静止衛星による測位システム－Ⅲ. －測位システムの構築－

樊 春明*・安田明生*・浪江宏宗**・川村雅志*

A Positioning System with Geostationary Satellites－Ⅲ. －Construction of Positioning System－

Chunming FAN, Akio YASUDA, Hiromune NAMIE
and Masashi KAWAMURA

Abstract

A regional positioning system is proposed, composed from two geostationary satellites, the center and mobile stations. TDMA (Time Division Multiple Access) satellite communication system is used to transmit the position data of satellites and synchronize the clock of the mobile station with that of the center station in order to find the absolute ranges to the satellites. The TDMA communication helps to keep a rough synchronization with the clock of the center station. The mobile station sends a signal to require the synchronization and the center station answers it with the time difference measured there between the both stations to make the precise clock synchronization. The authors evaluate the accuracy of time synchronization to be about 10ns by the data once measured between VSATs (Very Small Aperture Terminal) of the both stations. Then they evaluate the positioning accuracy of ship to be less than 28m when measured on the Japanese Islands and in the surrounding waters.

1. まえがき

前報の「静止衛星による測位システム－Ⅰ, Ⅱ」⁽¹⁾⁽²⁾では、静止衛星による測位システムについて、その測位方法と測位精度について報告した。本報告では測位システムの構成について検討する。

測位システムとしてGPSが広く普及しているが、このシステムには通信の機能がない。しかし、現代社会では情報の一部である位置情報を何らかの手段で転送する必要がある場合が多い。GPSと他の通信システムの融合という方法はよく使われているが、測位システムと通信システムはさまざまな共通技術や同じ情報を使用しているので、結果として同じことを二回行う、或いは同じ情報に対して二回処理をすることになる。一方、衛星TDMA(Time Division Multiple Access: 時間分割多重)通信は、中継局送信電力および帯域を最大限利用できることや、マルチビーム通信方式でのビーム間接続が容易であるなどのメリットがあるので⁽³⁾、デジタル通信に良く使われている。この方式は各ユーザ局に割り当てられた時間帯のみ信号を送る方式なので、各局の時刻同期が不可欠であるが、測位したい移動体ユーザにとって、高精度の時刻同期ができるので、ユーザ側は測位信号を受信するだけで測位が可能となり、測位システムが容易に構成できる。

本研究では、TDMA衛星通信システムを使った、効率の良い測位システムの構築について提案する。特に、測位のための高精度時刻同期方法について検討する上で、実験で得られたデータ⁽¹⁾を用いて、時刻同期の精

* 正 会 員 東京商船大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

**学生会員 東京商船大学大学院 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

度を評価する。また、提案する方法での位置測定精度についてシミュレーションによって評価する。

2. システム構成

図 1 (a) は衛星位置測定概念図である。正確な位置が既知の 3 ケ所に設置している衛星監視局により衛星までの距離を測定する。測定したデータを通信回線を利用してセンタ局に集めて、 $\rho - \rho$ 航法で衛星位置を決める。図 1 (b) は移動体測位の概念図である。センタ局は、求めた両衛星の位置情報と信号を送出する時の時刻情報を含む測位信号を衛星経由で放送する。従って、移動体の時刻とセンタ局の時刻が同期していれば、移動体はセンタ局からの測位信号を受信するだけで、衛星の位置とセンタ局の位置、センタ局から移動体までの電波伝搬時間(遅延)が分かるので、移動体から衛星までの距離を求めることができる。よって、二つの衛星を利用すれば、測位信号を受信するだけで実時間での二次元位置を求めることができる。

(a) 衛星位置測定

(b) 移動体測位

3. 時刻同期方法

図 1 TDMA方式のシステム概念図

ここでは、センタ局の時刻をシステム時刻として、それに移動体局の時刻を同期させる方法について検討する。精密時刻同期には通信回線を利用する。一方、時刻の同期はTDMA通信回線には不可欠であるが、一般には通信するだけでは測位に用いるほど高い精度の時刻同期が要求されない。ここでは、フレーム同期という通信のための時刻同期と、精密同期という測位のための時刻同期を二段階で行うことにより、移動体局の時刻をセンタ局の時刻に同期させるという方法を提案する。

