静止衛星による測位システム－Ⅱ. －VSATによる衛星位置測定システム構成－

樊 春明*・安田 明生**

A Positioning System with Geostationary Satellites－Ⅱ. －Satellite Position Monitoring System by VSAT－

Chunming FAN and Akio YASUDA

Abstract

A simple satellites monitoring system comprising 3 VSAT's is proposed to determine the three-dimensional position of JCSAT-1 communication satellite, locates at 152° on a geostationary orbit and is operated in Ku band. One VSAT is a master at Tokyo University of Mercantile Marine and the rest are slaves at Hokkaido and Kyushu Universities. The range to the satellite from the slave station is observed at the master station every 9.6ms from the arrival time of the range finding pulse of the 31-bit PN series of 64 kbps. It is transmitted from the master station and travels twice between master and slave stations via the satellite. We measure the ranges from three earth stations to the satellite by switching the reception frequency at the master station one by one and deduce the satellite position. The radius of short axis of the 95% error ellipsoid, which represented the distribution of positioning points, was 44m in the present experiment with the ranging accuracy of 2m from the master and 3.2m from slave stations. We also estimated the positioning accuracy with three earth stations at Wakkanai, Naha and Chichi Jima, using the same ranging accuracy. The estimation is also tried of the positioning accuracy on the earth in 3 geostationary satellites system with the satellites monitoring system described here. It shows that the accuracy of less than 20m is attainable in the Japanese Islands and their surrounding waters.

1. まえがき

静止衛星を用いて通信と測位を一つのシステムで行う複合システムでは、衛星の位置を正確に知ることが高精度測位のための必要条件であることは言うまでもない⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。著者らは先に、VSATを用いた衛星までの測距について報告した⁽⁴⁾。結果として、実測で得たデータにおいて測距精度は約 8 m であったが、生データに対する平均処理を行えば、2 m 程度の実時間での測距精度が得られることがわかった。さらに、この誤差をもとにして、衛星位置測定誤差を解析した結果、移動体測位に最も影響のある 95% 誤差楕円体の短軸半径は約 3.2m であった。さらに、2 衛星測位システムにおける日本近海の移動体の位置決定精度を解析した結果では、15m 以下の精度が得られることがわかった。

本研究では、三つの地球局による衛星位置測定システムを想定し、親局において子局から衛星までの距離を測定することによる静止衛星位置の決定法を提案した。さらに、提案したシステムを用いて静止衛星 JCSAT-1 の位置の高精度測定を試みた。この結果、実測して得た衛星位置の三次元分布、即ち 95% 誤差球

* 学生会員 東京水産大学大学院 (〒108 東京都港区港南4-5-7)

**正 会 員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島2-1-6)

及び95%誤差楕円体と、地球局の配置及び各地球局から衛星までの距離測定誤差から解析した衛星位置の95%誤差球及び95%誤差楕円体を比較して、両者がほぼ一致するという結果を得た。

また、測定した静止衛星の位置情報を同衛星に載せて送信し、移動体側は衛星の位置情報を受信し、さらに衛星までの距離を測定することにより位置を実時間で測定するシステムを想定して、移動体測位誤差の解析を行った。その結果、日本付近では20m以下の精度で測位が可能であることがわかった。

2. 衛星位置測定システムの原理

数個の地球局から衛星までの距離測定により衛星位置を決定する場合には、衛星位置を計算するために各々の子局で測定した衛星までの距離データを親局に伝送しなければならないが、本研究では親局で子局から衛星までの距離を測定する方法による衛星位置測定システムを提案した。

実験には東経150度の静止軌道上にある、Kuバンドで運用されているJCSAT-1衛星を使用した。親局は

ODU : Out Door Unit
IDU : In Door Unit

図1 システムの構成

東京商船大学に設置しているVSATである。変調方式はQPSK、データ伝送速度は64kbpsである。子局は北海道大学と九州大学に設置している同じVSATで、受信した信号をそのまま折り返し伝送できるモードに設定した。

図1に三つのVSAT地球局による衛星位置測定システムの概念図を示す。親局から一定間隔で測距データを送信し、送信データと折り返しデータ間の遅延時間から、親局から衛星までの電波伝搬時間 ΔT_M を測定することにより、親局から衛星までの距離を求める⁽⁴⁾。一方、親局から送出された測距データは衛星を経由して子局で中継され、その折り返し信号とともとの信号の時間差 ΔT を測定する。従って、子局から衛星までの電波伝搬時間 ΔT_S は

$$\Delta T_S = \frac{\Delta T}{2} - \Delta T_M \quad (1)$$

となる。従って、親局の受信チャンネルをそれぞれ親局、子局1、子局2に順番に繰り返して切り換えれば、親局では自分を含めて三つの地球局から衛星までの距離を測定することができる。

