衛星テレビ放送を用いた測位システム

朱 萍*・安田 明生**・山下 晃司**・川村 雅志**

Positioning System Using a Satellite TV Broadcasting

Ping ZHU, Akio YASUDA, Kohji YAMASHITA
and Masashi KAWAMURA

Abstract

The result of our experimental study is reported on a positioning system using a satellite and a ground wave TV broadcastings networks. Being generated by a Rubidium oscillator, the sync pulse of video signal of TV has high stability of 10^{-12} . Thus, it is possible to measure the distance from sources to the reception points quite accurately. The positioning experiment, carried out on a ship steaming around Tokyo and Sagami Bays, shows that a high accuracy positioning is feasible, with an error range of no more than 10-20 m. The present method of positioning can be applied on all over the Japanese Islands and their surrounding coastal seas. The experiment could be considered to be a simulation using two geostationary satellites, if we regard a ground wave source as a pseudo satellite.

1. ま え が き

移動体の位置の決定方法には船舶用に古くから地上局からの電波を用いたロラン、デッカ、オメガ等があり、現在でも広く利用されている。最近では人工衛星からの電波を用いた GPS システムが高精度の測位システムとして、これらにとって替わろうとしている。しかしながら、GPS は米軍の管理下にあり、戦略的要請からいつでも意図的に精度を劣化させることができることから、なんらかの形のバックアップシステムを構成する必要があるというのが、最近の世界的な共通認識である。

国内における静止衛星を使った測位システムの基礎実験としては、ETS-V を用いた通信システムを活用して、可能性の検証と精度評価がなされている⁽¹⁾。また最近では ETS-V とインマルサットを使った測位実験の報告もなされている⁽²⁾⁽³⁾。その他にも GPS のバックアップシステムとして、静止衛星を用いる測位システムの提案がなされている⁽⁴⁾。米国では、RDSS や OMNI-TRACS と呼ばれる静止衛星を用いた測位・通信システムが実用化され、測位精度改善や通信における容量の拡大等に関する研究を進めながら、ユーザー拡大の努力を行っている⁽⁵⁾。これらのシステムは、測位に通信という付随システムを付加して、衛星の活用を拡大しようとするもので、独自に数基の衛星を持ち、システム全体として大がかりなものである。

一方、テレビジョン衛星放送は1987年に本放送が開始され、最近ではそのための高性能受信システムが安価で容易に入手出来るようになってきた。また、移動体上における受信システムに関する研究も、筆者らの船舶用簡易受信システムの開発研究⁽⁶⁾を含め進展を見せ、手軽な装置により船舶、自動車等で走行しながらの受信が可能になってきている。

本研究では、移動体の測位システムに民間用として広く利用が可能な衛星放送を活用するための研究の手始めとして、衛星放送波 (BS 波) と東京タワーからの VHF 地上波を用いた測位システムを試作し、精度評価を行

* 学生会員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

** 正 会 員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

う。さらに、船舶上で東京湾と相模湾上を航走しながら実船実験を行い、実用性についての評価を行う。

この実験は東京タワーを衛星とみなせば、2つの静止衛星を用いた測位のシミュレーション実験とみなすこともできる。

テレビジョンの映像信号を用いた測位システムとしては、TELENAV⁽⁷⁾と呼ばれるシステムが1985年に既に米国で提案されているが、これは地上波のテレビジョン放送網のみを用いるもので、基礎実験の報告がなされているに過ぎない。

2. テレビジョン映像同期信号を用いた測位原理

テレビジョンの映像信号は同期信号として約60 Hz の垂直同期信号と約15.75kHz の水平同期信号、および約3.58MHz の色同期用のカラーサブキャリアを含んでいる⁽⁸⁾。これらの信号はルビジュウム発振器を基準にして作られているので、非常に高い安定度を保っている⁽⁹⁾。また搬送波周波数は地上波では VHF 帯を、また衛星放送では12GHz 帯を用いているので、伝搬経路上での擾乱も少ない。映像信号の高安定度を利用して、遠隔地における標準時計の校正を、高精度に行う研究例がいくつか報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

一方、カラーサブキャリアは $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 程度の、高い周波数確度を持った約3.58MHz の信号が得られるので、標準信号として用いることが出来る。特に「テレビ朝日」と「日本テレビ」では一日中位相がジャンプすること無く送信されているといわれている。

