

宇宙科学研究所報告

第116号

科学衛星「はるか」における位相基準信号伝送 のための衛星搭載システム

小林 秀行 ・ 冨家 文穂 ・ 川口 則幸 ・ 山本 善一
高橋 今朝人 ・ 廣澤 春任 ・ 平林 久 ・ 村田 泰宏

2001年 9 月

宇宙科学研究所

この報告は宇宙科学研究所が、研究成果を公表するために発行する
不定期継続発行物です。

本報告についてのお問い合わせは下記にご連絡下さい。

宇宙科学研究所 管理部庶務課法規・出版係

科学衛星「はるか」における位相基準信号伝送 のための衛星搭載システム

小林 秀行[†], 富家 文穂^{***}, 川口 則幸^{**}, 山本 善一^{*}, 高橋 今朝人^{***},
廣澤 春任^{*}, 平林 久^{*}, 村田 泰宏^{*}

(2001年7月16日受理)

The Instruments and the System for the Phase Transfer on Board the Scientific Satellite HALCA

By

Hideyuki Kobayashi[†], Fumio Fuke^{***}, Noriyuki Kawaguchi^{**},
Zen-ichi Yamamoto^{*}, Kesato Takahashi^{***}, Haruto Hirose^{*},
Hisashi Hirabayashi^{*} and Yasuhiro Murata^{*}

Abstract: The phase transfer to the space VLBI (Very Long Baseline Interferometry) satellite HALCA and the instrument system for it on board the spacecraft are described. The phase transfer, supplying an extremely stable frequency-reference signal to spacecraft by a radio wave from ground, is one of the key technologies necessary for space VLBI. The phase transfer for HALCA consists of such operations as: (1) a ground station transmits a 15.3 GHz up-link signal generated from a hydrogen maser frequency standard to the spacecraft, (2) a phase-lock receiver on the spacecraft receives the 15.3 GHz signal and generates the reference signal with a frequency of 50 MHz, (3) the reference signal is supplied to the radio astronomy instruments and the local signal generator, (4) the local signal generator generates a 14.2 GHz down-link carrier, together with local frequency signals for radio astronomy receivers, (5) the 14.2 GHz down-link carrier, which is QPSK modulated by radio astronomy signals, is transmitted toward ground, and (6) the down-link carrier is received and demodulated, and two-way loop phase is measured, at the ground station. The system on board the spacecraft has been confirmed, before the launch, to satisfy the coherence condition required from the VLBI correlation. The phase transfer has operated satisfactorily for the satellite HALCA in orbit and contributed to the success of the space VLBI observations by HALCA.

[†] 宇宙科学研究所 (現在, 国立天文台) Institute of Space and Astronautical Science
(Presently with National Astronomical Observatory)

^{*} 宇宙科学研究所 Institute of Space and Astronautical Science

^{**} 国立天文台 National Astronomical Observatory

^{***} 日本電気株式会社 NEC Corporation

要 旨

科学衛星「はるか」(打ち上げ前の名称MUSES-B)のための位相基準信号伝送システムについて、衛星搭載系を中心に述べている。位相基準信号の伝送(phase transfer)はスペースVLBI(超長基線干渉計)を成り立たせるために必要な基本技術で、位相安定度の高い標準周波数信号を地上局から衛星に電波により送るものである。「はるか」では、地上局から、周波数15.3GHzの電波を衛星に向けて送信し、衛星上では、それを位相同期受信機で受け、周波数50MHzの基準信号を生成している。基準信号は観測系機器に分配されるとともに、それから周波数14.2GHzのダウンリンク用搬送波が作られ、搬送波は観測データによってQPSK変調を施されて地上に向けて送出される。地上局では、往復ループの位相変動を測定する。開発した衛星搭載システムの位相安定度特性は、VLBIにおいて必要とされるコヒーレンス条件を十分満たすものであった。「はるか」打ち上げ後、位相基準信号伝送システムは目的とする機能を果たし、「はるか」によるスペースVLBI観測を可能にした。

重要語：VLBI スペースVLBI 位相基準信号伝送 電波天文衛星 「はるか」

構 成

1. はじめに
 2. 「はるか」への位相基準信号の伝送
 3. 衛星搭載システムの構成と機能
 - 3.1 搭載システムの構成と機器の設計・製作上の配慮点
 - 3.2 Kuバンド受信機(KRX)
 - 3.3 基準信号分配器(REFDIV)
 - 3.4 局発信号発生器(LOGEN)
 - 3.5 QPSK変調器(KMOD)
 - 3.6 Kuバンド送信機(KTX)
 - 3.7 Kuバンドダイプレクサ(KDIP)
 - 3.8 Kuバンドアンテナ(KANT)
 4. 衛星搭載システムの性能
 - 4.1 位相雑音特性
 - 4.2 位相安定度
 5. 衛星打ち上げ後の動作
 6. むすび
- 付録1 観測信号系の概要
付録2 臼田地上局システムの概要
付録3 搭載機器の重量および必要電源
参考文献及び注記

1. は じ め に

科学衛星MUSES-B（打ち上げ後の名称「はるか」）の計画では、位相基準信号の伝送が一つの重要な工学課題であった。MUSES-Bは、スペースVLBI（Very Long Baseline Interferometry）に必要な工学諸技術の実験を行うことを第一の目的とし、それらの達成の上にスペースVLBIによる電波天文観測を行うことを目指す衛星として立案された [1, 2, 3]。スペースVLBIのための衛星は、位相安定度の高い基準周波数信号を必要とするが、地上の電波望遠鏡が用いている水素メーザ原子周波数標準器は大掛かりな装置で、それを衛星に搭載することは技術的に困難である。位相基準信号の伝送（phase transfer）は、地上局に水素メーザ装置を置き、水素メーザをもとに生成した基準周波数信号を電波により衛星に送ることによって、衛星搭載機器に必要な基準信号を供給しようとするものである。MUSES-B（「はるか」）は1997年2月にM-Vロケットの初号機によって打ち上げられ、諸工学実験の成功の上に、世界最初のスペースVLBI衛星となった [4, 5, 6]。「はるか」によるスペースVLBI観測（VSOP, the VLBI Space Observatory Programme）は、大規模な国際協力のもとに行われ、大きな科学的成果を挙げてきた [5, 6, 7]。

位相基準信号伝送のためのシステムは地上局設備と衛星搭載機器からなる。地上局では、水素メーザ装置をもとに生成した基準信号を衛星に向けて送信する。衛星では、受信信号から必要とする基準信号を生成して観測用機器に供給するとともに、信号を（周波数変換を施した上で）折り返し地上に向けて送信する。地上局ではそれを受信し、往復してきた信号の位相安定度を測定する。また、2-way ドップラー法による軌道決定を行い、VLBI関連のためのデータとする。本論は、「はるか」における位相基準信号の伝送に関して、衛星搭載システムを中心に記述するもので、別途作成された地上局システムに関する論文 [8] と対をなすものである。以下では、地上系を含めたシステム全体の構成、動作との関わりについても言及しながら記述を進めることとする。

MUSES-Bにおいては、観測周波数として、電波天文保護バンドにある1.6, 5 および22GHzの三つの周波数帯が取り上げられた。衛星搭載観測系を設計するに当たっては、これらの3周波数帯での観測を行う機能と、観測データを処理し、地上に伝送する機能、および位相基準信号伝送に関わる機能とを一体にしたシステムを形成することとし、それらの全体を「観測信号系」と名付けた。

観測データの伝送は観測上の要請から大容量となり、MUSES-Bでは128Mbpsのレートでデータを地上に送ることとした。その場合、搬送波の周波数帯を、Xバンドではなく、Kuバンドまで高める必要がある。位相基準信号の伝送に関しては、上述のように、地上から衛星へ（アップリンク）と、衛星から地上へ（ダウンリンク）の双方向の無線回線が必要であるが、これらについても、特に電離層の擾乱の影響を避けるために、Kuバンドを用いることとした [8]。その際、衛星から地上へのダウンリンクには、観測データを送る回線を共用することができる。MUSES-B衛星との間でこれらのKuバンドの通信を行う地上局は、わが国では、臼田宇宙空間観測所に設置することとなった [8]。また、スペースVLBIにおける国際協力の一環として、四つの地上局、すなわち、アメリカ航空宇宙局NASAの3局（ゴールドストーン、カンベラおよびマドリッド）とアメリカ国立電波天文台NRAOの1局（グリーンバンク）、が準備されることとなった。