測距信号として、通信データの中に9.6875ms毎に64kbps、31bitのラダム・コードを加えている。測距信号を検出するときの誤検出率と不検出率を小さくするために、また将来VSATを用いた通信測位複合システムを構築するために、M系列を測距信号として使用している。カウンタは測距データを送出した時点から、相関回路より相関パルスが出力されるまでの遅延時間を測定する。カウンタとしては、HP53131A（分解能0.5ns、最大繰返し200回/s）を用いた。ハードウェアの構成と、測距信号としてのM系列の検出性能については参考文献(4)、(6)にすでに報告した。

測距データとして使用するM系列は9.6875msごとに一周期分を送出するので、 $9.6875 \times N$ msのあいまいさを生じるが、実際の遅延時間は衛星の概略位置が分かっているので、 N が求められる。この遅延時間から地球局や衛星のトランスポンダなどによって発生する系統遅延を除くと、各地球局から衛星までの空間遅延になる。

3. 実験結果

本実験では、約1分間内にJCSAT-1衛星に対して三つの地球局までの距離を測定する。各地球局の1回の測定に対して16個のデータを得ることができる。各局の測定はお互いに関係がないと仮定して、共分散は考えない。さらに、測定して得た距離誤差を正規分布として検討する。

3.1 測距精度

図2に実測した東京商船大学（親局）から衛星経由で九州大学（子局）まで、さらに衛星経由で親局までの電波遅延時間を示す。後述の実測して得た衛星位置に対する誤差分布の解析を簡単にするために、24時間連続観測したデータの中、地球局から衛星までの距離変化が最も緩やかである時の約7分間にわたるデータ（112個）を抜き出して解析した。中央の直線は回帰直線であり、回帰直線に対する標準偏差は約47nsであった。これを衛星までの距離に換算すると、約7.0mになる。北海道大学に対しても同じ程度の測距精度が得られた。同様に、実測した親局－衛星間の折り返し電波の遅延時間の標準偏差は40nsであることが得られ、これは衛星までの距離に換算すると、約6.0mになる。従って、子局から衛星までの距離が式(1)で計算できるが、標準偏差 σ_s は

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_M^2} = 9.2\text{m} \quad (2)$$

となる。ただし、 σ_M は親局から衛星までの距離測定データの標準偏差、 σ^2 は親局から衛星経由で子局までの距離測定データの標準偏差である。

3.2 測位精度

・ : 測距データ
直線 : 測距データに対する回帰直線
標準偏差 : 約47ns

図2 実測データと標準偏差

測定した位置の三次元座標に対する共分散行列 A は

$$A = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 $\tilde{a}_{ij}$ を A の i 行 j 列に関する余因子、 B を $B = |A|$ とすると、三次元正規分布の確率密度 P_r は次式で表される⁽⁷⁾。

$$P_r = (2\pi)^{-\frac{3}{2}} |B|^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\tilde{a}_{ij}}{B} x_i x_j\right\} \quad (4)$$

さらに、添字1、2、3を三次元直交座標のX、Y、Zに対応させれば、 A は次のような対称行列となる。

$$A = \begin{pmatrix} V_x & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{xy} & V_y & C_{yz} \\ C_{xz} & C_{yz} & V_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし、 V は分散、 C は共分散である。式(4)における x_1 、 x_2 、 x_3 はX、Y、Zに対応している。従って、実測して得た衛星位置から、分散 V と共分散 C を求める⁽⁸⁾ ことにより、ばらつきの分布が得られる。

衛星自体の摂動があるので、実測して得た三次元衛星位置に対する誤差分布の解析には複雑な三次元回帰分析をしなければならない。しかし、今回の実験では計算を簡単にするために、衛星の動きが最も緩やかな時のデータを用いて解析し、近似的に衛星位置の平均値に対して誤差分布の計算を行った。

表1に、前述の7分間のデータ（各局毎にデータの数112個である）を用いて求めた衛星位置分布の95%誤差球半径と95%誤差楕円体の各軸の成分を示す。95%誤差球半径は1,682 mであるが、地上での測位に最も影響のある95%誤差楕円体の短軸半径は44mであることがわかる。

今回の実験では、実験の都合で衛星監視地球局が狭い面積の中に配置されたので、高精度が得られなかったが、3局が共に日本国内にあっても、地球局を適当に配置すれば日本付近での測位に最も影響がある方向の誤差成分は4 m程度で、高精度の測位が可能となる⁽⁴⁾。

