

次世代の深宇宙通信技術
Future Deep Space Communication Technologies

長江朋子, 戸田知朗*, 斉藤宏文*
宇宙科学研究本部 システム開発部
*宇宙情報・エネルギー工学研究系

Tomoko Nagae, Tomoaki Toda*, Hirobumi Saito*
Spacecraft System Development Group, Institute of Space and Astronautical Science
*Space Information and Energy Engineering Department

Abstract

In a deep space mission, the conventional turn-around ranging is used as ranging technologies. This system configuration is simple but this signal is degraded. In this system scheme, the noisy signal received by a spacecraft is simply passed through an onboard low-pass filter after carrier demodulation. Then, it is amplified, modulated onto a downlink carrier, and retransmitted to a ground station. But this amplification is rather dissipative because its input signal is very noisy and the ranging signal is embedded in it. To solve this problem, we have been developing regenerative ranging. In this paper, development of ground ranging system for new deep space communication technologies is showed.

1. はじめに

地上と探査機を結ぶ通信の能力を向上させ、深宇宙探査の活動領域の限界を拡大するために、宇宙科学研究本部では2002年から再生型測距方式対応搭載X帯トランスポンダの開発、ターボ符号誤り訂正方式の地上系導入、2003年から地上系受信機の高感度化、2004年から再生型測距方式対応地上系装置開発に取り組んできた。搭載X帯トランスポンダの新機能の1つとして開発された再生型測距方式は超遠距離での測距回線の成立を保障し、通信回線で脆弱であった測距可能領域を向上させるものである。同方式に対応する測距装置は地上系システムとしてまだ存在せず、新たに開発することを要する部分である。本稿では、特に再生型測距方式対応地上系装置の研究開発成果について報告する。

2. 研究概要

2.1 再生型測距方式の概要

深宇宙探査における測距技術は従来、地上局より送信された測距信号をトランスポンダで復調せずに増幅し、折り返すベントパイプ方式を採用していた。この方式はシステム設計が容易である反面、信号の増幅効率は雑音に妨害されて落ちてしまう。従って、このような問題を解決するために従来のベントパイプ方式に変わり、再生型測距方式を取り入れた測距システムの開発に着手している。再生型測距方式とは、地上から送信された測距信号を搭載トランスポンダ上でベースバンド信号まで受信復調し、ダ

ウンリンクに再変調を行う方式である。これによってアップリンク側の雑音の影響を抑圧することができ、地上局で受信する測距信号のS/N₀を大幅に改善することができる。この機能を有した再生型測距方式対応搭載X帯トランスポンダのプロトモデルは開発段階であり、金星探査計画（PLANET-C）に搭載予定である。

2.2 再生型測距方式対応地上系受信装置の開発

平成 17 年度は再生型測距方式対応の地上受信装置を開発し、動作確認および測距機能の評価を行った。動作確認としては、地上受信装置のレンジ変調機能確認、キャリア捕捉機能確認、各種パラメータの設定確認等である。

開発した地上受信装置を Fig.1 に示す。アップコンバータ、ダウンコンバータ、受信装置、測距装置で構成されている。この装置は、既設の地上局設備と互換そして等価な機能、またはその拡張性を確保しており、移動、搬送可能な小型、軽量性を備えている。

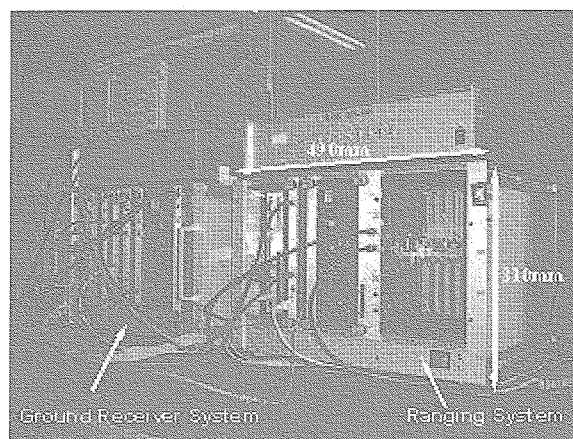


Fig.1 Ground station communication system under evaluation to demonstrate regenerative ranging.

