。二相に比べて、四相は二つのデータをまとめて一つの位相に対応させるので、位相変化速度が半分であり、半分の伝送周波数帯域で済む。しかしながら、隣り合う位相の差が少な

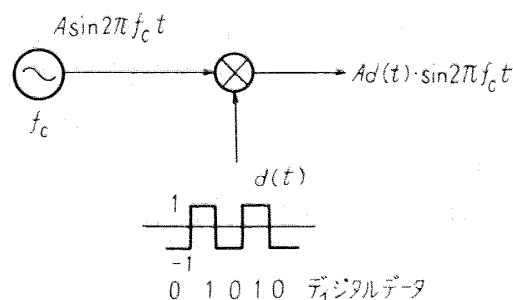


図1 二相 PSK 変調部

* 慶応義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1).

** 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保255).

(注1) ここではスペクトル拡散通信方式と対比させるため、従来の方式をこう呼んでいる。

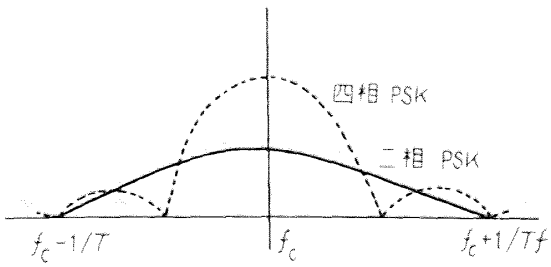


図 2 PSK のパワースペクトル

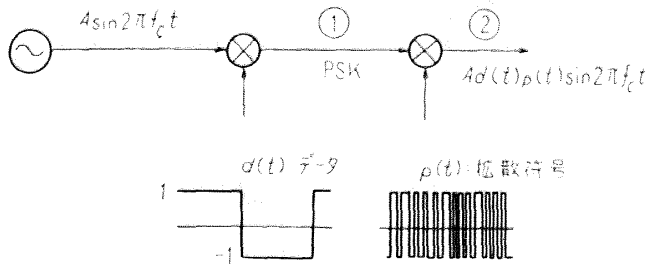


図 3 スペクトル拡散変調部

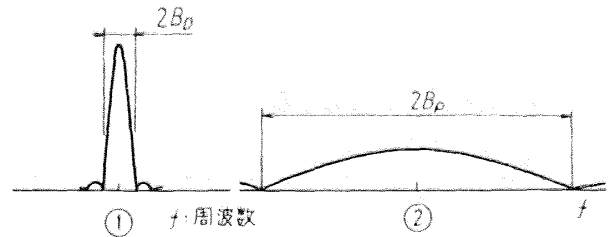
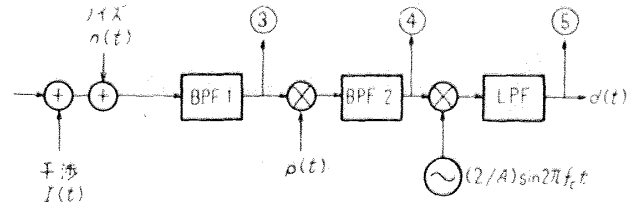


図 4 変調部におけるスペクトル



BPF: Band Pass Filter

LPF: Low Pass Filter

図 5 復調部

いので誤りも生じやすい。一般の衛星通信では四相が多く用いられ、地上無線通信では、位相変化と振幅変化を組合わせた 16 QAM などが用いられている。一般の傾向としては、多相多振幅の狭帯域性を強めた方式が多く使われようとしている。

3. スペクトル拡散通信の原理

従来の狭帯域方式とは全く異なるのがスペクトル拡散方式であり、図 3 は直接拡散によるスペクトル拡散の変調部を示している。左側の部分が二相 PSK 変調部であり、右側の乗算部にスペクトルを拡散するための拡散符号 $p(t)$ が入力される。拡散符号のクロックレート (B_p) はデジタルデータ $d(t)$ のそれ (B_D) の数百倍から数千倍であり、この倍率で元の二相 PSK 信号の帯域が拡散される。図 4 の ① には二相 PSK のスペクトルが、② には拡散された信号のスペクトルが示される。