測距パルスとして奇数フィールドの、垂直帰線消去期間中ライン11番目の前の水平同期パルスを抜き取った。このパルスは等化パルス後にパルス間隔が広がる最初のパルスで、見分けやすいので、時間差測定などによく利用される。測距パルスの周期は約(1/30)秒である。

図1は移動体の測位実験概念図である。測位は移動体において、ルビジュウム発振器を基準にして、VHF および BS のテレビジョン映像信号中の測距パルスの到達時間差を測定することにより、それぞれの送信源からの

図1 移動体測位実験の概念図

図2 東京タワーとBSの組合せによる測位可能領域

距離を求め、2本の位置の線の交点を求めることによりなされる。一方、衛星の位置は定点でBSの測距パルスの到達時間を測定することにより正確に監視できる。このとき、基準信号としては、ルビジウム発振器のかわりに、VHF波テレビジョン放送の測距パルスを用いることが出来る。 S_{ss} 、 S_{st} はそれぞれ船舶—衛星間、船舶—東京タワー間の距離で、このシステムでは絶対測定は出来ないで、既知の初期位置を使って求める必要がある。実測される量は図中で Δ の付いた数で、これらの値を使って新しい距離 S_{ss}' 、 S_{st}' が求められる。

図2は東京タワーを中心に30km毎の同心円とBSからの距離の差が30km毎の線を示す。BSからの等距離線の間隔は地表面上では距離間隔の約1.3倍になり、約40km間隔のほぼ平行な直線となる。船のアンテナ高を10mとすると、点線で描いた75kmが東京タワーからの見通し距離である。回折により定常的に測位ができる範囲はほぼ半径90kmの円周内まで広がる。図中において、位置の線の交角 θ の1/2のコセカントは測位精度劣化拡大係数に相当し、測距誤差にこの係数をかけたものが測位誤差の目安を与える。同心円と平行線の交角なので、等しい交角の点を結ぶと東京タワーを中心とする放射線になる。

3. 測位システムの構成

本章では、放送衛星経由のテレビジョン信号および東京タワー経由の地上波の信号を利用して測位を行うために構成した測位システムについて説明する。

データの収集は東京商船大学の実験船「汐路丸」(450トン)および東京商船大学で同時に行った。静止衛星と言えども衛星は漂動しているので、東京商船大学では衛星位置補正のために衛星の漂動を監視している。

図3、図4はそれぞれ「汐路丸」における測位システムおよび東京商船大学の測距システムのブロック図を示す。

図3 「汐路丸」における測位システムのブロック図

図4 東京商船大学における測距システムのブロック図

3.1 アンテナ系

「汐路丸」では、放送衛星からの放送電波は、JRC製の自動追尾アンテナで受信される。アンテナ径は90cmφでレドームに納められている。動揺条件はロール±15°以内、ピッチ±7°以内、旋回±毎秒6°以下、船速30ノット以下である。VHFの電波は無指向性アンテナで受信される。

東京商船大学では、放送衛星から送信される12GHzの放送電波は、直径75cmφのオフセットパラボラアンテナにより、地上局からの電波(VHF)は八木アンテナにより受信される。

3.2 測距パルス抜き取り回路

アンテナにより受信された信号がBSコンバータにより1.3GHz帯のIF周波数に変換され、BSチューナに入力される。そして、BSチューナで復調された映像信号は測距パルス抜き取り回路に入力される。

この回路では映像信号から垂直同期パルスと水平同期パルスを抜き取り、垂直同期パルスの立ち上がりから一定時間遅れのゲートパルスを作り、第11ラインの前の水平同期パルスを測距パルスとして抜き取る。

「汐路丸」で使った水平・垂直同期パルスの抜き取り回路はNECμpc 1377 cIC(カラーテレビの水平・垂直偏向用半導体集積回路)を用いて試作した。東京商船大学では水平・垂直同期パルスは市販のテレビから直接取り、測距パルスを作った。

3.3 時間差パルス発生回路

図3の「汐路丸」における測位システムにおいて、ルビジウム発振器の100kHz発振出力を(3/10010)倍することにより、テレビジョン映像信号の垂直同期信号と正確に同期する約30Hzの基準パルスを作り、これと

VHF-10ch および BS-3ch の測距パルスとの時間差を測定している。ルビジュウム発振器からの基準パルスは単安定マルチバイブレータ (74121) とセット・リセット・フリップ・フロップで構成される時間差パルス発生回路 #1 および時間差パルス発生回路 #2 の start に同時に入力にされる。BS と VHF の測距パルスはそれぞれの stop 入力に加えられ、2 組の時間差パルスが作られ、それぞれのゲートに加えられる。クロック発振器は 60 MHz である。