MUSES-Bの開発は1989年に始まり、衛星系、臼田地上系の設計が並行して進められた。Kuバンドのアップリンクに関しては、衛星搭載受信機における位相安定度の確保を優先させ、周波数拡散は行わないこととした。その方針を取るに至る過程では、周波数拡散を施した信号に対する復調器を試作し、その出力の位相安定性と、復調器の搭載可能性を調べた [9]。また、周波数拡散を行わず、無変調の信号を送ることは、宇宙用周波数調整のための国際機関であるSFCG（Space Frequency Coordination Group）の勧告に抵触する

こととなったため、SFCGにおいて例外許可（ウェイバー）を得る必要があった [10, 11, 12]。

製作した観測信号系機器について、まず総合的な試験を一次噛み合わせ試験の一環として行い、次いで、衛星のFM総合試験において、組み上がった衛星の中での機能確認と性能測定を行った。1997年1月に始まった内之浦での打ち上げオペレーションにおいても、送受信特性、総合位相安定度などの主要性能の確認を行った。

衛星「はるか」と臼田Ku帯地上局との間の通信実験は、打ち上げ1ヶ月後の3月11日に開始され、初日の実験においてKuバンドにおける双方向通信が成立した。地上-衛星-地上のループにおける位相安定度の測定から、位相基準信号伝送系が必要な特性を満たしていることを確認した。5月13日には、「はるか」及び臼田地上局からなる系（Kuバンドのリンクを通して、両者で一つの電波望遠鏡システムを形成）と臼田64mアンテナの間で、周波数1.6GHzの観測において、初の干渉縞（フリンジ）が検出された。相関処理は、宇宙科学研究所で製作され、国立天文台で運用されている三鷹VSOP相関局 [13] においてなされた。

以下に、「はるか」の位相基準信号伝送システムの概要、衛星搭載システムの構成と機能、衛星搭載システムの性能、および軌道上での動作について述べる。また、付録1には観測信号系全体の概要をまとめて記し、付録2に臼田地上局システムの概略を記す。

2. 「はるか」への位相基準信号の伝送

位相基準信号伝送システムは、地上から衛星へと衛星から地上への二つの無線伝送回線を必要とする。衛星上では、信号は、位相の連続性を保って折り返される。「はるか」においては、SFCGにおける議論 [12]，わが国郵政省電気通信局における調整を経て、周波数は次のように決められた。

- ・地上から衛星 15.3GHz
- ・衛星から地上 14.2GHz

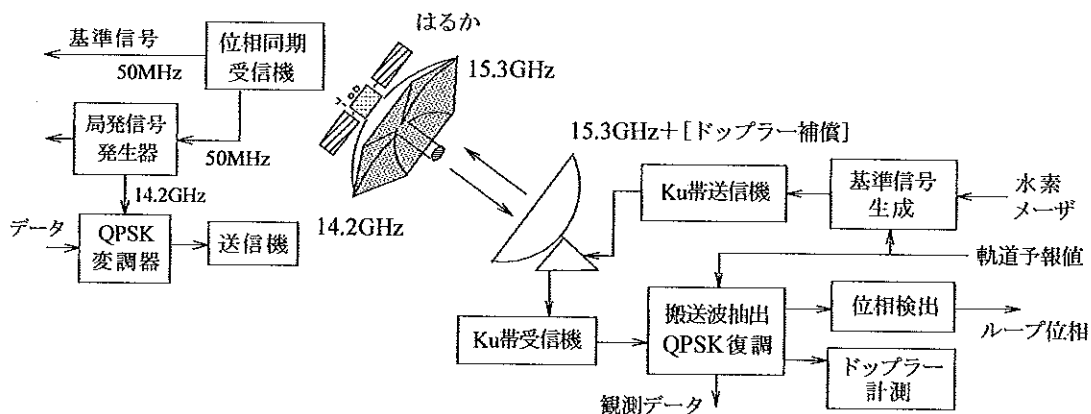


図1 「はるか」のための位相基準信号伝送システムの概略

アップリンク、ダウンリンク間の周波数差は、対流圏や電離層の伝搬路の影響が同じように及ぶようにするという点では小さいほど好ましいが、衛星搭載系において、特にダイプレクサ（後述）において、送受信信号の分離度を高める [14] ためには、より大きいことが望ましい。ここに見る1.1GHzの差は、この二つの面からは適切と言えるものであった。

「はるか」の位相基準信号伝送系の概略を図1に示す。地上局の水素メーザを基準として位相基準信号を送送するに当たっては、大きく分けて、三つの方法がある。

一つは、地上局から、周波数固定のままアップリンクをあげる方法である。この場合、位相基準信号の周波数は、衛星の地上局に対するドップラ周波数分だけ偏移し、観測周波数が地上電波望遠鏡との間でずれることによる信号の損失を生ずる。また相関器においてこの周波数シフトを補正する必要がある。衛星搭載系においては、ドップラ周波数の変動に位相同期受信機が追従する必要がある。しかし、一方で、地上局設備が簡便になるという利点がある。「はるか」の場合、海外の相関局 [15] が周波数シフトを補正しきれないため、この方式は採用していない。

二つ目は、地上局からアップリンクされる15.3GHz帯の信号に軌道予報値によりドップラー周波数補償を行い、信号が衛星に到達したときにちょうど15.3GHzになるようにするものである。この場合、ダウンリンクの信号と地上局の基準信号の位相比較を行うことにより、軌道予報値の誤差や機器の位相変動、大気による影響等を、相関処理時に補正することができる。システムとしては複雑になるが、周波数シフトによる信号損失が低減されることや、相関処理時に（オフラインで）位相補正ができるという利点がある。「はるか」ではこの第二の方法を採用した。10秒以上の長いタイムスケールの位相変動については、相関器 [13] で補正を行っている。

第三は、アップリンク信号に軌道予報値をもとに周波数補償を行った上で、往復のループで測定される位相残差を用いて、アップリンク周波数をリアルタイムに制御し、補正するものである [16]。これは、いわば地上での位相伝送におけるループ制御の方式を衛星に応用したものである。相関器での複雑な補正がなくなるといえる利点があるが、制御が適切に行われないと観測そのものが失敗となる。「はるか」の電波天文観測では、世界で最初のスペースVLBI観測システムの実験として万全を期するために、この方法は採用していない（実験としては実施している [8]）。

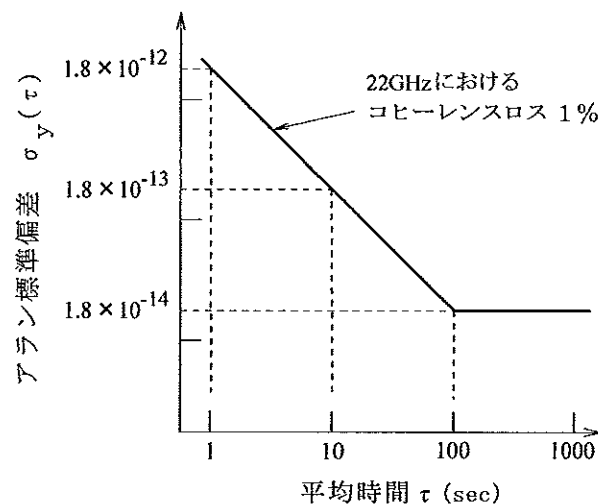


図2 位相安定度に関する設定基準

「はるか」における位相基準信号伝送の仕組みを図1に沿って説明すると、地上局ではアップリンク信号を、衛星に到達したところで周波数がちょうど15.3GHzになるように送信する。衛星では、受信した信号に位相同期した50MHzの基準信号を生成し、観測系の機器と局発信号発生器とに供給する。局発信号発生器では、観測系へのローカル周波数信号とともに、ダウンリンク用の周波数14.2GHzの信号を生成する。観測データは1ないし2ビットでAD変換され、フォーマット化された上で、14.2GHzの電波を搬送波として、128Mbpsのレートで地上に降ろされる。変調はQPSK (Quadri Phase Shift Keying) である。地上局では、受信信号のQPSK復調がなされるとともに、抽出された搬送波成分を用いて往復ループの位相と往復のドップラー周波数シフトを計測する。位相の計測の際にダウンリンクのドップラー周波数シフトの補償が必要となる。測定された位相データから、アップリンク片道での位相ゆらぎを推測する。