図 5 には、空間などを伝搬してきたスペクトル拡散された信号を PSK 信号に戻し、更にデジタルデータを復調する手順が示される。BPF 1 (帯域通過フィルタ) を通過した信号は、受信された拡散符号に同期した拡散符号と掛け合わされて二相 PSK 信号に戻り ④、これにやはり同期した搬送波成分を掛け、LPF (低域通過フィルタ)

で高い周波数成分を除いて、求めるデジタルデータ $d(t)$ が ⑤ に現れる。

3.1 干渉信号の影響 狭帯域の干渉信号が拡散された信号と共に図 5 の復調器に入った場合、その干渉の度合は図 5 の ③ と ⑤ では、⑤ のほうが B_p/B_D だけ改善されている。 B_p/B_D は数百から数千のオーダであり、これを拡散利得と呼んでいる。これを高めれば干渉波を抑圧できるが帯域は広がっていく。

3.2 拡散符号 擬似ランダム信号、その中でも M 系列符号が広く用いられている。M 系列符号の周期 T_0 は $2^n - 1$ に比例し (n は整数) 符号が ± 1 の値をとるとすると、 $n = 5$ における自己相関関数

$$R_{pp}(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} p(t)p(t+\tau) dt \dots\dots (2)$$

$\{T_0 = (2^n - 1)T$ (T : 1 クロックの時間長), $1/T$ は拡散符号のクロックレート}

は図 6 のようになる。周期ごとに鋭いピークが生じ、ピークとピークの間はほぼ零に近い値である。

4. スペクトル拡散通信の特徴

4.1 多重通信 同一の伝送路を用いて複数の通信を行うことを多重通信と呼ぶ。狭帯域方式では、異なった周波数を用いたり、異なった時間

スロットを用いて多重通信が成されるが、本方式では同一の周波数及び時間帯を用いて多重通信が可能である。それには互いの相互相関の低い拡散符号 $p_1(t), p_2(t), \dots$ を用意する必要がある。

4.2 秘話性 図5に示されたように受信側では送信された拡散符号と同じ符号を持たなければならない。拡散符号として擬似ランダム符号(擬似雑音符号)を用いれば、そのランダムパターンは極めて多数存在して、自己のパターン以外では受信できないため秘話性が保持できる。拡散符号は一種の“Key”的存在である。

4.3 対妨害性, 対干渉性 3.1節で説明したとおりである。以上の4.1節から4.3節の性質に着目し、最近ではコードレス電話、移動ロボットの通信、LANなどへの応用が検討されている。

4.4 測位への応用 図6の拡散符号の自己相関関数の鋭いピークは、測位に利用されている。測位をしながら、同時に通信も可能である。詳細は、5章に以降に示される。

5. 衛星による測位システム GPS への応用

スペクトル拡散システムの顕著な応用例の一つにアメリカ国防省が中心となって開発が進められている衛星による測位システムGPSがある。

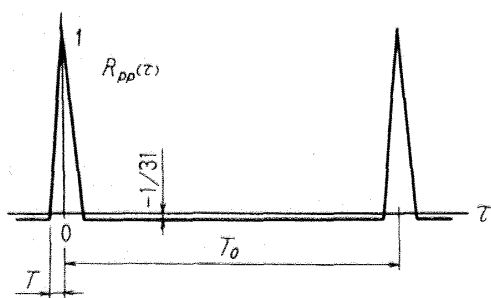
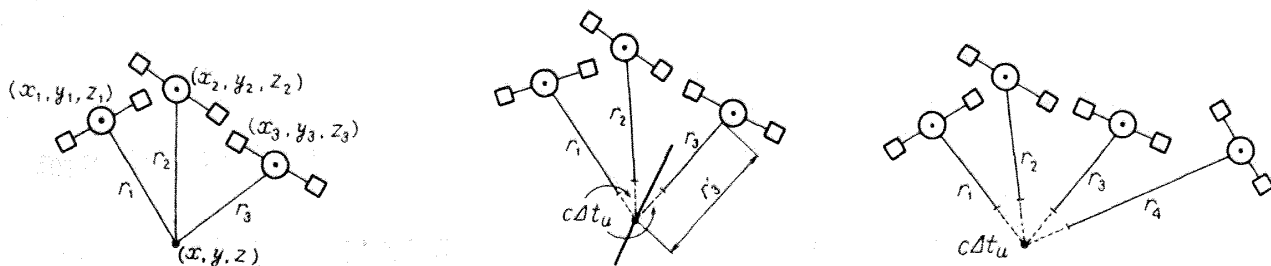