図 4 の東京商船大学における時間差測定システムでは、VHF と BS の測距パルスは時間差パルス発生回路のそれぞれ start と stop 入力端子に加えられ、時間差パルスが作られる。時間差パルスは 20 MHz のクロック発振器からのクロックパルスと同時にゲート回路に入力される。VHF-10ch の測距パルスを基準にして BS-3ch の遅れ時間を測定している。ここで VHF の測距パルスはルビジュウム発振器の代りの基準発振器として用いられている。

なお、NHK の 1ch および衛星放送を用いなかったのは、番組の切り替え時に位相のジャンプが頻繁に起こり、連続測定には不向きであったからである。但し、衛星の絶対距離の測定は NHK の 1ch および衛星放送で同一番組放送時に行った。

3.4 時間差計数システム

「汐路丸」における時間差計数システムはゲートを通過した 60 MHz のクロックパルスを計数するために 12 ビットカウンタ (F-93 S16 高速カウンタ 3 個) 2 組と二つのパラレル I/O インターフェイス (8255) および汎用パーソナルコンピュータで構成され、(1/30) 秒毎に VHF の時間差と BS の時間差が交互に各々毎秒 15 データずつパーソナルコンピュータのメモリに取り込まれる。

東京商船大学における時間差計数システムでは時間差パルスが長くなって、(1/30) 秒に近付くと stop から次の start までの時間が短くなり、コンピュータの動作時間が不足することになる。そこで、これを防ぐために、データのサンプル周波数は 1/2 の約 15 Hz としている。ゲート回路からの時間差に相当する 20 MHz のパルス列を時間差計数システムに入力する。時間差計数システムは 12 ビットカウンタ (74193 バイナリ・カウンタ 3 個) と 8255 および汎用パーソナルコンピュータで構成される。データパルスはカウンタにセットされ、これをコンピュータに 1 秒間に 15 個の速度で読み込んだ。

4. 実験の過程

実船実験は 1991 年 3 月 5 日～7 日と 3 月 12 日～14 日までの 2 度にわたり、東京湾と相模湾で行った。

図 5 カウント数 (生データ) の時間変化

図5は3月7日の帰りの航海における「汐路丸」と東京商船大学で同時刻に測定された時間差に相当するカウント数の時間変化の様子を示したもので、1秒毎にサンプルした結果である。東京タワーに近付いているのでVHFのカウント数は一方的に減少している。一方、衛星に対しては遠ざかることになるので、カウント数の増大が見られる。東京商船大学の監視データはカウント数が減少し、衛星が接近していることを示している。

「汐路丸」のデータはVHFとBSいずれも1カウントは $(1/60)\mu\text{s}$ で5mの精度で受信点から東京タワーまでと受信点から衛星までの距離変化、それぞれ ΔS_{st} と ΔS_{ss} が測定できる。一方、東京商船大学では $(1/20)\mu\text{s}$ で放送衛星の移動距離 ΔS_{us} の7.5mに相当する。

次に、これらのデータを使って位置を求める方法を述べる。なお、現在のところ東京商船大学と「汐路丸」間で通信回線を持っていないので、実時間の測位は出来ず、データを大学へ持ち帰って刻々の位置を求めた。

図1の移動体の測位実験の概念図において、まず、東京商船大学の衛星監視システムで、VHF-1chとBS-3chが同一番組放送時に互いの時間差 T_{us} を測定することにより、[NHK→東京タワー→東京商船大学]および[NHK→放送衛星→東京商船大学]の伝搬経路の差が求められる。NHK、東京タワーと東京商船大学の互いの距離は衛星までの距離に比べて十分に小さいと考えられるので、衛星までの絶対距離 S_{us} は、 c を光速として

$$S_{us} = c(T_{us}/2) \quad (1)$$

で与えられる。衛星が東経 110° の赤道上空に位置するとして、その高度を H_s とし、地球を半径 r の球体と仮定するとき、東京商船大学の緯度 l_a 、経度 l_o を原点とする衛星の x, y, z 座標は