4. 衛星位置測定システムの評価

ここでは本実験での地球局の配置と実験で得られた各地球局の測距誤差をもとにして衛星位置測定誤差解析を行い、実測結果との比較を試みた。

また、北海道大学と九州大学のVSATの正確な位置がわかっていないので、現時点では絶対距離測定誤差を評価することはできないが、VSATを用いて衛星までの距離を測定するときの絶対距離測定誤差については参考文献(4)で評価した。

4.1 測距誤差による衛星測位誤差の解析

三つの地球局による衛星位置測定誤差は、これらの地球局の分布場所によって異なる。衛星位置測定誤差解析は実験結果で観測された測距装置による誤差に基づいて行った。親局の測距誤差は6.0m、子局の測距誤差は9.2mであり、各局の測定はお互いに無関係として、共分散は考えない。表2に、東京商船大学（親局）、北海道大学（子局1）、九州大学（子

表1 実測衛星位置の三次元誤差分布

項目	実測結果
X 軸分散	59356.8 [m] ²
Y 軸分散	307177.3 [m] ²
Z 軸分散	461395.2 [m] ²
XY 共分散	131673.2 [m] ²
XZ 共分散	118399.8 [m] ²
YZ 共分散	311079.2 [m] ²
95%誤差球半径 r	1682.0 m
95%誤差楕円体 x 軸	44.3 m
95%誤差楕円体 y 軸	986.6 m
95%誤差楕円体 z 軸	2338.8 m

表2 測位誤差から解析した衛星位置の三次元誤差分布

項目	計算値
X 軸分散	55071.5 [m] ²
Y 軸分散	284881.2 [m] ²
Z 軸分散	458206.3 [m] ²
XY 共分散	121997.1 [m] ²
XZ 共分散	91925.7 [m] ²
YZ 共分散	270206.0 [m] ²
95%誤差球半径 r	1663.8 m
95%誤差楕円体 x 軸	12.3 m
95%誤差楕円体 y 軸	922.8 m
95%誤差楕円体 z 軸	2320.7 m

局 2) に3局を設置する場合の東経150度の静止衛星位置測定誤差の解析結果を示す。95%誤差球半径は約1,660mであるが、地上での測位に最も影響のある95%誤差楕円体の短軸半径は12.3mであることがわかる。

4.2 解析結果と実測結果の比較

表 1 と表 2 により、95%誤差球の半径はほぼ同じであるが、地上での測位に最も関係ある95%誤差楕円体の短軸半径は、解析結果が約12mであるのに対して、実測結果は約44mであって、実測の方が少し大きい。数十mの測位精度のシステムを目標とする本研究にとっては同じオーダーであると考えられ、システムは十分に有効であると言える。

5. 日本付近移動体の測位誤差

ここでは那覇に親局、稚内と父島に子局を設置して東経110度と東経150度の静止衛星を監視し、さらに、この二つの衛星を用いて $\rho - \rho$ 航法での移動体測位システムを想定して解析し、95%誤差円の半径で評価した。船などの低速移動体側は同じVSATを搭載して衛星までの距離を測定すると仮定して、測距誤差を親局の測距誤差と同じにする。

図 3 には、移動体の位置測定誤差の等誤差線を示す。親局の測距誤差は 6 m、子局の測距誤差は 9.2mである。同図により、衛星観測地球局が3局とも日本国内の場合、本論文で提案した衛星位置測定システムでの衛星位置測定誤差と移動体の測距誤差を含んでも日本付近では測位誤差50m以下の精度で測位できることがわかった。

今回は、短い時間帯の内に多数の測定データを取得するために、実測して得られた生データをそのまま使用したが、実時間性を失わない前提で生データに対する平均化処理を行うことにより、距離測定精度を高くすることができる⁽⁴⁾。前報⁽⁵⁾の実験では、16個毎に平均すると、親局から衛星までの測距誤差は約 2 m、親局から衛星経由で子局までの測距誤差は約 3 mであることがわかった。式(2)により、本論文で提案した衛星位置測定システムを用いて衛星位置を測定する場合の子局から衛星までの距離測定誤差は3.6mになる。

図 4 には、これらのデータを用いて、東経110度と東経150度に衛星を配置し、那覇に親局、稚内と父島に子局を設置する場合の移動体の位置測定誤差の等誤差線を示す。移動体における測距誤差を 2 m として計算した。これにより、衛星観測地球局が3局とも日本国内の場合、本論文で提案した衛星位置測定