衛星上の観測系機器に供給される基準信号には、地上局において発生する位相変動、対流圏と電離層を通過する過程で生ずる位相ゆらぎ、および、衛星上の受信機等において発生する位相ゆらぎが加わる。往復のループに関して測定される位相データには、これらに、下り伝搬路で生ずる位相ゆらぎと、地上局の受信・復調系で発生する位相ゆらぎが加わるとともに、ドップラー予測値と真値との差による位相シフトが含まれる。位相基準信号伝送システムを形成するに当たって、位相安定度特性をループ位相の測定値から判定することとし、その判定の目安を次のように設定した（詳細は文献[8]に述べられている）。往復ループの位相変動のデータを用いてアラン標準偏差を計算し、それを、観測周波数22GHzにおけるコヒーレンスロスが1%以下である条件と比較する。図2に位相安定度に関する設定基準を示す。なお、周波数5GHzにおいてコヒーレンスロスが1%である条件は、図において、22GHzの条件を1秒でのアラン標準偏差 σ_y が 7.8×10^{-12} であるように上方へ平行移動したものとなる。

3. 衛星搭載システムの構成と機能

3.1 搭載システムの構成と機器の設計・製作上の配慮点

衛星搭載観測信号系の中の位相基準信号伝送に関わる部分のシステム構成を図3に示す（観測信号系全体の概要とシステム構成は付録1に述べてある）。位相基準信号伝送に関わる動作の概要は次の通りである。

送受共用のKuバンドのパラボラアンテナ（KANT）により周波数15.3GHzの信号を受信し、受信信号をダイプレクサ（KDIP）を通して、Kuバンド受信機（KRX）に入力する。受信機は位相同期（PLL）型で、

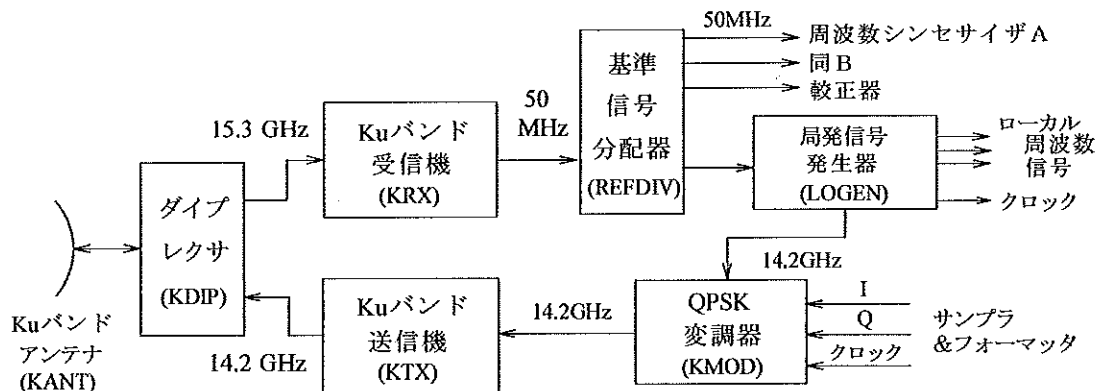
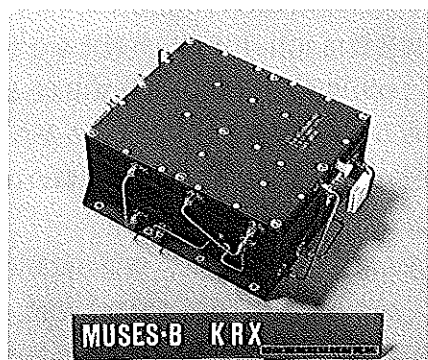
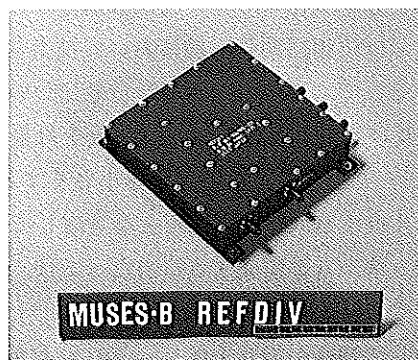


図3 衛星搭載機器の位相基準信号伝送に関わる部分の構成

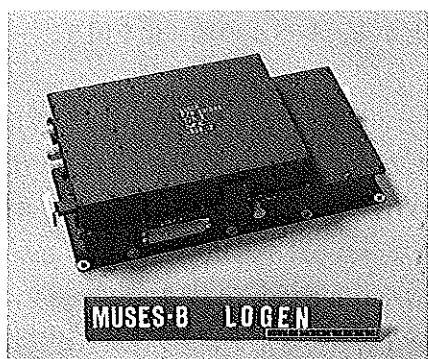
周波数50MHzの基準信号を生成し、それを基準信号分配器 (REFDIV) に入力する。基準信号分配器からは4つの50MHz信号が出力され、観測用の二つの周波数シンセサイザ (SYNTH-A, SYNTH-B) と較正器 (CAL)、および局発信号発生器 (LOGEN) にそれぞれ入力される。局発信号発生器では、観測用の各種ローカル周波数信号を発生するとともに、ダウンリンク搬送波用の周波数14.2GHzの信号を作る。QPSK変調器 (KMOD) では14.2GHz搬送波信号に観測データによってQPSK変調を施す。14.2GHzのダウンリンク信号はKuバンド送信機 (KTX) に送られ、ダイプレクサを経て、KANTにより地上へ向けて送出される。



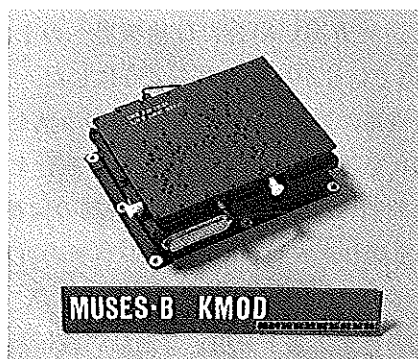
(a)



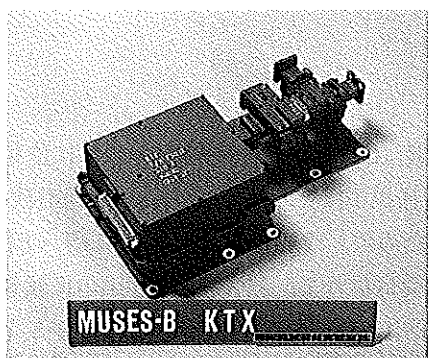
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

図4 (a) Kuバンド受信機 (KRX)、(b) 基準信号分配器 (REFDIV)、(c) 局発信号発生器 (LOGEN)、(d) QPSK変調器 (KMOD)、(e) Kuバンド送信機 (KTX)、および (f) Kuバンドダイプレクサ (KDIP) の外観写真。写し込まれた物差しは10cm。

アンテナを除く六つの機器の外観写真を図4に示す。また、六つの機器の重量と、それら（ダイプレクサを除く）における供給電圧と消費電流を、付録3に示す。

衛星搭載系において、基準信号の周波数を50MHzとした理由は次の通りである。観測系に供給されるローカル周波数信号の位相雑音特性は極力良好なものでなければならない。そのために、ローカル周波数信号を生成するに当たっては、位相雑音の劣化と不要波の増加を抑えるために、ミキサ、すなわち周波数変換回路は用いず、基準信号を単純に通倍する方法を採ることとした。その場合、生成する信号の周波数と基準信号の周波数の比は整数となる（通倍次数）が、位相雑音の劣化を防ぐ上では、通倍次数は小さいことが望ましい。基準信号からはローカル周波数信号とともにダウンリンク用の周波数14.2GHzも生成され、また、一方、基準信号は位相同期受信機において抽出されるので受信周波数15.3GHzとの間で整数比をなさなければならない。そこで、ローカル周波数信号については高い方の二つの周波数、4.3GHzと21.5GHzをとり、それと14.2GHz及び15.3GHzの四つの周波数を対象として、それらの公約数を取ると、大きい方から100MHz、50MHz、・・・となる。通倍次数を小さくする上では最大公約数が望ましいが、低周波数側のローカル周波数信号を生成する回路の構成などを考慮して、第二の公約数である50MHzを採用した。