図 2 フレーム同期の概念図

3.1 フレーム同期方法とその精度

図2は、センタ局から送出したTDMA信号のフレームと移動体側で受信した信号を示す。移動体側は受信した信号を時刻基準として設定すれば、移動体局とセンタ局の時間差は ΔT_{cu} になる。これは回線の遅延時間である。

しかし、静止衛星のおおよその位置と、システムのサービスエリアがわかるので、おおよその遅延時間がわかる。これを用いて修正し、この段階での時刻同期精度は ΔT となる。本研究で使用しているJSAT-1衛星は東経150度の静止軌道上にあるので、サービスエリアは東経125度から150度まで、北緯20度から50度までとすると、センタ局から移動体局までの回線遅延時間は約120msと128msの間である。よって、センタ局はその区域の真中に設置する場合、移動体側はセンタ局からの信号を受信して測定した時間差から約124msを差し引けば、 ± 4 ms程度の範囲でフレーム同期ができることになる。

この段階では、適当に保護時間を設ければ通信ができるが、測位を実現するためには不十分である。よって、測位のために、次の精密同期を行う。

3.2 精密時刻同期方法

図3は通信回線を利用した精密時刻同期の概念図である。黒棒はフレームの開始時刻である。まず、移動体局はフレームの開始時刻でセンタ局に向けて時刻同期申請信号を出す。センタ局は受信した移動体局の時刻同期信号に対して、まず信号の到着時刻とシステム時刻との差 T_{c1} を測定する。次に、センタ局は測定した到着時間 T_{c1} と応答信号を出す時刻とシステム時刻の差 T_{c2} の情報を含んだ応答信号を移動体局へ返す。移動体側では同時に時刻同期申請信号送出時刻とセンタ局からの応答信号受信時刻との差 T_u を測定しており、式(1)で移動体とセンタのフレームの時間差を求めることができる。

$$\Delta T = T_{c1} - \frac{T_u - (T_{c2} - T_{c1})}{2} = \frac{T_{c1} + T_{c2} - T_u}{2} \quad (1)$$

図3 精密時刻同期の概念図

4. 精 度

提案した測位システムによる移動体から衛星までの距離測定精度は、主に時刻同期誤差 ΔT に起因する距離測定誤差 σ_1 と測位信号の測定誤差に起因する距離測定誤差 σ_2 および衛星位置決定誤差 σ_3 によって決定される。ここで、これらの三つの誤差は互いに独立、かつ正規分布に従うとすれば、式(2)で移動体から衛星までの距離測定精度を計算できる。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (2)$$

4.1 時刻同期精度

式(1)で計算した ΔT による時刻同期精度は、測定時間 T_{c1} 、 T_{c2} 、 T_u の測定精度だけに依存し、使用する衛星の位置には無関係であり、 T_{c2} はセンタ局によって決定されるので、その精度は T_{c1} と T_u の精度と比較して高いと考えられる。よって、 ΔT の標準偏差 $\sigma_{\Delta T}$ は

$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{\sigma_{T_{c1}}^2 + \sigma_{T_u}^2} \quad (3)$$

となる。ただし、 $\sigma_{T_{c1}}$ と σ_{T_u} はともに衛星を経由したときのVSAT信号の遅延時間の標準偏差である。

VSAT地球局を用いた衛星経由の遅延時間測定実験により、13.7nsであることがわかっている⁽¹⁾。よって、上述の $\sigma_{T_{c1}}$ と σ_{T_u} を13.7nsとして計算すれば、約9.7nsの時刻同期精度が得られることになる。それを距離の精度に換算すると約2.9mになる。

4.2 測位信号の距離測定精度

移動体側では測位信号を受信することにより、センタ局から移動体に到着するまでの遅延時間或いは電波伝播経路の長さがわかる。また、受信した信号の中に含まれている静止衛星の位置により、センタ局から衛星までの距離を計算することができる。従って、電波伝播経路の長さより衛星からセンタ局までの距離を差し引けば、衛星から移動体までの距離になる。この時のセンタ局から衛星経由で移動体に到着するまでの測位信号の測定精度は13.7nsである⁽¹⁾ので、距離精度に換算すると約4.1mになる。