衛星：110度と150度

図 3 日本付近の移動体測位誤差
(親局(那覇)における測距誤差：2m)
(子局における測距誤差：3.6m)
(移動体における測距誤差：2m)

衛星：110度と150度

図 4 日本付近の移動体測位誤差
(親局(那覇)における測距誤差：6m)
(子局における測距誤差：9.2m)
(移動体における測距誤差：6m)

システムでの衛星位置測定誤差と移動体の測距誤差を含んでも日本付近で測位誤差20m以下の精度で測位ができることがわかった。

6. むすび

前回⁽⁴⁾の続きとして、今回では三つの地球局により衛星位置を決定する方法を提案した。そして東京商船大学（親局）、北海道大学（子局1）、九州大学（子局2）に3局を設置し、東経150度の静止衛星位置測定実験を行った。親局から64kbpsのM系列を送信し、衛星折り返し時間差から親局－衛星間距離を、それぞれの子局折り返し時間差から親局で各子局－衛星間距離を測定した。このため、本システムでは測距精度が若干劣化するが、各々の子局で測定した衛星までの距離データを親局に伝送する必要がなくなるため、システムの構成が簡単になる。

実測結果で得られた衛星の位置誤差の三次元分布と解析して得た結果を比較して、実測の方が少し大きい。この原因を今後の研究課題として残っているが、数十mの測位精度のシステムを目標とする本研究にとっては提案した衛星位置測定システムは十分に有効であると考えられる。また、本システムで監視した二つの静止衛星を用い、 $\rho - \rho$ 航法で位置を決定するシステムを想定して、移動体の位置決定誤差を95%誤差円で評価した。測距データに対して平均化処理を行えば、日本付近では誤差20m以下の精度で測位が可能である。

静止衛星を用いて通信測位複合システム構築の一環として、VSATを用いた衛星位置測定方法について検討し、実用的な衛星位置測定システムを提案した。次は、提案した衛星位置測定システムをもとにして、通信測位複合システムの構築についてさらに検討してゆきたいと考えている。

謝 辞

実験にご協力頂いた九州大学立居場 光生教授と藤崎 清孝助手、北海道大学青木 由直教授と棚橋 真助手に深く感謝申し上げます。また、本研究は株式会社日本サテライトシステムズ主催ディジタル衛星通信の大学間高度共同利用研究協議会の協力の下に行っていること、また文部省科学研究費の援助を受けていることを記し、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Akio Yasuda, Wei Wei, Ping Zhu, Kohji Yamashita, Masashi Kawamura : 「Positioning System Using TV Broadcasting from Geostationary Satellites」Proceedings of 1994 IEEE National Telsystems Conference, May 26-28, 1994.
- (2) 朱 萍・安田明生・山下晃司・川村雅志 : 「衛星テレビ放送を用いた測位システム」日本航海学会論文集第86号, pp.66-73, 平成4年3月.
- (3) 韋 韋・安田明生・山下晃司・川村雅志 : 「二つの静止衛星と地上波のテレビジョン放送を用いた測位システム」日本航海学会論文集第90号, pp.9-14, 平成6年3月.
- (4) 樊 春明・安田明生 : 「静止衛星による測位システム-I VSATを用いた衛星測距」日本航海学会論文集第92号, pp.19-25, 1995年3月.
- (5) 安田明生・樊 春明 : 「VSATによる衛星位置測定システム」1996年電子情報通信学会春季大会講演論文集, B-210.
- (6) 樊 春明・安田明生 : 「M系列を測距信号としたVSATによる衛星測距」1995年電子情報通信学会春季大会講演論文集, B-171.
- (7) 西 周次 : 「衛星航法システムの位置決定誤差に関する研究」電子航法研究所報告第10号, 昭和49年11月.
- (8) 安田明生 他 : 「GPSにおけるGDOPと測位誤差分布について」日本航海学会論文集第79号, pp.25-31, 1988年9月.

質 問 応 答

小塩立吉 (拓殖大学工学部電子工学科) : 静止衛星が動いているため、移動体測位精度が極端におちるとい
うのが従来の静止衛星による簡単な測位システムの結果であったと思う (旧 Geostar のように航法専用と
して構築する場合を除き)。そこで、本システムは、測位する際に地上3局を用いて衛星位置を出してか
ら、2静止衛星による移動体測位を行うので、期待する (今説明のあった) 測位精度が得られるというシ
ステムの構想ですか。

安田明生 : ご質問の通りです。

山田多津人 (海上保安大学校) : 測位精度を計算された過程で移動体側での衛星測位精度はどのような値を
使って計算されたのでしょうか。

樊 春明 : モニター局 (親局) で得られた精度と同じ値を使っています。