図6 M系列符号の自己相関関数



(a) 正確なシステムの時計があるとき (b) システムの時計を持たないとき (c) 4個の衛星による測位

図7 衛星と受信者の位置

る⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。GPSはGlobal Positioning Systemの略であり、複数の人工衛星からのスペクトル拡散信号を受信することにより、受信者の位置を極めて小さい誤差(十m~数十m)で特定することを目的とするシステムである。航空機、船舶、車両はいつでも、どこでも、高精度で測位することを要求されるが、これらの条件すべてを基本的に満足する画期的なシステムとしてGPSは期待されている。初期には軍用に開発されたものであるが、このシステムの一部を民間に解放する決定がされている。船舶及び航空機の位置決めシステムとしては実用化段階を迎えつつある。

5.1 測位原理 今、3個の衛星及び受信者が、正確に同期した時計を持っていると仮定しよう。また、3個の衛星は、それぞれ別の擬似雑音符号でスペクトル拡散された信号をその時計に合わせて送信しているとし、衛星の位置 (x_i, y_i, z_i) ($i=1, 2, 3$) は図7(a)のように正確に分かっているものとする。位置 (x, y, z) にいる受信者は各衛星からの信号中の擬似雑音符号の位相を検出することにより、伝搬遅延時間 Δt_i ($i=1, 2, 3$) を求めることができる。光速 c を掛けることにより距離 r_i は、

$$r_i = c\Delta t_i \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots (3)$$

となる。各衛星の位置 (x_i, y_i, z_i) を中心として、半径 r_i の三つの球面の交点 (x, y, z) が求める受信者の位置となる。つまり、

$$\left. \begin{aligned} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 &= (c\Delta t_1)^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 &= (c\Delta t_2)^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 &= (c\Delta t_3)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

の連立方程式を解くことに帰着する。

以上は、3個の衛星と受信者が、正確に同期した時計(以後、システムの時計と言う)を持つことができると仮定した上での話であった。しかし

ながら、現実的には受信者の時計を衛星のものに同期させることは極めて難しい問題であり、コスト面からも不可能であると言える。そこで今、受信者の時計が Δt_u だけシステムの時計より遅れているものと考えよう。距離 r'_i と観測値 Δt_i の関係は

$$r'_i = c(\Delta t_i + \Delta t_u) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。この時図 7 (b) から明らかなように半径 r'_i の円の交点は Δt_u が変化する (未知である) ことにより一点にはならず、直線となる。そこで、4 個めの衛星が必要になる。この Δt_u をパラメータとした直線と半径 $r'_i = c(\Delta t_i + \Delta t_u)$ の円の交点より受信者の位置 (x, y, z) 及び Δt_u が求まる訳である。つまり、式 (4) に対応した式として、式 (6) の連立方程式があげられる [図 7 (c)]。

$$\left. \begin{aligned} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 \\ = [c(\Delta t_1 + \Delta t_u)]^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 \\ = [c(\Delta t_2 + \Delta t_u)]^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 \\ = [c(\Delta t_3 + \Delta t_u)]^2 \\ (x-x_4)^2 + (y-y_4)^2 + (z-z_4)^2 \\ = [c(\Delta t_4 + \Delta t_u)]^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\Delta t_1 \sim \Delta t_4$ は受信者が自分の持つ時計で観測した値であり、 Δt_u 未知のシステムの時計との時間差であることに注意すると、4 個の衛星を用いることによりシステムの時計を知ることのできる訳である。もし、 (x, y, z) が既知の固定点で受信を行った場合、一つの衛星からの信号を受信するだけで、 Δt_u を求めることができるのは式 (6) から明らかである。この方法で連続的に Δt_u を観測し、受信者のルビジウム発信器とシステムの時計の発信器の周波数オフセットを求めた実験報告もある⁽⁶⁾。