地上装置のブロック図を Fig.2 に示す。大きく分けて受信部、送信部、ドップラーエイド部および測距部から構成されている。

送信部では、送信キャリアに測距信号を変調する。ドップラーエイド部では、測距開始時点まで送信測距信号に同期している測距用複製信号に、キャリア復調過程で検出されたドップラー信号の積分値に比例する位相信号を付加し、積分期間中の位相変動を補正する。

測距部ではドップラーエイド部で位相補正された送受信のサブキャリア信号の位相差を計測している。さらにここで計測された位相差を補正後、255×511のPN符号を利用した同期積算を行うことであいまいさを取り除く。この操作によってサブキャリア位相差およびあいまいさの両情報がCPUに取り込まれ、S/N₀を改善した測距が行われる。

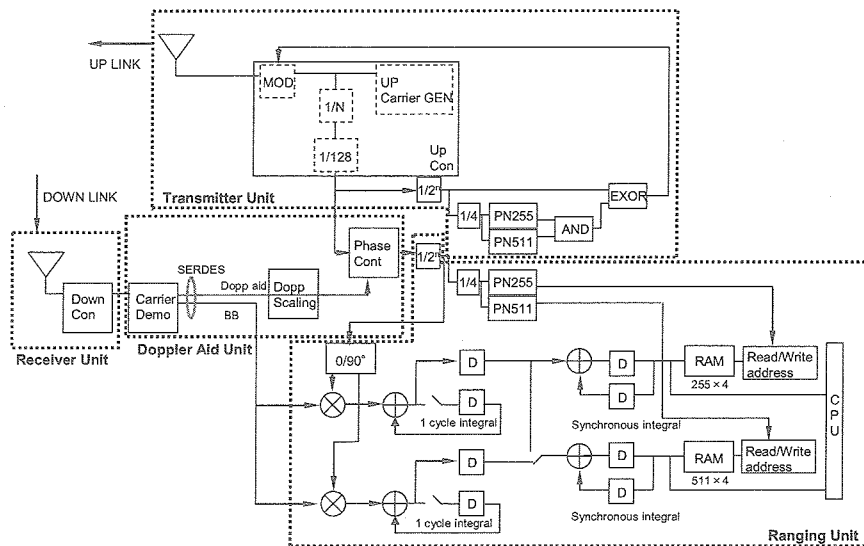


Fig.2 Block diagram of the ground station communication system.

3. 成果概要

3.1 地上系受信装置折返し評価試験

(a) キャリア捕捉位相変動量評価

本試験ではPLL回路で捕捉されたキャリア位相変動量を地上系受信装置折返しで評価した。キャリア周波数はアップリンク $f=7.156527224\text{GHz}$ 、ダウンリンク $f=8.40520288\text{GHz}$ である。Fig.3はPLL回路のループ帯域幅を1, 4, 8, 16Hzとした場合のキャリア捕捉性能である。データから、位相変動量が0.5deg程度のところで飽和していることを確認した。これは熱雑音以外のシステム雑音の影響が見えているためである。ループ帯域幅が2倍になると位相変動量は $\sqrt{2}$ 倍劣化する。 $C/N_0=48\text{dBHz}$ 以下では C/N_0 が20dB上がると位相変動量は10倍となり、帯域幅の設定機能が正常に動作していることを確認した。Fig.4に $BW=1\text{Hz}$ の場合の理論値との比較を示す。理論値との違いは、PLL回路ループフィルタ前段のフィルタのサプレッションファクタを $S/N_0=7\text{dBHz}$ で計算したためである。