衛星搭載システムを構成するに当たっては、同じく位相雑音の増大を防ぐために、機器の電源系、および機器間を授受される信号のレベルに関して、十分な配慮を行った。すなわち、電源系に関しては、共通電源ラインを通して雑音が相互干渉し、それにより位相雑音特性が劣化するのを防ぐために、各機器の電源には電圧降下の少ない電源安定化回路を設け、機器間のアイソレーションの増大を図った。また、機器間の信号インターフェースレベルに関しては、それが極端に低い場合には低S/N動作により位相雑音が増加する原因となること、一方高い場合には他機器への干渉源となることから、レベルの統一化を図り、-10dBm～0dBmの範囲で信号が授受されるようにした。

高周波用機器の製作に関して、二つの事柄を述べておく。一つは導波管の使用に関してで、原則として周波数が10GHzを超える信号の伝送には導波管を用いることとした。これは、同軸ケーブルを用いた場合、伝送自体には問題はないが、ケーブル両端の同軸コネクタの締め付け状態によってインピーダンスが変化し、組立、試験を繰り返す過程で、信号レベルの再現性を確保できないおそれがあり、それを避けるためである。もう一つはベア（bare）チップ素子の使用で、10GHz以上の回路の半導体素子には、パッケージに封じられていないベアチップ素子を用いた。高周波においては回路の寄生容量や寄生インダクタンスが特性に大きく作用することから、これらの影響を小さくするためである。ベアチップ素子と受動素子とを超小型のマイクロ波表面実装基板上に組み上げ、一つの機能ブロック単位以上の回路を、ハイブリッドICとして、ハーメチックシールを施したケース内に納めた。

3.2 Kuバンド受信機（KRX）

Kuバンド受信機（KRX）は15.3GHzのアップリンク無変調（CW）信号を受信し、これに位相同期した50MHzの基準信号を発生する位相同期型受信機である。信号捕捉手段としてVCOの周波数掃引機能を有し、高いループ内S/Nの確保と短時間での信号捕捉を両立させるために、位相同期ループ（PLL）の帯域幅を2段階に切り替えている。図5は受信機の機能系統図である。受信信号を、雑音指数約3dBの低雑音増幅器によって増幅した後、第1ミキサにおいて周波数1.8GHzの第1中間周波数信号に、さらに第2ミキサにおいて50MHzの第2中間周波数信号に変換する。変換後の信号を、帯域制限フィルタを通した後AGC増幅器で増幅し、位相同期ループへ入力する。位相同期ループは、位相検波器、ループフィルタ、周波数 $16\frac{2}{3}$ MHzのVCO、3通倍回路、および増幅器からなり、このループから50MHzの基準信号を取り出す。

受信信号の捕捉については、局発信号の周波数を掃引する方式を採っている。位相同期ループの等価雑音

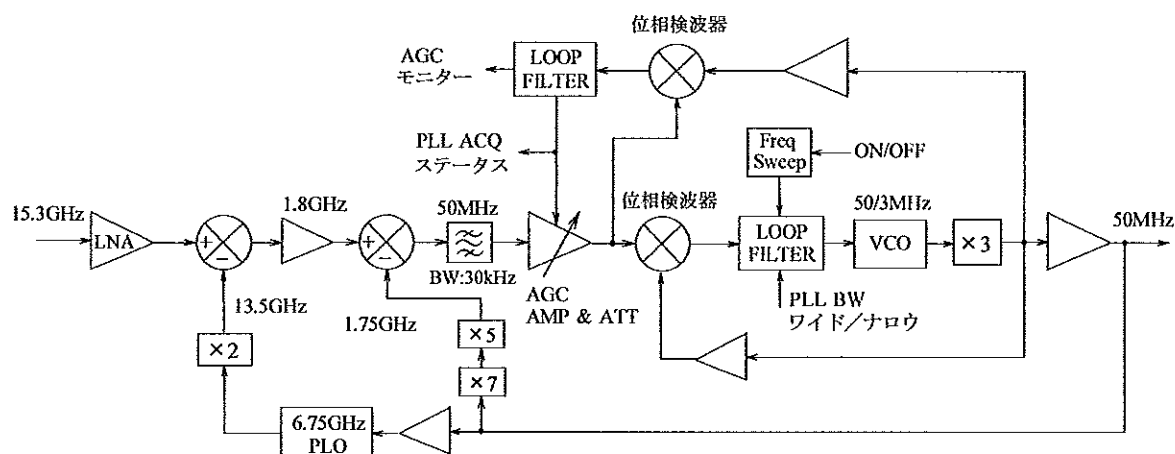


図5 Kuバンド受信機 (KRX) の構成

帯域幅 (2B_L) は10kHz (ワイド) と1kHz (ナロー) の切り替えで、信号捕捉時にはワイドとして捕捉時間の短縮を図り、捕捉後はナローとして、高いループS/Nを確保する。捕捉可能受信周波数範囲は、近地点付近でのドップラー周波数偏移の予測をもとに、15.300GHz ± 460kHz以上 (±30×10⁻⁶ppm以上) とした。信号捕捉時間は5秒以内である。PLLの等価雑音帯域幅の切り替えは自動的で、PLLロックオンの判定から約2秒後にワイドからナローに切り替わる。

受信機の入力レベルの範囲は $-115 \sim -75$ dBmである。下限値 -115 dBmは、位相検波器において、その動作が線形範囲からはずれ、熱雑音入力による飽和が起こり始めるところに相当している。

位相同期ループでは、等価雑音帯域幅ナロウにおいて、ループ内S/Nを30dB以上と規定しており、このとき、出力基準信号の位相ジッターは約±1.3度以下である。

構成機器の設計と動作に関してやや詳細な説明を以下に加える。

- (1) 第2中間周波数段の通過帯域幅を30kHzとしてある(図5参照)。これは、PLLの位相検波器が熱雑音で飽和することの無いように、帯域幅をできるだけ狭くする(熱雑音の 3σ 値でもそのC/Nを0dB以上とする)ことと、信号捕捉の掃引速度を大きくするように帯域幅をできるだけ広くすること、という二つの相反する条件のもとで選択したものである。
- (2) PLLに関して、受信信号レベルの変動に依存した位相回転を極力減らすために、位相検波器入力レベルの安定化を、通常用いられる振幅制限器には依らず、AGCのみによって実現している。
- (3) PLLのVCO単体の周波数は本来ならば50MHzとすべきである。VCOには通常位相雑音特性の良好な水晶制御発振器VCXOを用いるが、この水晶制御発振器は50MHz帯に基本モードの発振が無く、50MHz帯ではオーバートーンモードで無ければ発振できない。ところが、オーバートーンモードの水晶発振器は周波数可変範囲が狭く、衛星のドップラー周波数偏移を追尾するのに必要な可変周波数範囲を確保することができない。そこで、VCXOの発振周波数を基本波モードで発生できる50/3MHz(=16.666...MHz)とし、それを後で3通倍することによって、等価的に50MHzのVCOを形成している。
- (4) 受信機の第1ローカル周波数は13.5GHzであるが、これを、基準信号50MHzの135通倍とその出力(6.75GHz)の2通倍で生成している。135通倍にはフェイズロック発振器(PLO)を用いて回路規模の縮小を図るとともに、PLO内部では、位相検波器を、ステップリカバリーダイオードを用いたサンプリング型位相検波器として、位相雑音の増加を抑えている[17]。

(5) 受信機の第2ローカル周波数1.75GHzについては、50MHzを35通倍することにより生成している(7通倍器と5通倍器の従属接続)。通倍器は、非線形回路により信号を歪ませ、必要な高調波成分をバンドパスフィルタにより抽出するもので、歪み回路で過剰駆動がなければ、位相雑音が付加されることのない良質の通倍方式である。

(6) 受信機の信号捕捉に当たっては、ローカル周波数信号を掃引する。ドップラー周波数偏移を最大 $\pm 27\text{ppm}$ 、ローカル周波数の温度安定度を $\pm 18\text{ppm}$ として、合わせて $\pm 45\text{ppm}$ ($15.3\text{GHz} \pm 690\text{kHz}$)を必要周波数範囲と考え、それを確保するために、ローカル周波数信号の掃引周波数範囲を約 $\pm 900\text{kHz}$ とした。周波数掃引時のループ帯域幅は 10kHz で、掃引速度は $1.3\sim 1.5\text{ MHz/秒}$ としている。同期状態に入った後は、ループS/Nを改善するために狭帯域に切り替える。ただし、同期直後はループが過渡的に不安定な状態にあり、外乱により容易に同期はずれを生ずることから、ループ帯域幅の切り替えは、同期状態に入ってから2秒に行う。