4.3 衛星位置誤差

日本国内で三つの衛星監視地球局を用いて衛星位置を測定するときのDOPは100以上なり非常に悪いので、衛星位置の決定誤差は大きい、地上での測位に影響のある衛星位置誤差楕円体の短軸(日本近海に向いている)はそれほど大きくない⁽¹⁾。衛星位置の測定方法と測定精度については参考文献(1)、(2)に詳述したが、VSATを用いた衛星位置誤差の日本近海に向かう成分は約3.2mである⁽¹⁾⁽²⁾。

従って、 $\sigma_1=2.9m$ 、 $\sigma_2=4.1m$ 、 $\sigma_3=3.2m$ として式(2)に代入して計算すると、約6mの距離測定精度が得られることがわかった。

5. 位置測定精度

本システムによる位置測定精度は、衛星位置の測定精度と移動体から衛星までの距離測定精度によって決まる。図4は「静止衛星による測位システム-1：VSATを用いた衛星測距」⁽¹⁾で提案した衛星位置測定方法を用いて、移動体から衛星までの距離測定誤差が6mである場合の日本近海の位置測定精度の等誤差線を表す。同図より、提案したシステムでの日本近海の移動体では測位信号を受信するだけで28m以下の誤差で位置測定が可能であることがわかった。

静止衛星：東経 110 度と 150 度
衛星観測地球局の測距精度：2m
移動体における測距精度：6m

図4 日本近海での位置測定精度

6. むすび

「静止衛星による測位システム-I：VSATを用いた衛星測距」⁽¹⁾と「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」⁽²⁾に引き続き、今回は測位システムの構築について研究し、TDMA衛星通信システムと統合した、より効率の良い測位システムの構築を提案した。センタ局の時刻をシステム時刻として、衛星回線を利用して各移動体局の時刻をシステム時刻に合わせることで、移動体

側では二つの衛星経由でセンタ局の測位信号と衛星位置情報を受信するだけで二次元位置を決定することができる。時刻同期法として、フレーム同期と精密同期という二段階で行う手法を用いた。これにより、測位に必要な高精度時刻同期が得られ、その時刻同期精度でTDMA通信回線を維持することができる。以前の実験で得られたデータにより、提案した方法による時刻同期精度と移動体から衛星までの距離測定精度について評価し、約6mの距離測定精度が得られることがわかった。さらに、日本付近の移動体の位置測定精度についてシミュレーションで評価し、誤差28m以下で位置測定が可能であることがわかった。

提案するシステムの衛星及び移動体の位置測定は通信回線を利用して行うが、衛星の位置測定方法と移動体から衛星までの距離測定方法⁽¹⁾⁽²⁾により、必要な通信容量は数kbps程度であることが分かる。しかし、静止衛星の位置は比較的安定しているので、カルマンフィルタなどの推測或いは予測処理方法を使用することにより、測位に必要な通信容量を下げることができる。また、通常のTDMAシステムでは各々の移動体からの信号を時間的に重ならないようにするためにガードタイムが必要である。各移動体の位置が分からなければ、サービスエリア範囲に相当する電波伝播時間をガードタイム時間として設定する必要がある。一方、提案するシステムでは各移動体からアクセスする衛星までの電波伝播遅延時間が分かるので、これを用いて移動体の送信時刻を調整することにより、電波伝播遅延時間の測定誤差程度のガードタイムを設ければよく、通信回線の効率がよくなる。

参 考 文 献

- (1) 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，pp19-25，平成7年3月．
- (2) 樊 春明・安田明生：「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」日本航海学会論文集第96号，pp71-76，1999年3月．
- (3) 山本平一・加藤修三：「TDMA通信3版」電子情報通信学会，p14，平成4年6月1日．

質 疑 応 答

天井 治(運輸省電子航法研究所)：シミュレーションにおいて、静止衛星の位置を110度と150度にしたのには何か理由があるのでしょうか？

樊 春明：移動体の位置を測定するときのDOPを考えて、日本付近に向いている静止衛星のうち最も離れた位置に存在するものの中から、適当に110度と150度の衛星を選択しました。