静止衛星による測位システム－I．

－VSAT を用いた衛星測距－

樊 春明*・安田 明生**

A Positioning System with Geostationary Satellites- I .

－Satellite Ranging by VSAT－

Chunming FAN and Akio YASUDA

Abstract

It is indispensable for achieving an accurate positioning to get the positions of satellites exactly. The authors tried to measure a range from a VSAT (very small aperture terminal for satellite communication), located at Tokyo University of Mercantile Marine, to the communication satellite JCSAT-1, on geostationary orbit at 150°E. The measured absolute ranges have the standard deviation of 2 m and agree reasonably well with the values simultaneously measured at the satellite control center. Delays in the communication devices are also estimated for comparison. We evaluate the accuracy of position fixing of two satellites, at 110°E and 150°E, and then of the mobile stations on the earth by using two satellites thus fixed.

1. まえがき

衛星地球局は技術発展、特にハードの急速な発展に伴い、小型化を続けてきた。VSAT (Very Small Aperture Terminal) を用いた静止衛星通信は、広域性、多元接続性の他に、低廉かつ小規模なシステムで実現できるなどの利点をも兼ね備えているため、急速に増えてきている。一方、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の提案もなされている。これらの中で、特に重要なのは衛星位置の測定である。著者らは先に放送衛星と地上波のテレビジョン放送波を用いた測位システムを構成し、実船実験により高精度の測位が可能であることを示した⁽¹⁾⁽²⁾。静止衛星を用いた測位システムにおいて、衛星位置を正確に測定することが正確な測位のための必要条件であることは言うまでもない。

そこで本実験では、電離層の影響が少ない Ku バンド周波数で東京商船大学に設置された VSAT 経由の 64kbps の通信回線を用いて通信衛星 JCSAT-1 までの距離の高精度測定を試みた。31bit の擬似ランダム雑音信号を用いて送受信信号間の遅れ時間を測定した結果、2m 程度の測距精度が得られた。一方、絶対距離では横浜の衛星管制センターで、測距用のトーン信号により測定された衛星までの距離と比べて非常に良い一致を得た。次に、試作システムの距離測定精度における静止衛星の位置決定精度を評価し、さらにこの誤差をもとにして、2 衛星測位システムにおける移動体の位置決定精度を評価した。

2. 実験装置と測距方法

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。VSAT 通信装置の主要諸元を表 1 に示す。

* 学生会員 東京商船大学大学院 (〒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)

表1 VSAT 通信装置の主要諸元

アンテナ装置	
アンテナ形式	オフセット・パラボラ・アンテナ
反射鏡有効径	1. 8mφ
周波数	送信: 14. 00525GHz 受信: 12. 25725GHz
偏波	直交直線偏波
利得	送信: 46. 2dB以上 受信: 45. 4dB以上
屋外装置 (ODU)	
(送信部)	
入力周波数	1. 3~1. 8GHz
出力周波数	14~14. 5GHz
入力レベル	-5~-40dBm
最大出力レベル	2W (動作) / 3W (飽和)
出力電力調整範囲	+33dBm~+16dBm / 1dBステップ
出力安定度	-0. +2dB以内 (最大出力電力時)
(受信部)	
入力周波数	12. 25~12. 75GHz
出力周波数	0. 5~1GHz
利得	53dB (標準)
受信雑音温度	250K以下 (+25°C)
受信レベル	-80~-132dBm (1波当たり)
屋内装置 (IDU)	
送信出力周波数	1. 3~1. 8GHz
送信出力レベル	0~-5dBm
受信入力周波数	0. 502~1. 002GHz
受信入力レベル	-75. 9±15dBm
変調方式	QPSK
シンボルレート	64kbps
FEC コーディングレート	1/2
インターフェース形式	V. 35

東京商船大学航海学科実習棟屋上 (WGS-84 座標系において、東経 139°47'32.639805"、北緯 35°39'58.790857"、高度 59.754m: 第3台場三角点を基準に GPS で計測) に直径 1.8m のパラボラアンテナを持つ VSAT システムを設置している。アンテナの仰角は 47.2 度で、方位角は 162.8 度である。ODU (Out Door Unit) はパラボラアンテナの前部に取り付けられた送受信器で周波数変換器を持ち、屋内に設置されている IDU (In Door Unit) と中間周波数で接続されている。

IDU は V.35 シリアルポートから入力された 64 kbps のデータを中間周波数で QPSK 変調して ODU に送出する。逆に ODU から受け取った中間周波数の QPSK 信号を復調して、V.35 シリアルポートで受信データを DTE (Data terminal equipment) に送出する。