$$x = -(H_s + r) \sin(l_o - 110^\circ) \quad (2)$$

$$y = -(H_s + r) \cos(l_o - 110^\circ) \sin(l_a) \quad (3)$$

$$z = (H_s + r) \cos(l_o - 110^\circ) \cos(l_a) - r \quad (4)$$

となる。 H_s に適切な値を代入して、 x, y, z を求めて衛星までの距離 l

$$l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (5)$$

を導出する。衛星までの距離変化が高度変化のみによって生じると仮定し、 l と測定で求めた S_{us} と等しくなるように H_s を変化させて繰り返し計算を行い、衛星の絶対高度 H_s を求める。この仮定は厳密には正しくないが、今回の測位位置とモニター地点の距離が衛星までの距離に比べて非常に小さいので、大きな誤差は生じないであろう。また、電離層や対流圏による影響もモニター地点に対するものとほとんど同一と考えられ、その影響は無視できる。ジオイドについてもここでは考慮していない。衛星は絶えず漂動しているから、 T_{us} は周期一日でゆっくりと変動している。そこで、

- ① T_{us} の変動分 ΔT_{us} は衛星監視システムで、基準信号に対するBSの測距パルスの到達時間変化から求められ、東京商船大学と放送衛星間の新しい絶対距離 S_{us}' は

$$S_{us}' = S_{us} + c \cdot \Delta T_{us} / 2 \quad (6)$$

となる。 S_{us}' を用い、衛星の新しい絶対高度 H_s' が求められる。

- ②移動体の「汐路丸」では、デッカで求めた初期位置と先に求めた H_s を用い、(5)式により衛星までの絶対距離 S_{ss} を求める。次に、基準パルスに対するBSの測距パルスの到達時間差の変動値 ΔT_{ss} を用いて、受信点から衛星までの距離変動値 ΔS_{ss}

$$\Delta S_{ss} = c(\Delta T_{ss} - \Delta T_{us} / 2) \quad (7)$$

を求め、衛星までの新しい絶対距離 S_{ss}'

$$S_{ss}' = S_{ss} + \Delta S_{ss} \quad (8)$$

を求めることができる。

- ③初期位置の経度から微少距離差 $\pm \Delta l_o$ の2本の経線上で、高度 H_s' の衛星までの距離が S_{ss}' となる緯度の値を(5)式において l_a を未知数として繰り返し計算により求めて、2点を通る直線を作り、衛星からの位置の線とすることができる。
- ④一方、東京タワーからの位置の線は、初期位置から東京タワーまでの絶対距離 S_{st} を求め、基準パルスに対す

る VHF テレビ信号の測距パルスの到達時間差 ΔT_{st} を測定し、新しい東京タワーまでの絶対距離 S_{st}'

$$S_{st}' = S_{st} + c \cdot \Delta T_{st} \quad (9)$$

を求め、BS と同様に初期位置の経度から $\pm \Delta l_0$ の 2 本の経線上で、東京タワーまでの距離が S_{st}' となる緯度の値を求めることにより得られる。

⑤以上 2 本の位置の線の交点として、新しい位置が求められる。

この位置を初期位置として、①から⑤までの過程を繰り返すことにより、刻々の位置を求めることが出来る。

5. 実験の結果と検討

図 6 は図 5 の測定値を用い、デッカで求めた東経 $139^\circ 47.46'$ と北緯 $35^\circ 15.17'$ を初めの位置として、1 秒毎に位置を求めた航跡図である。浦賀水道を北上し、観音崎沖で左に折れる航跡が描かれている。1 秒間の収集データ数は 15 個であるが、特別の平均操作等を施すことなく、15 個毎にサンプルしたデータを用いて、1 秒毎の位置を求めた。

図 6 浦賀水道付近における測位結果

図 7 定点における測位値の分散 (図の中心が定点)

次に、このシステムの測位精度を調べるために図 3 と図 4 の装置を用い、定点 (東京商船大学) で同様の実験を行った。100 秒間の連続した測位結果を図 7 に示す。実船実験のときと同様に 15 個毎にサンプルしたデータを用いている。表示された点の数は約 70 個で、約 30 個が表示されている点に重なっている。なお、定点の位置は図の中心で、横軸上で 3.0、縦軸上で 3.5 の位置である。

東京商船大学の東京タワーを中心とする位置の線は真北から反時計方向 20° になる。衛星からの位置の線は真北から反時計方向 47° になる。図中に東京タワーからの位置の線に 30m の誤差幅を衛星からの位置の線には 60m の誤差幅を描き加えて見ると、ほとんどの測位点が入っていることがわかる。30m の誤差幅は測距パルスのカウント数のばらつきが最大で ± 3 なので、合理的である。一方、衛星の 60m の誤差幅は衛星からの距離差が地面上では 1.3 倍になることおよび衛星監視のための測距の誤差も同程度であることを考えれば合理的であろう。