3.3 基準信号分配器 (REFDIV)

Kuバンド受信機から出力された50MHzの基準信号を2台の周波数シンセサイザ (SYNTH-A, -B)、局発信号発生器 (LOGEN)、および較正器 (CAL) に分配する。また、衛星搭載系の単独での試験などのために、温度補償型水晶発振器を内蔵しており、そこからの50MHzの信号を、切り換えで、取り出せるようにしてある。図6に基準信号分配器の構成を示す。

Kuバンド通信系の動作としては、「ノンコヒーレントイネーブル (non-coherent enable)」と「ノンコヒーレントディセーブル (non-coherent disable)」と名付ける2つのモードを定義してある。前者では、Kuバンド受信機が非同期 (ノンコヒーレント) のときには内蔵水晶発振器からの信号を選択、分配し、後者では、Kuバンド受信機の同期 (コヒーレント)、非同期にかかわらず、受信機から供給される信号を分配、出力する。二つのモードの選択はコマンドにより行う。なお、切り替え回路における信号の漏れ込みを完全にゼロにすることはできないので、Kuバンド受信機が同期の状態では、内蔵水晶発振器からの信号 (不要波である) の混入を避けるために、内蔵水晶発振器を停止させる [18]。非同期の時には、逆の混入が起こるが、Kuバンド受信機内蔵の発振器 (PLLのVCXO) の動作を停止させると、再起動後その動作が十分安定になるのに数時間を要すること、また、混入があっても用途上問題ないことから、受信機内蔵の発振器を停止させることはしない。

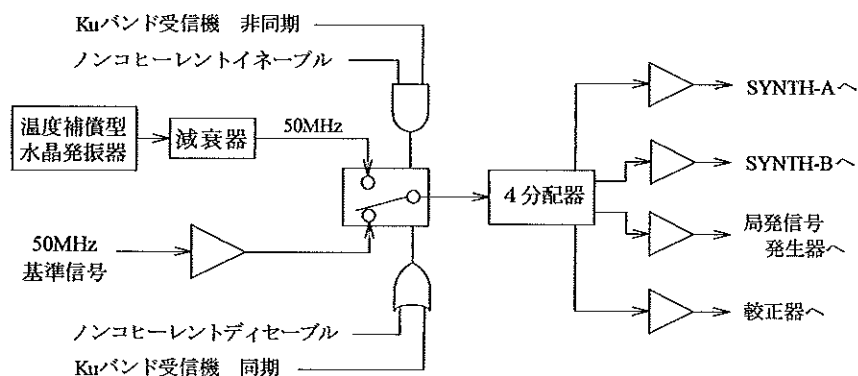


図6 基準信号分配器 (REFDIV) の構成

3.4 局発信号発生器 (LOGEN)

50MHzの基準信号から、ダウンリンク用の周波数14.2GHzの信号と、観測系で必要とする周波数21.5GHz, 4.3GHz, 1.075GHz, 128MHz のローカル周波数信号を、位相がコヒーレントである（相互が同期している）ように、生成する。図7に局発信号発生器の構成を示す。

14.2GHzは50MHzの284倍、21.5GHzは50MHzの430倍、4.3GHzは50MHzの86倍で、これらの倍数、すなわち284, 430, 86 はいずれも、71または43以下の小さな素数に分解できない。そのため、位相雑音の増加の少ない非線形回路による高調波発生的方式を取ることができず、ここでは、フェイズロック発振器 (PLO) を用いた高次周波数通倍を行っている。PLOでは位相雑音の増加は避けられないが、それを極力抑えるために、PLO内の位相検波器に、立ち上がり時間の極めて短いステップリカバリーダイオード（前出, [17]）を用いたサンプリング型位相検波器を用いている。また、PLOのVCO共振素子には、自走状態の位相雑音特

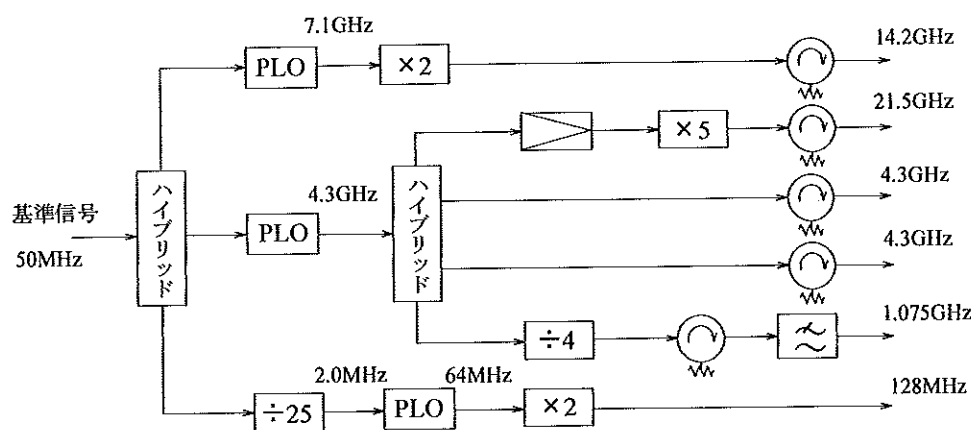


図7 局発信号発生器 (LOGEN) の構成

表1 局発信号発生器からの出力信号の特性

| | | |
|-------------|--------------------|-----------------|
| 高調波出力レベル | 21.5 GHz | --- |
| | 14.2 GHz | -28 dBc 以下 (2次) |
| | 4.3 GHz | -53 dBc 以下 |
| | 4.3 GHz | -54 dBc 以下 |
| | 1.075 GHz | -41 dBc 以下 |
| | 128 MHz | -46 dBc 以下 |
| 不要波出力レベル | 21.5 GHz ± 500 MHz | -60 dBc 以下 |
| | 14.2 GHz ± 1.7 GHz | -53 dBc 以下 |
| | 4.3 GHz ± 400 MHz | -78 dBc 以下 |
| | 4.3 GHz ± 400 MHz | -78 dBc 以下 |
| | 1.075 GHz ± 1 GHz | -80 dBc 以下 |
| | 128 MHz ± 64 MHz | -50 dBc 以下 |
| 位相ジッター | 21.5 GHz | 4.3 deg 以下 |
| (オフセット周波数 | 14.2 GHz | 2.4 deg 以下 |
| =1Hz~40MHz) | 4.3 GHz | 0.82 deg 以下 |
| | 1.075 GHz | 0.23 deg 以下 |