図1に静止衛星における測距実験の概念図を示す。一定間隔で測距データを送信して、送信データと折り返しデータ間の遅延時間を測定することにより、衛星までの距離を求める。測距データとして通信データ中に 9.6875ms 毎に 64kbps、31bit の PN 序列を加えている。図2に測距部分のブロック図を示す。カウンタとしては、HP53131A (分解能 0.5ns、最大繰り返し 200 回/s) を用いた。

図3に各信号のタイムチャートを示す。カウンタは測距データを送出した時点から、受信した測距データを相関回路に通して、相関パルスが出力されるまでの遅延時間を測定する。測距データは 9.6875ms ご

図1 静止衛星における測距実験概念図

図2 測距部分のブロック図

図3 各信号のタイムチャート

とに送出するので、 $9.6875 \times Nms$ のあいまいさを生じるが、実際の遅延時間は衛星のおよその位置がわかっているため、測定値に $9.6875 \times 25ms$ を加えれば良い。この遅延時間から IDU や ODU、トランスポンダなどの系統遅延を除くと、衛星までの空間遅延になる。

PC-9801VX はカウンタで測定した遅延量を RS-232C 経由で収集し記録しているが、伝送と収集、記録には時間がかかるので、伝送速度が 300bps では 1 秒間に約 1.5 データ、9600 bps では約 12.5 データの収集・記録となる。

3. 測距結果

図 4 に送信電力 = 30dBm ($E_b/N_0 > 10dB$) で、晴天時に 24 時間連続観測したデータから約 3 分間 (336 データ) を抜き出したものを示す。黒丸は生データ、白丸は 16 個ごとに平均したもので、中央の直線は回帰直線である。回帰直線に対する標準偏差は、生データが 54.3ns、平均データが 13.7ns である。衛星までの距離に換算すると、約 8m と 2m になる。なお、測距データとしては瞬時の値を用いることが望ましいが、衛星の動きは遅く、現在のシステムでは 16 データの平均でも 0.2 秒以下で測距が可能なので、十分な実時間性が保たれると判断している。したがって、以後測位精度の計算にあたっては、本システムの測距精度として後者の値を採用する。

図 5 には、地球局の送信電力を調整することにより E_b/N_0 (IDU に表示) を変化させながら、一組 1000 データ (約 80 秒間) ずつを取って、各組のデータの回帰直線に対する標準偏差を求めたときの、 E_b/N_0 と標準偏差の関係を示す。図から E_b/N_0 が 10dB 以上であると、標準偏差は 70ns 以下になり、衛星までの距離に換算すると、10m 程度になることがわかる。

表 2 には、 E_b/N_0 を下げて 4.2dB とし、測距信号が 31bitPN 序列と 1bit だけの場合の検出誤り回数 (誤検出と検出不能を含む) と標準偏差 (検出誤りを除く) の実測値を比較した結果を示す。表から見ると、ばらつきはほとんど同じであるが、検出の誤り回数という点では 1bit データで測定する場合より PN 序列で測定する方が優れていることがわかる。これは相関関数を測定するときのしきい値を、7bit の誤りがあっても測定できるように設定しているからである。

今回実験で用いた 31bitPN 序列は m 系列であり、1 周期分を次式で表示する。

$$m = \{m_0, m_1, \dots, m_i, \dots, m_{31}\}$$

ただし、 m_i は “1” 又は “0” である。

図 4 3 分間の生データと平均データの標準偏差

図 5 E_b/N_0 と標準偏差の関係図

表 2 31bit PN 序列と 1bit データの比較
(しきい値: 24bit)

	1 b i t	3 1 b i t P N 序列
検出の誤り回数	25 回/1000	2 回/1000
標準偏差	0.150 us	0.149 us

$E_b/N_0 = 4.2dB$

m 系列の性質により、自己相関関数 $\phi(k)$ は、

$$m_i \cdot m_{i+k} = \begin{cases} 1 & m_i = m_{i+k} \\ 0 & m_i \neq m_{i+k} \end{cases}$$

として

$$\phi(k) = \sum_{i=1}^{31} m_i \cdot m_{i+k} = \begin{cases} 31 & \text{for } k=0, 31, 62, \dots \\ \leq 16 & \text{otherwise} \end{cases}$$

となるので、しきい値を 24bit と設定すると、31bit の中の 7bit 以下の誤りなら測定できるので、不検出確率はかなり小さくなる。また、誤検出については、1bit の測距データの場合には 1bit の誤りはそのまま誤検出となり測定不能となるが、PN 序列の場合では相関回路の参照データと同じデータが 24bit 以上存在する時のみ、誤りが検出されるので、その確率は小さくなる。