以上、まとめて、(1) 衛星は互いに同期したシステムの時計を持ち、それに従い決まった位相で擬似雑音符号を送信 (スペクトル拡散信号を送信) すること。(2) 衛星の位置は正確に分かっていること。の二つの条件が満たされるシステムであれば、 (x, y, z, t) の四つの未知数を持つ四元連立方程式を解くことにより、受信者の位置及び時刻を特定できるということになる。

5.2 システムの概要 5.1 節では、システムの基本的な原理を述べた。ここでは GPS の実際を簡単に述べる。

5.1 節の原理では衛星は互いに同期したシステムの時計で動作しているとしたが、実際には原子時計を同期させる代わりに、オフセット値を測定し、データとして受信者に向けて送信するといった方法をとっている。GPS では $c\Delta t_u$ だけ異なる距離の測定値を擬似距離と呼ぶ。衛星 i に対する擬似距離を r_i とし真の距離を r_{it} とすると次式が成立する。

$$r_i = r_{it} + c\Delta t_{at} - c\Delta t_u - c\Delta t_{si} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 Δt_{at} は電離層と対流圏における電波の遅延時間であり、 Δt_{si} は衛星 i の時計の時間オフセットである。遅延 Δt_{at} は搬送波の周波数 f_c の二乗の逆数に比例することから、2 種の搬送波を用いる場合には衛星から送られてくる補正用の気象データにより Δt_{at} を予測する。衛星の時計の時間オフセット Δt_{si} は先に述べたように衛星から送られてくるデータにより計算を行う。

以上は時間的な誤差に対する補正の問題であった。次に衛星の位置の誤差に対する問題を述べる。

GPS ではだ円軌道を持つ移動衛星を用いるが、地域の重力場の不均等などにより、完全なだ円軌道から外れる。この場合衛星の位置 (x_i, y_i, z_i) を補正する必要が生じるが、この補正值のデータもやはり、衛星から送信される。

以上で、衛星が測距のための信号である擬似雑音符号を送信すると同時に、この符号にデータを乗せてデータ伝送も行っていることを述べた。

さて GPS ではこのような衛星が最終的に 18 個打ち上げられることが予定されているが、現在のところ利用できる状態にあるのは 1/3 程度である。このため、4 個以上の衛星を同時に利用できる時間は限られたものとなる。また、4 個以上の衛星を同時に利用できてもこれらが同一平面上にある時は、3 個の時と同じ結果となる。この制約を取り除く種々の方法が考えられている。以上からも分かるとおり、すべての衛星の軌道の把握は重要であり、衛星から送られるデータにはその衛星の軌道ばかりでなく他の衛星の軌道情報なども含まれている。

一方, GPS の衛星を制御する地上の制御局も, GPS では重要なシステムの構成要素であることを本節の最後に付記しておく。

5.3 衛星からの送信信号と測定精度 衛星上では, 10.23 MHz の基準周波数の発信器を用い基本的な発振を行っている。ただし, 一般相対性理論を考慮し, 周波数は打ち上げに先立ち, 10.229 999 995 45 MHz と 0.004 55 Hz だけ低く設定を行っている。これの通倍による $L_1=1\,575.42$ MHz, 及び $L_2=1\,227.6$ MHz の二つを搬送波に用いている。すべての衛星で同一の周波数の搬送波を用いることができるのは 4.2 節に述べた拡散符号 (擬似雑音符号) の低い相互相関性による。