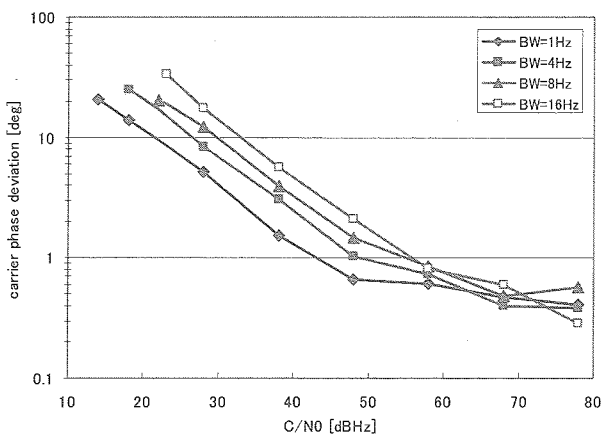


Fig.3 Fluctuation of carrier phase with PLL loop BW as parameters.

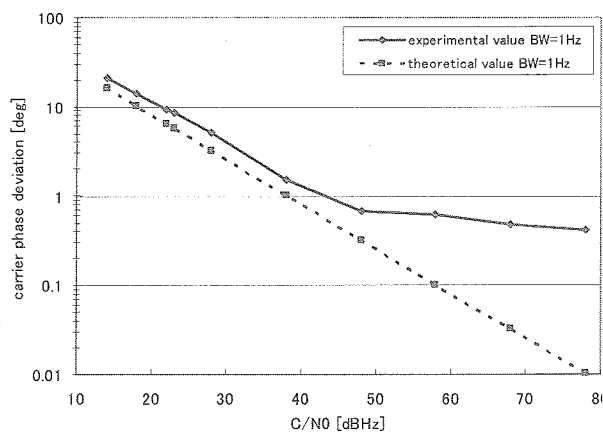


Fig.4 Carrier phase deviation at $BW=1\text{Hz}$ compared with theoretical values.

(b)測距値変動量評価

アップリンク周波数に同期したサブキャリアをPN符号でPSK変調した測距信号でキャリア周波数に1radでPM変調し、測距を行う。キャリア捕捉ループ帯域幅は1Hzとする。サブキャリア周波数をパラメータとし、 S (レンジパワー)/ N_0 と測距値変動の標準偏差関係をFig.5に示す。サブキャリア位相差計測の積分回数(SC)は10回とした。測距値はサブキャリアの1サイクル積算によって導出するが、この1サイクル積算を複数回行うことによって S/N_0 を改善することができる。また、あいまいさ除去PN符号同期積分回数(CODE)は10回とした。この回数も、位相補正されたサブキャリア信号を同期積算することでPN255およびPN511のPNコードを判定する過程において、 S/N_0 の改善に影響を与える。データからサブキャリア周波数が2倍になると測距値変動の標準偏差は $\sqrt{2}$ 倍良くなることを確認した。Fig.6にサブキャリア周波数500kHzの場合の理論値との比較を示す。理論値と計測値はよく一致している。

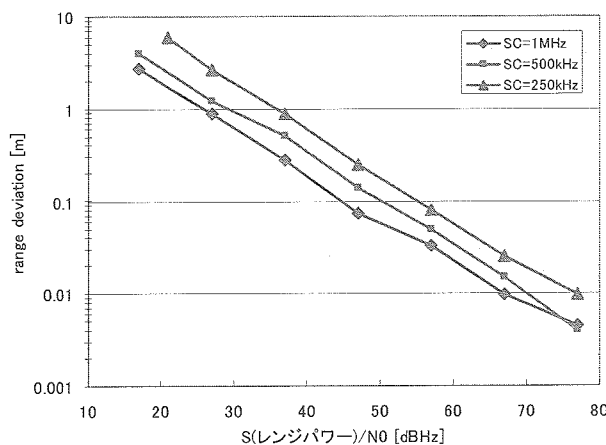


Fig.5 Standard deviation of range measurements and its dependence on sub carrier frequency.