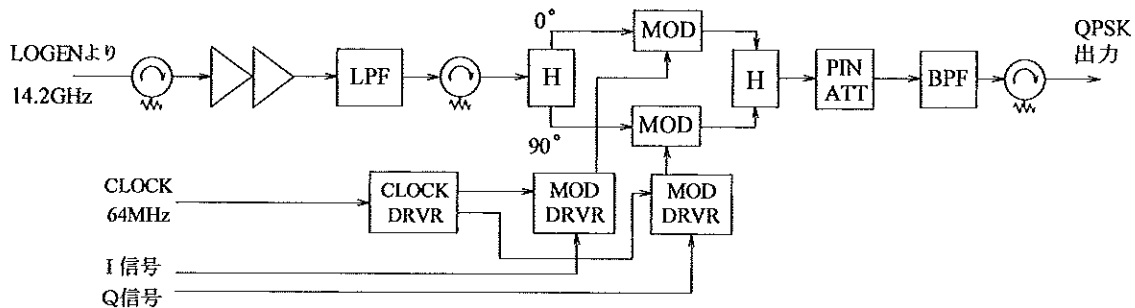


図8 QPSK変調器 (KMOD) の構成

性を良好にするために、比較的小型で大きなQの得られる誘電体共振素子を用いている。
局発信号発生器からの出力信号の主な特性を表1に示す。

3.5 QPSK変調器 (KMOD)

QPSK変調器 (KMOD) は14.2GHzのダウンリンク搬送波に、観測データにより、QPSK変調を施す。

QPSK変調器の構成には、一般に、変調信号の帯域制限の仕方によって、二通りある。一つは、ベースバンドにおいて変調データの帯域制限を行い、その信号により、線形変調器で搬送波のQPSK変調を行うもの、他方は、帯域制限を行わない矩形のデータで、直接、搬送波をQPSK変調し、出力のRF段で帯域制限を行うものである。前者には、良質の帯域制限が可能であること、変調後の搬送波の上下のスペクトラムが対称になること、という利点があるが、後段の電力増幅器が線形特性を持たなければならないため、飽和型の電力増幅器を使うことができない、という不利な点がある。一方、後者では、細かな帯域制限操作を行いにくいこと、最終段で、不要エネルギーを抑圧するため約0.5dBの電力損失を生ずること、という不利な点があるが、後段で飽和型の電力増幅器を使用できるのが利点である。本衛星では、電力利用効率を高めるとともに、機器の小型軽量化を図るために、後者の、RF出力段で帯域制限を行う方法を採用した。RF段での帯域制限フィルターの比帯域は約1% (RF周波数14.2GHz、変調信号128Mbps、変調後のシンボルレート64Msps) となるが、実現可能と判断した。また、この帯域制限フィルタを後述のKuバンドダイプレクサで兼ねることとして、総合的な軽量化を図った。

図8にQPSK変調器 (KMOD) の構成を示す。局発信号発生器から入力されるダウンリンク搬送波用の信号を、まず増幅器において振幅制限し、次いでローパスフィルタにより不要波を抑えた上で、変調器において、入力されるI、Qチャンネルのデータにより、直交2成分に、PSK変調を施す。I、Qチャンネルのデータは64Mspsのシンボルレートを持ち、外部入力の64MHzのクロック信号によってタイミングを合わせた後、変調部へ導かれる。変調部出力につながるPIN減衰器は温度変動による出力レベルの変化を補償するためのものである。KMOD出力におけるスプリアスは、クロック周波数及びクロック周波数の高調波において-49dBc以下、残留搬送波に関して-32dBc以下、それ以外の成分が-51dBc以下、であり、また、搬送波の高調波のレベルは、3倍波まで、-67dBc以下である。

3.6 Kuバンド送信機 (KTX)

変調がかけられた14.2GHzのダウンリンク信号を増幅する。出力電力は約4W (36dBm) である。図9に構成を示す。ドライバ一段を出力3WのPower FETで構成している。温度による利得変動の補償にPIN減衰

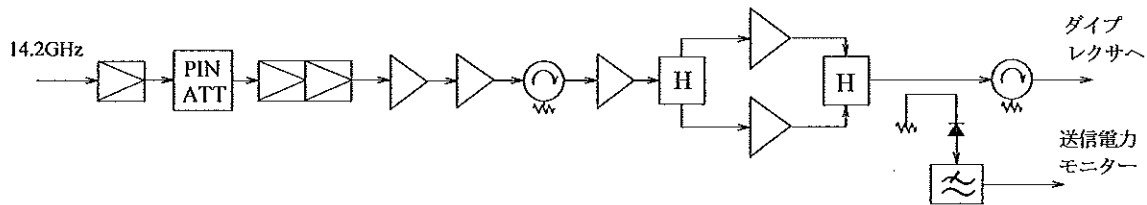


図9 Kuバンド送信機 (KTX) の構成。三角形で示した増幅器はFET，
長方形で囲んだ三角形はハイブリッドIC。

器を用いており、PINダイオードのバイアスを温度に対して可変にすることによって変動の補償をしている。増幅特性の振幅偏差は $14.2\text{GHz} \pm 100\text{MHz}$ において 0.5dB p-p 、 $14.2\text{GHz} \pm 150\text{MHz}$ において 2.0dB p-p である。また、群遅延偏差は $14.2\text{GHz} \pm 100\text{MHz}$ において 1nsec p-p 以下、高調波出力レベルは、2倍波に関して -60dBc 以下、3倍波に関して -55dBc 以下、である。

3.7 Kuバンドダイプレクサ (KDIP)

Kuバンドアンテナに給電する送受信信号の分離を行う。すなわち、アンテナからの受信信号を抽出してKuバンド受信機に出力し、Kuバンド送信機からの送信信号をアンテナに送出する。また、 14.2GHz 送信信号および 14.2GHz 送信機の雑音出力が受信バンドに混入するのを防ぐフィルタの機能をもつ。図10にKuバンドダイプレクサの機能系統図を示す。アンテナポートをK-DIP1、送信機側ポートをK-DIP2、受信機側ポートをK-DIP3と名付けている。

14.2GHz 送信機の雑音出力の受信機への混入に関して、必要な抑圧度を次のように規定した。受信機入力端の雑音電力密度を常温熱雑音レベルである -174dBm/Hz と見積もり、送信機からダイプレクサを介して受信機に混入する雑音レベルをこれより十分低くする。送信側において、送信搬送波から十分離れた受信帯域で生ずる雑音はショット雑音であり、そのレベルは、信号のもとである局発信号発生器出力においては、常温熱雑音のレベル (-174dBm/Hz) に局発信号発生回路の雑音指数 (大きめに見込んで 30dB とする) を乗じたものと考えられる。送信機は、搬送波を局発信号発生器出力のレベル (0dBm 程度) から 4W ($+36\text{dBm}$) まで増幅するが、その過程で、受信帯域で生ずるショット雑音も同一の利得をもって増幅される。従って、ダイプレクサ入力端におけるショット雑音のレベルは

$$(-174\text{dBm/Hz} + 30\text{dB}) + 36\text{dB} = -108\text{dBm/Hz}$$

と推定される。このレベルを受信機入力端の雑音電力密度 -174dBm/Hz に比べて十分小さくすることとして、ダイプレクサの送信フィルタの受信周波数帯に対する抑圧度を 90dB 以上とした。

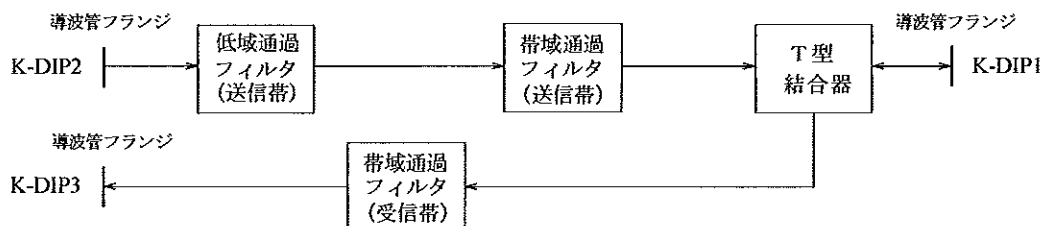


図10 Kuバンドダイプレクサ (KDIP) の構成

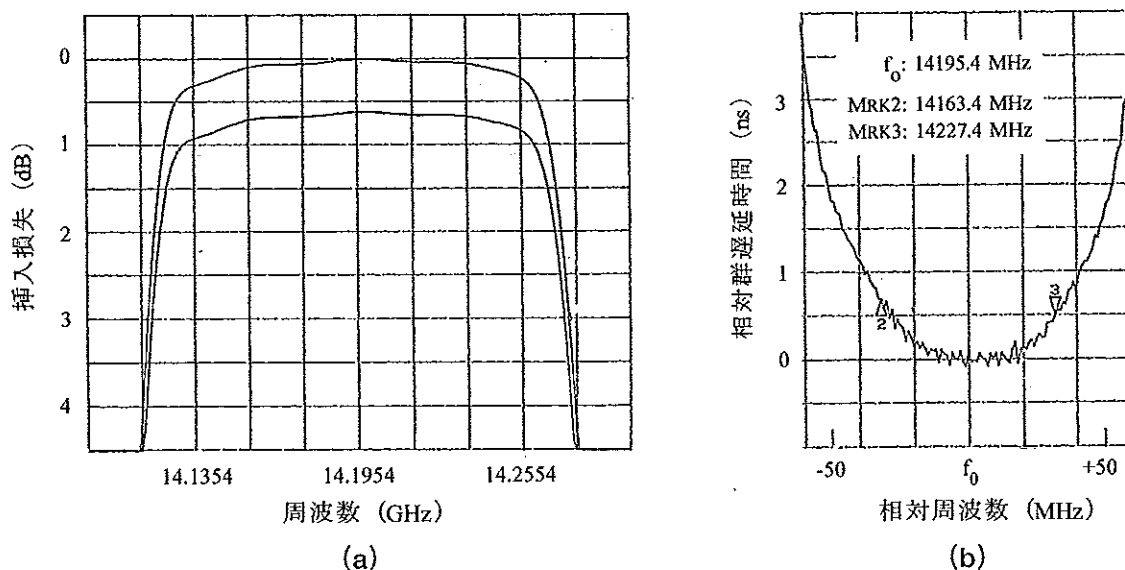


図11 Kuバンドダイプレクサの送信側フィルタの特性。(a) 振幅特性, (b) 群遅延特性。ともに温度23℃, 大気圧下での測定結果。(a)で, 下の線が挿入損失の測定値, 上の線は帯域内振幅偏差を読み取るために移動したもの。