一方, スペクトル拡散のための擬似雑音符号としては P コード (Precision or Protect) と C/A コード (Coarse Acquisition) の 2 種がある。P

コードは 10.23 M チップ/s で周期 1 週間の長いコードで, C/A コードは 1.023 M チップ/s で周期が 1 023 チップつまり 1 ms で繰返すコードである。いずれも二つの M 系列の排他的論理和により作られるゴールド符号である。P コードは周期 7 日で, L_1, L_2 の両搬送波で送信され C/A コードは L_2 のみで送信される。先に述べたように L_1, L_2 の両搬送波を用いることにより電離層と対流圏における遅延を知ることができることと, 10 倍のクロック周波数を P コードが持つことに

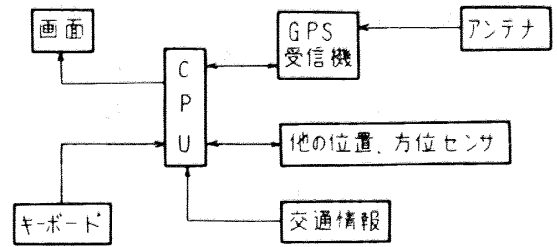
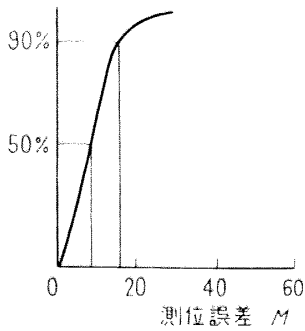
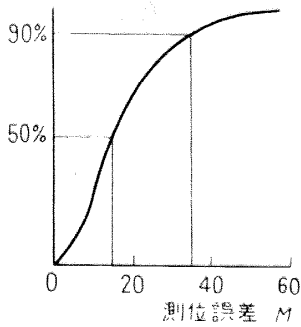


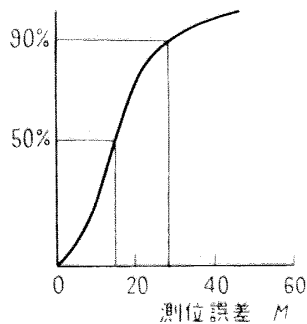
図 9 基本的な自動車用航法システム



(a) 4~5 チャンネル, P コード



(b) 1 チャンネル, P コード



(c) 1 チャンネル, C/A コード

図 8 測位誤差の実験結果⁽⁷⁾

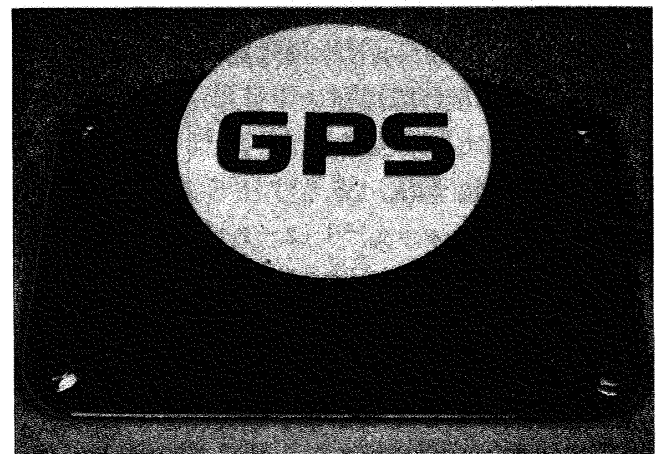


図 10 自動車搭載用アンテナ (日産自動車のご好意による)