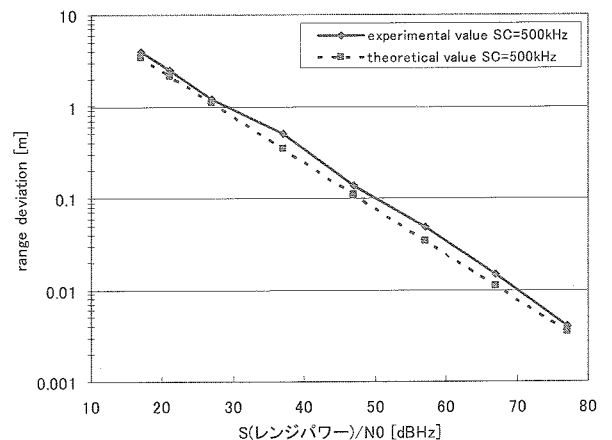


Fig.6 Range deviation at SC=500kHz compared with theoretical values.

3.2 地上系受信装置トランスポンダ折返し評価試験

再生型測距方式対応搭載 X 帯トランスポンダを含めた地上系受信装置の評価試験を行った。Fig.7に使用した再生型測距方式対応搭載 X 帯トランスポンダの機能評価用試作品(BBM)の外観を示す。また、主要諸元を Table.1 に示す。

(a)トランスポンダによる再生型測距機能確認

再生型測距方式対応搭載 X 帯トランスポンダを用いて、再生型測距方式の優位性をPN符号の同期積算効果の観点から、従来型のベントパイプ方式と比較することで検証する。ベントパイプ方式と再生型測距方式の比較を Fig.8 に示す。Fig.8 はダウンリンクのキャリアに変調されるPN255のアイパターンで、横軸は $30 \mu\text{s}/\text{DIV}$ である。トランスポンダの受信信号は-90dBm、測距信号の変調指数は1radに設定した。Fig.8 の下段に示すベントパイプ方式の信号からはPN符号パターンを判断することは難し

く,一方,上段に示す再生型測距方式の信号からはPN符号パターンが明確に現れることが確認できる. PN511も同様である.

Table.1 Properties of X-band BBM transponder.

Parameter	Nominal value
Size	150mm(W) × 150mm(D) × 94.5mm(H)
Mass	3400g
Power Consumption	19.8W
Frequency	7156.23MHz(UP)/8408.21MHz(DOWN)
Carrier acquisition threshold	<-150dBm
Tracking signal range	-150dBm~-70dBm
Tracking frequency range	±100kHz

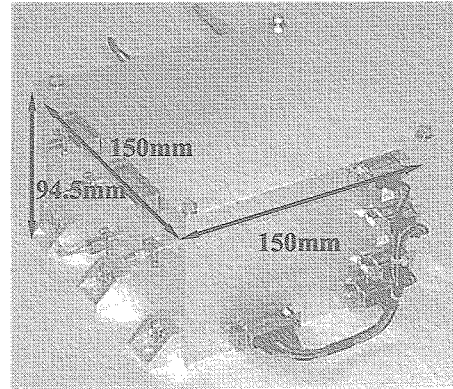


Fig.7 Picture of X-band transponder.

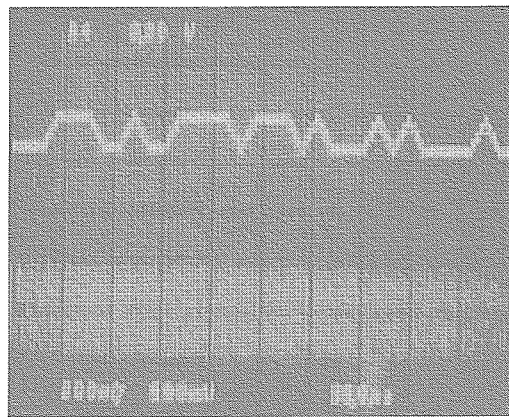


Fig.8 Improved ranging signal quality by synchronous integration.
(high: regenerated ranging signal, low: conventional ranging signal)