相関関数による検出は bit データで行うので、ばらつきはあくまでも受信系の bit 同期精度によって決定され、1bit の測距データの場合と相関関数で検出する場合のばらつきは同じであると考えられる。

次に絶対距離の測定精度について評価する。ODU、IDU などの設備は通信機として設計されたものなので、正確な遅延時間は測定されていない。NEC からの情報では送信側遅延は約 0.64ms、受信側遅延は約 1.17ms である。測距回路の遅延は 7.7 μ s、トランスポンダーの遅延は数 100ns～数 μ s と言われている。従って、総遅延は約 1.81ms である。

これらのデータを用いて、(株)日本サテライトシステムズ横浜衛星管制センターで 7 月 19 日午後 6 時から 1 時間毎に連続 24 時間測定された東京商船大学から衛星までの距離データ（距離に換算して提供された。）を用いて、実測のデータと比較した結果を表 3 に示す。遅延時間の絶対差の平均値は約 1.81ms、標準偏差は 188ns であることがわかる。

この絶対差の平均値は装置の約 1.81ms の総遅延量とほとんど同じ程度であるので、これはシステムの測距信号に対する一定量だけのオフセットであると考えられる。標準偏差の値は管制センターにおける測距精度が 10 メートルのオーダーであるということを考慮すると良い値であると考えられる。

表 3 24 時間測定結果

管制センターの測定		実測（往復）		絶対差（ms）
距離（km）	往復時間差（ms）①	実測値（ms）	実際の遅延（ms）②	②－①
37257.738	248.556873	8.184880	250.372380	1.815506
37259.949	248.571624	8.199701	250.387201	1.815573
37261.918	248.584759	8.212831	250.400331	1.815572
37263.543	248.595600	8.223727	250.411227	1.815627
37264.723	248.603472	8.231566	250.419066	1.815594
37265.324	248.607482	8.235654	250.423154	1.815672
37265.234	248.606881	8.235142	250.422642	1.815761
37264.383	248.601204	8.229469	250.416969	1.815765
37262.754	248.590336	8.218672	250.406172	1.815836
37260.426	248.574806	8.203204	250.390704	1.815898
37257.551	248.555626	8.184079	250.371579	1.815953
37254.355	248.534304	8.162788	250.350288	1.815984
37251.105	248.512623	8.141138	250.328638	1.816015
37248.090	248.492509	8.121036	250.308536	1.816027
37245.574	248.475724	8.104218	250.291718	1.815994
37243.785	248.463789	8.092212	250.279712	1.815923
37242.859	248.457611	8.085887	250.273387	1.815775
37242.855	248.457585	8.085771	250.273271	1.815687
37243.723	248.463375	8.091463	250.278963	1.815588
37245.340	248.474163	8.102217	250.289717	1.815554
37247.512	248.488653	8.116707	250.304207	1.815554
37250.039	248.505511	8.133513	250.321013	1.815502
37252.703	248.523283	8.151263	250.338763	1.815480
37255.328	248.540796	8.168793	250.356293	1.815498
平均				1.815723
標準偏差				0.000188

一方、9月12日午前9時から1時間毎に連続48時間の測定による絶対差の平均値は約1.81ms、標準偏差は299nsであった。測定した二日間はほとんど雨であって（大雨で通信が中断することもあった。）、 E_b/N_0 は低くなり、測定精度がわるくなった。

4. 衛星位置測定誤差の評価

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三次元正規分布誤差に基づき行い、各局の測定はお互いに無関係なので、共分散は無いとした。数学的な証明については参考文献(3)を参照されたい。

図6、7には、測距誤差を本実験における標準偏差の2mのみとして、那覇と稚内に2局を設置し、第3局は日本国内のどこかに置く場合の東経150度と110度の静止衛星位置測定誤差を示す。

これらの図により、地球局が3局とも日本国内の場合でも200m程度の静止衛星の位置測定精度が得られることがわかる。また、衛星位置測定精度は二つの固定観測地球局を結ぶ直線に対してほぼ線対称になり、3局に囲まれている三角形の面積が大きければ大きいほど誤差が小さいことがわかる。最も離れた父島における誤差を表4に示す。a、b、cは誤差楕円体の三つの軸(x, y, z)の半径である。x軸上の誤差aは最も小さく3.2mである。測位に直接影響のあるのはこの値である。

図8は地球座標と誤差楕円体の座標の関係を示す。x軸はA、B、C3局に囲まれている三角形の中

図8 地球座標と誤差楕円体座標の関係

図6 静止衛星(110°E)位置測定の95%誤差球半径(単位:m)

図7 静止衛星(150°E)位置測定の95%誤差球半径(単位:m)