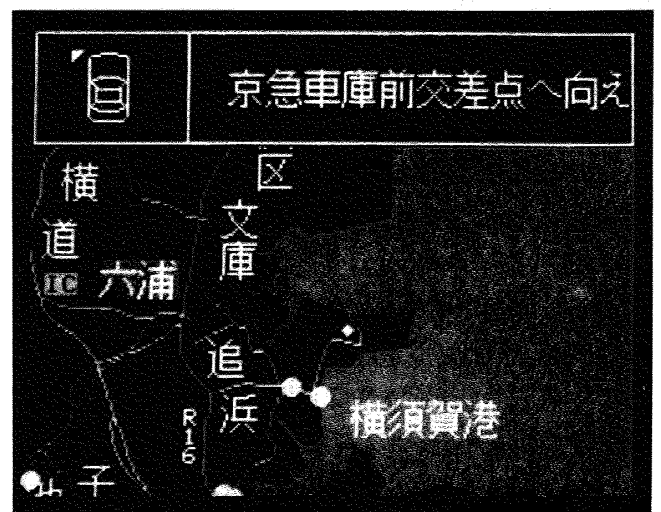


図 11 画面上の地図 (日産自動車のご好意による)

より、Pコードによる測位はC/Aコードのそれよりはるかに高精度の測位が可能である。C/AコードはPコードの補捉用に用意されたものであるが、C/Aコードのみでも測位が可能であり、民間に解放されるのはC/Aコードのみの様である。図8に軍によるGPSの受信試験結果を示す。4~5並列に受信できる受信機でPコードを用いた結果、これを1チャンネルの切替えて行った結果、及びC/Aコードを用い1周波1チャンネルを切替えて行った結果の3種を示す。また、民間会社の製作した受信機によるC/Aコードによる測位の試験結果では誤差、標準偏差共に数m、時速約90kmの走行テストでも約20mのばらつきで受信できたとの報告もある⁽⁴⁾。

5.4 自動車の航法システムへの応用 航海及び航空へのGPSの利用は実用化されつつあるが、これを自動車に用いることが、各社で検討、研究されている。航空機や船舶と違い自動車の場合、都市部を中心に建物などによる電波障害が大きく、必ずしも他の航法システムより有利であるとは言い切れないが、人工密度の小さい地域などでは有効な手段の一つであると言われている。

図9に基本的な自動車航法システムの構成を示す。(1)ピルの谷間やトンネル内ではGPSの電波が届かないこと。(2)また、先にも述べたとおり、衛星の位置により必ずしも24時間測位可能ではないこと。の2点より現在のところGPS受信機と他の位置、方位センサの併用が考えられている。図10にアンテナの例を示す。アンテナで受けた衛星からの信号を解析し、現在の位置を決定する。次に、目的地をインプットすると、図11のような地図が画面に現れ交通情報を考慮した上での最良なコースが示される。ドライバーは音声及び画面の指示どおりに走行していく。次々に変わる位置はGPS受信機により決定され、コンピュータに入力される。曲がるべき交差点の手前で指示されるというわけである。

以上のように5章ではスペクトル拡散通信の応用を測位システムを例にとり紹介したが、このほかにも数々の興味深い応用がある。読者の方にもスペクトル拡散通信に少しでも興味を持って頂ければ幸いである。

今回の執筆に際し、日産自動車中央研究所車両研究所 伊藤敏行氏、谷口正明氏には写真提供、ご助言ご助力を賜わった。ここに慎んでお礼を申し上げる。

(原稿受付 昭和61年2月21日)

文 献

- (1) Dixon R. C., *Spread Spectrum Systems*, (1976), John Wiley & Sons; (邦訳はジャテック出版より、立野ほか2名)
- (2) Simon M. K., ほか3名, *Spread Spectrum Communications*, 1-3 (1985), Computer Sci. Press.
- (3) 木村, NAVSTAR/GPSの展望, 電波航法, No.26 (昭55), 23.
- (4) 中村・ほか7名, GPS航法装置の評価試験, 信学技報, 84-221 (SANE 84-32) (昭59), 31.
- (5) 藤田・ほか3名, GPS/タイムトランスファ受信機の開発と実験, 信学技報, 84-130 (SANE 84-20) (昭59), 25.
- (6) Spilker J. J., *GPS Signal Structure and Performance Characteristics*, *J. NAVIGATION*, 25-2 (1978), 121.
- (7) 木村, 航法システムシンポジウム資料, 衛星航法システム, (昭60-2), 83.