(b)再生型測距方式の測距能力評価

アップリンク周波数に同期したサブキャリアをPN符号でPSK変調した測距信号でキャリア周波数に1radでPM変調しアップリンク信号とする. ダウンリンク信号も同様の変調を行い測距する. 地上受信装置のキャリア捕捉ループ帯域幅は1Hzとする. なお, キャリア周波数はアップリンク $f=7.156527224\text{GHz}$, ダウンリンク $f=8.40520288\text{GHz}$ である. サブキャリア位相差計測の積分回数 $SC=10$, あいまいさ除去PN符号同期積分回数 $CODE=10$ とし, アップリンクレベルとダウンリンクレベルの差を $S/N_0=20\text{dBHz}$ として実際の通信回線を模擬し, 推定距離を算出する. 測距距離と測距値変動の標準偏差の関係をベントパイプ方式と再生型測距方式の場合について評価し, Fig.9 に示す. さら

に、再生型測距方式の測距値変動の標準偏差の理論値も合わせて示す。データから再生型測距方式の優位性が示され、再生型測距方式を採用した場合、およそ 5.65AUまで測距可能であり、目標値である 5AU を達成することが確認された。一方ベントパイプ方式は、同条件において 3.18AUにてサブキャリアロックオフとなり目標値を達成しない。

なお、ベントパイプ方式、再生型測距方式共にサブキャリアロックオフにより測距不可能となったが、サブキャリア位相差計測の積分回数を増やすことでさらに測距可能距離を延ばすことができる。これは測距要求精度と測距時間との兼ね合いで調整する必要がある。

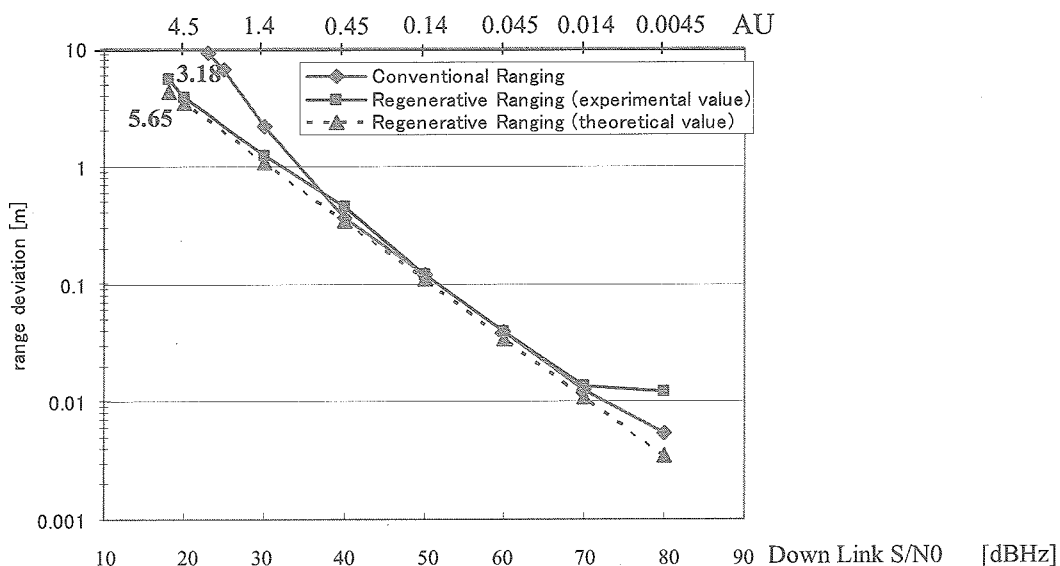


Fig.9 Ranging stability between conventional ranging and regenerative ranging.

4. まとめ

平成 17 年度は再生型測距方式対応の地上受信装置の開発および動作確認、測距機能の評価を行った。測距機能に関して地上受信装置は正常に動作し、測距可能距離も目標値である 5AU を達成することを確認した。平成 18 年度はターボ符号誤り訂正方式の地上系導入、キャリア捕捉ループの狭帯域化を進めると共に、地上系受信装置の PM 製作を実施する予定である。

謝辞

本研究においては、ハイムテクノロジー富田秀穂様、石丸元様に多くの支援を頂きましたことを心より感謝申し上げます。

[参考文献]

- [1] 斎藤宏文, "木星探査計画のための超遠距離通信・測距技術に関する研究", 平成 14 年度~16 年度 科学研究費補助金基盤研究(A)研究成果報告書