表2 ダイプレクサの主な性能

| | | |
|-------------------------------|---------|--|
| K-DIP2 → K-DIP1 (送信機→アンテナ) | 入力周波数 | 14.2±0.06 GHz |
| | 挿入損失 | 0.67 dB 以下 |
| | 帯域内振幅偏差 | 0.31 dB p-p 以下 (14.2±0.06 GHz) |
| | 帯域外減衰特性 | D/U=103dB 以上 (15.3±0.025 GHz) =73dB 以上 (28.4±0.080 GHz) =41dB 以上 (42.6±0.0120 GHz) |
| | 群遅延偏差 | 0.77nsec p-p 以下 (14.2±0.032 GHz) |
| K-DIP1 → K-DIP3 (アンテナ→受信機) | 入力周波数 | 15.3±0.025 GHz |
| | 挿入損失 | 0.4 dB |
| | 帯域内振幅偏差 | 0.04 dB p-p 以下 (15.3±0.025 GHz) |
| | 帯域外減衰特性 | D/U=90 dB 以上 (14.2±0.1 GHz) =65 dB 以上 (11.7 GHz にて) |
| | 群遅延偏差 | N. A. |
| K-DIP2 | 入力VSWR | 1.26 以下 |
| K-DIP3 | 出力VSWR | 1.13 以下 |
| K-DIP1 | 入出力VSWR | 1.22 以下 |

* D/U: Desired/Undesired

送信側のフィルタは, さきに3.5で述べたように, QPSK変調信号の帯域制限フィルタを兼ねている。図11は測定されたフィルタの振幅特性と群遅延特性 (ともに温度23℃の場合) で, この場合, 帯域内振幅偏差は

0.32dB p-p, 群遅延偏差は0.67ns p-pとなっている。

表2にダイプレクサの主要な性能をまとめて示す。送信フィルタの受信周波数帯 ($15.3 \pm 0.025\text{GHz}$) における減衰特性として、103dB以上を実現している。

3.8 Kuバンドアンテナ (KANT)

「はるか」には、Kuバンドの通信用に、直径45cm、焦点距離18cmのセンターフィード型パラボラアンテナを搭載した。アンテナと駆動機構 (AZおよびELの二軸モータからなる) が支持ブームの先に取り付けられ、支持ブームは軌道上で展開された。ブーム長 (展開機構回転中心から駆動機構エレベーション軸まで) はおよそ87cmである。アンテナの指向方向 (AZおよびEL角) は、軌道要素と時刻、および衛星上の姿勢決定系からの姿勢情報をもとに搭載ソフトウェアによって計算される。アンテナの利得は14.2GHzにおいて29.4dBi, 15.3GHzにおいて30.3dBiであり、偏波は左旋円偏波である。図12に収納状態でのアンテナ及びその支持機構の写真を示す。展開後、アンテナと衛星構体の間の距離は80cmとなっている。

衛星構体とアンテナの間のKuバンドの信号の伝送には、アンテナ部分と支持ブーム上では導波管を、駆動機構部と展開機構部まわりにはフレキシブルケーブルを用いている。駆動機構部まわりのフレキシブルケーブルは、長さが1.2mで、アンテナの駆動とともに曲がり角が変化する。展開機構部まわりのフレキシブルケーブルは、長さ0.45mで、展開後は動かない。使用したケーブルの損失は15GHzにおいて1.5dB/mである。アンテナの回転とともに曲がり角が変化する部分については、ケーブルの絡みに十分注意を払った。

フレキシブルケーブルを採用するに当たっては、駆動に伴う位相の変動も確認を要する事柄であった。テストケーブルを用いた熱真空環境下での試験により、予想される位相変動は1パス当たり1度前後程度と、問題にならない量であることが確かめられた [19]。また、フレキシブルケーブルについては放射線による劣化も調べられ、試験の結果、放射線によって損失が若干増加する (位相変動の増加は極めて僅か) ことが予想されたため、搭載したケーブルには、ステンレス製のフレキシブルパイプが被せられた。

その他、大型展開アンテナからの反射波がKuバンドアンテナの第1サイドローブ (主ビームから \pm 約5

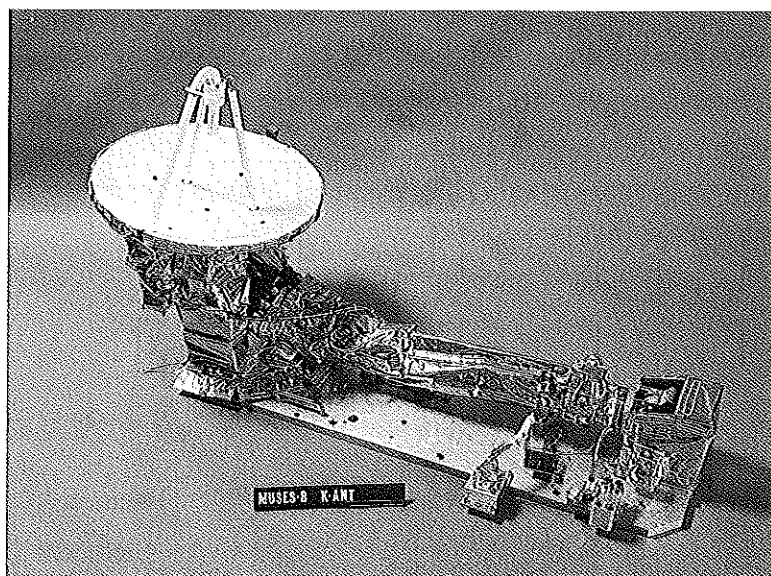


図12 Kuバンドアンテナの外観写真。展開機構は収納した状態。パラボラアンテナの直径45cm。

度の方向)に入ることによる、マルチパスによる位相誤差も検討の対象として挙げられたが、幾何学的位置関係から、このような入射は実際上起こらないことが判明した。なお仮に起こったとしても、これによって生ずる位相変動は1度前後と小さい[20]。

4. 衛星搭載システムの性能

衛星搭載観測信号系に関して、MUSES-B一次噛み合わせ試験において、衛星に組み込まない形での総合的な試験を行い、各機器およびシステムに関する動作の確認と詳細な特性測定を行った。その上で、MUSES-B FM総合試験において、衛星に組み込んだ状態での動作確認とシステム特性の測定を行った。さらに、内之浦での打ち上げオペレーションにおいて、動作の最終確認を行った。

Kuバンドの通信および位相基準信号の伝送に関する試験においては、図13に示す測定系を形成した。アップコンバータ(U/C)、ダウンコンバータ(D/C)およびローカル信号発生器(LOGEN)からなる周波数変換部、QPSK復調器、およびPCM復調器等は、臼田宇宙空間観測所に設置するもの[8]を移動して用いた。MODと名付けた部分は2台の周波数シンセサイザからなり、5MHzの基準信号から140MHzと100MHzの信号を生成する。基準信号源としては高位相安定水晶発振器を用いた。

4.1 位相雑音特性

衛星から出力される14.2GHzのダウンリンク信号の位相雑音と、衛星に入力された15.3GHzのアップリンク信号の位相雑音とをそれぞれ測定することにより、衛星搭載系の位相雑音特性を調べた。図14はFM総合試験において取得した位相雑音特性である。図の(a)は14.2GHzダウンリンク信号を地上系ダウンコンバータ入力端で測定したもの、(b)は15.3GHzのアップリンク信号を地上系アップコンバータ出力端で測定したものである。(a)の、(b)からの増加は、主に10Hzから1kHzの範囲において見られる。位相雑音特性をバイアス周波数に関して積分して得られる位相角ゆらぎは、(a)において3.4deg、(b)において2.5degで