表4 那覇、稚内、父島における110°Eと150°E衛星の位置測定誤差

静止衛星		150度	110度
95%誤差球半径		205.0m	189.8m
95%誤差楕円体	a	3.2m	3.2m
	b	135.7m	172.0m
	c	282.5m	247.7m

測距誤差の標準偏差 = 2m

心と衛星を結ぶ直線上にあるので、測位に最も影響が大きい。図9は那覇、稚内に2局を設置し、第3局は日本国内のどこかに置く場合の東経150度の静止衛星位置測定95%誤差楕円体の短軸半径を示す。110度の静止衛星についても同様に計算ができ、これについても大体3.2mぐらいである。

5. 移動体の位置測定に及ぼす影響

ここでは東経110度と150度にある二つの静止衛星を用い、測距方式(ρ - ρ 航法)で位置を決定するシステムを想定して解析し、95%確率誤差円で評価する。

図10には、4節で計算した静止衛星位置測定誤差により移動体の位置測定に及ぼす誤差の評価を示す。ここでは東経110度と東経150度に衛星を配置し、那覇、稚内、父島に衛星観測地球局を設置して衛星位置を決定する場合の移動体の位置の測定誤差の等誤差線を示す。移動体における測距誤差を0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でも、VSATを用いて本実験の方式での衛星位置測定誤差による移動体の位置測定に及ぼす誤差は10m以下(95%誤差円の半径)であることがわかる。

衛星による測位システムの誤差には、主に衛星の位置測定誤差と、測距装置性能による誤差と、電離層などの空間の影響による誤差の三つがあると考えられるが、Kuバンドを使用しているので、電離層の影響が非常に小さいと考えられる。

衛星の位置測定誤差は、衛星観測地球局内の遅延や衛星内部の遅延時間などにより真値からずれるオフ

図9 静止衛星(150°E)位置測定の95%誤差楕円体短軸半径

図10 日本付近の位置決定誤差
(衛星観測地球局の測距誤差:2m)
(移動体における測距誤差:0m)

図11 日本付近の位置決定誤差
(衛星観測地球局の測距誤差:2m)
(移動体における測距誤差:2m)

セット誤差と、装置の測距特性によりランダムに分布する測定値のばらつきである。前者は測距信号に対する一定量だけのオフセットをあらかじめ補正しておくことができる。

図 11 に移動体における測距装置の標準偏差を 2m として、これを加えた場合で日本付近での移動体の測位誤差の等誤差線を示す。これにより、本実験で用いている VSAT を測距装置とする特性について、以上で述べたように、衛星の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 15m 以下の精度が得られることがわかる。

6. むすび

静止衛星測位システム構築の上で不可欠な衛星の位置決定法として、3 監視局から衛星までの距離を求める方式のための衛星測距を通信用の VSAT で試み、高精度の測位が可能であることを示した。将来は、数ヵ所の観測地を設け、VSAT で衛星までの距離を測定することにより、JCSAT-1 衛星等の静止衛星の位置を正確に求め、文献(4)のシステムに本システムを加えることにより、求められた各衛星の位置情報を測距データの間に載せて送信することができ、船位の実時間測定が可能なシステムを構成できる。

測位方法として、今は IDU をそのまま使用して、データから相関関数を取っている。しかし中間周波数から相関関数を取れば、IDU のデータ処理部分の影響を除けるだけでなく、相関処理の利得があるので、低 E_b/N_0 の場合でも高精度の測距が可能となる。

本研究は株式会社日本サテライトシステムズ主催の衛星総合通信共同研究会の協力の下に行っていることを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 安田他：「静止衛星による測位システムの開発について」日本航海学会誌第 119 号，pp.41-47，平成 6 年 3 月
- (2) 朱他：「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) 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
- (4) 韋他：「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」同上，第 90 号，pp.9-14，平成 6 年 3 月
- (5) 有本他：「静止衛星測位システムにおける軌道決定精度について」信学技報，SANE89-26

質 疑 応 答

西 周次 (株)カナデン：JCSAT 上のトランスポンダはどのような用途のトランスポンダでしょうか？また、そのトランスポンダは一般の人は自由に使えるのでしょうか？

安田明生：通信用のトランスポンダで 27MHz の帯域を持っています。(株)日本サテライトシステムズ主催の衛星総合通信共同研究会のメンバーになれば 100kHz の割り当てが得られ、自由に使うことができます。

鈴木 治 (鳥羽商船高等専門学校)：C/N が悪化し、誤り訂正が行われた場合、遅延時間はどのように変化するのでしょうか？

樊 春明：それについて特に観測していませんが、24 時間と 48 時間連続した実験の結果から見ると、C/N による遅延時間はほとんど変化していないので、誤り訂正による影響はほとんどないと思われます。