しかしながら、船上でのカウント数のばらつきは ± 1 程度だったので、海上では 10m 程度の測位精度が得られていると思われる。海上は陸上より周囲の雑音が少ないからであろう。なお、測位に当たっては、簡単のために、地球を完全球体とみなしていること、およびルビジュウム発振器を完全なものとみなしていることから、この精

度の値はあくまでも相対的なものということになる。

6. ま と め

放送衛星経由のテレビジョン信号および東京タワー経由の地上波信号を用いて測位を行うために構成したシステムと実験の方法、過程、実験の結果について報告した。

東京商船大学における衛星の漂動監視システムは1カウントが $(1/20) \mu\text{s}$ で7.5mの精度で測距することができる。

「汐路丸」における測位システムはVHFとBSいずれも1カウントが $(1/60) \mu\text{s}$ で5mの精度で測距することができる。船上におけるカウント数のばらつきは ± 1 程度だったので、海上では10m程度の測距精度が得られるものと考えられる。

テレビジョンの受信装置はBSを含めて広く普及しており、特別の装置や回路を必要とせず高精度の測位が可能であることがわかった。

送信所は全国に広く分布しているので、地上波の送信源を次々に取り替えることにより、日本全土および沿岸で利用できよう。

実時間での運用のためにはモニタ局との通信が必要であるが、文字放送に衛星情報を載せることができれば、簡単で効果的であると考えられる。

テレビのカラーサブキャリアの約3.58 MHzは周波数の安定度 (10^{-12}) が高いので、これを使えば、さらに測位精度を上げることができるはずである。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、ご助言を賜りました元東京商船大学教授安東平一郎先生および東京商船大学非常勤講師で元電子航法研究所木村小一先生に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 山田多津人他「技術試験衛星V型(ETS-V)を用いた船舶通信実験」日本航海学会論文集第82号, pp. 103~112, 平成2年3月
- (2) 三浦龍他「2つの静止衛星を用いた通信・測位実験—SCPC方式船舶実験中間報告—」信学技報 SANE 91-9, pp. 17~22, 1991年6月
- (3) 木村和宏他「二つの静止衛星を用いた通信・測位実験—SCPC方式実験データ解析中間報告—」信学技報 SANE 91-10, pp. 23~30, 1991年6月
- (4) 横井時彦, 高橋英博「単一静止衛星を用いた移動体測位方式の提案」信学技報, SANE89-25, 1989年8月
- (5) D. F. Long「ジオスター社 RDSS システム及びその実施計画の概要」信学技報 SANE89-21, 1989年8月
- (6) 千葉元, 安田明生他「船舶における衛星放送の受信に関する研究」日本航海学会論文集第81号, pp. 39~48, 平成元年9月
- (7) Will Connolly「TELENAV: A Precision Navigation System Based Upon Television Signal Reception」Navigation, Vol. 33, No. 2, 109~122, 1986年8月
- (8) 日本放送協会編「テレビ技術教科書(上)」日本放送出版協会, pp. 31~49, 1989年
- (9) 「TV 同期パルスとカラーサブキャリアの測定値」電子情報通信学会誌, Vol. 74, No. 9, p. 999, 1991年9月
- (10) 佐分利義和他「TV 信号を利用した時刻と周波数の精密比較」電波研究所季報 18, 99, pp. 433~444, 1972年11月
- (11) 佐々木正巳他「衛星放送経路のテレビジョン信号を利用した時刻の精密遠隔比較」電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J70-B, pp. 489~494, 昭和62年4月

質 疑 応 答

西 周次(電子航法研究所)：(1)汐路丸に搭載しているルビジュウム発振器の安定度はどの位ですか。(2)東京商船大学で測定した衛星漂動のデータは船に送っているのですか。

朱 萍：(1)実験に用いたルビジュウム発振器の安定度は公称 10^{-12} ですが、TV 同期信号と比較したところ一桁弱悪いようです。論文中的実験は短時間ですので、結果には影響はありません。(2)現在のところ、「汐路丸」と大学間では直通の通信回線を持っていないので、「汐路丸」のデータを大学に持ち帰り、衛星漂動監視データを用いながら、刻々の位置を求めました。

濱田悦之(東京水産大学)：相模湾など日本沿岸に点在する UHF テレビ局の電波は利用できるのでしょうか。

朱 萍：UHF も VHF と全く同じ映像信号を用いているので、同様に利用することが出来るはずです。