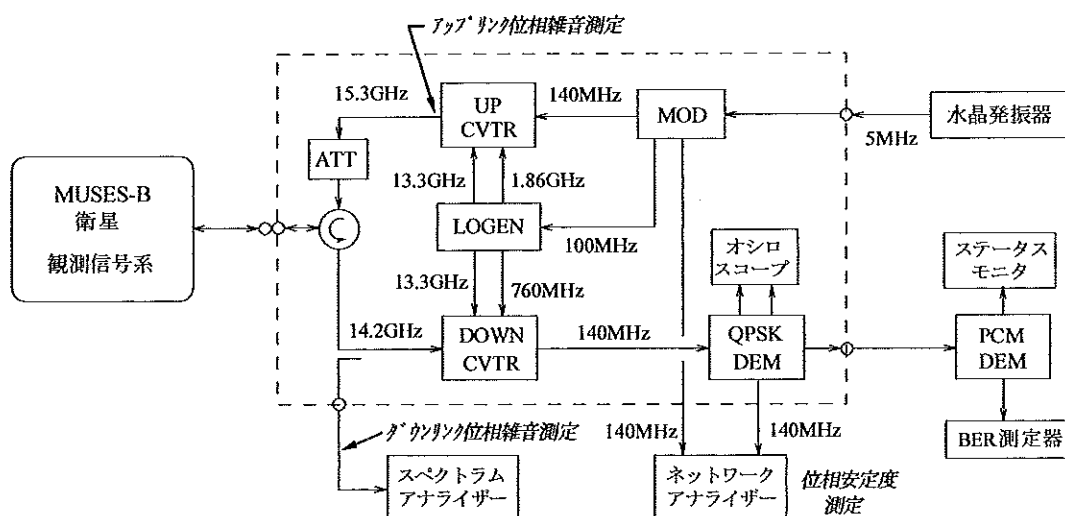
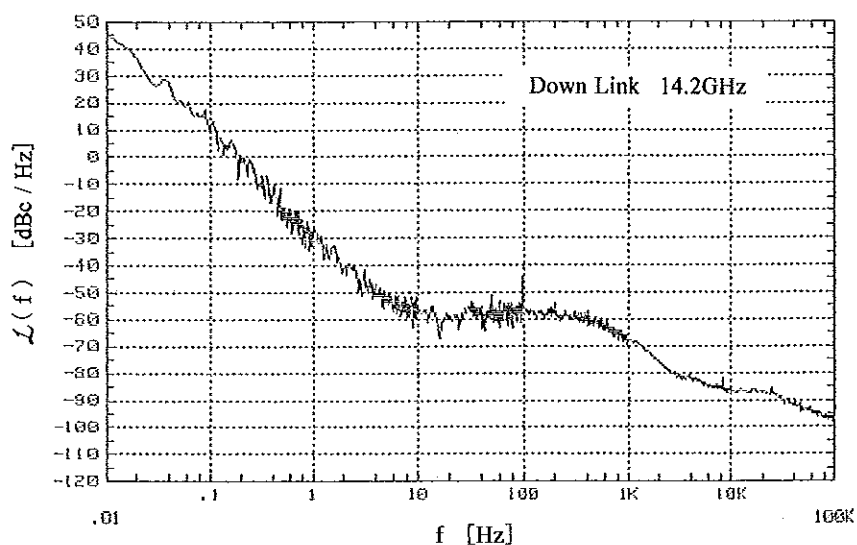
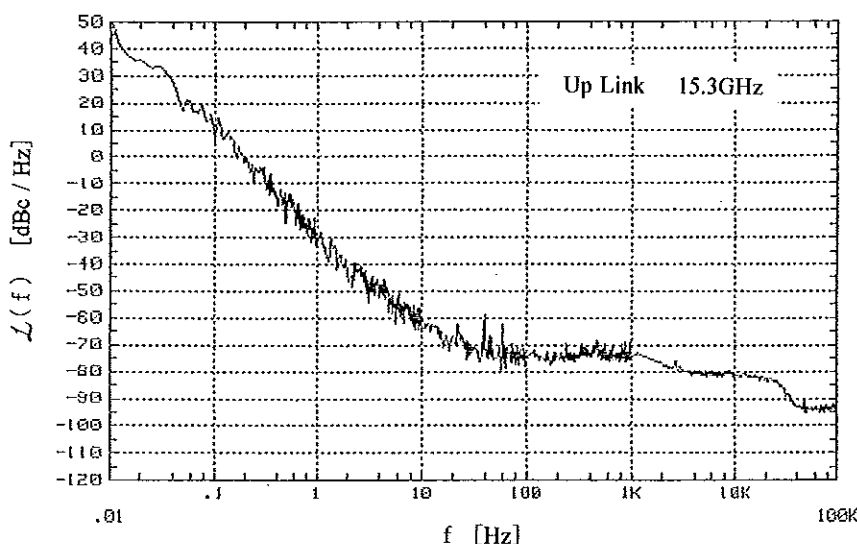


図13 位相雑音および位相安定度測定システム



(a)



(b)

図14 位相雑音の測定結果 (a) 14.2GHzダウンリンク信号について地上系ダウンコンバータ入力端で測定したもの、(b) 15.3GHzのアップリンク信号について地上系アップコンバータ出力端で測定したもの。

ある。以下に、測定された位相雑音特性の分析を行う。

位相雑音は雑音によって微小角の位相変調がかけられた信号とみなせる。位相雑音のレベルは周波数シフトによって変化せず、周波数の通倍と分周によって変化する（通倍比、分周比に比例）。通倍比、分周比に比例しない変動や、通倍・分周以外の操作によって増加する位相雑音がある場合、それをハードウェアによって付加された位相雑音の劣化分と考える。図14の場合、アップリンク信号の位相雑音特性を、14.2GHzと15.3GHzの周波数比倍（ -0.6dB 加える）したものがダウンリンク信号の位相雑音特性になっていれば、劣化のない理想的なシステムであることになる。なお、 0.6dB は測定結果に見るゆらぎの幅に比べて小さいの

で、以下では、図14の (a) と (b) を直接比較する。

周波数範囲を0.01Hz～10Hz, 10Hz～1kHz, 1kHz以上, の三つの領域に分ける。0.01Hz～10Hzではアップリンク信号, ダウンリンク信号の位相雑音のレベルはほぼ一致している。10Hz～1kHzでは, ダウンリンク信号の位相雑音が15dB程度大きい。1kHz以上では, 逆に, ダウンリンク信号の位相雑音が, アップリンク信号に比べて数dB～10dB小さい。

はじめの0.01Hz～10Hzの範囲は, Kuバンド受信機のPLL (ループ帯域幅1kHz) の位相応答周波数範囲 (13Hz程度以下と推算 [21]) にあり, アップリンクの搬送波がもつ位相雑音をKuバンド受信機はそのまま通過する。測定結果はそれに合致している。

ダウンリンク信号において10Hz～1kHzの範囲に見られる位相雑音は, 主に, 局発信号発生器において7.1GHzを発生させるPLO (50MHzの基準信号を142通倍する) の位相検波器で発生する位相雑音であると考えられる [22]。サンプリングダイオードの立ち上がり時間のゆらぎ (ジッター) が雑音発生の原因である。このゆらぎには周波数特性が無いため, 位相雑音レベルに周波数依存性は現れないと予想されるが, 実際, 図14 (a) に見られる位相雑音の (b) からの増加分には明瞭な周波数依存性は見られない。

1kHz以上では, ダウンリンク信号に, 7.1GHzを発生させるPLOのVCOが自走状態で発生する位相雑音の高周波数成分 (PLLの固有周波数より高い成分) が現れている [23]。この場合, アップリンク信号の位相雑音特性には無関係である。

4.2 位相安定度

位相ゆらぎは, 4.1 に記述した位相雑音の, 当該システムにおいて積分操作によって除去できない低域の成分である, ということができる。システムの位相安定度は測定系の積分時間の変数として与えられることになる。衛星搭載系の位相安定度特性を求めるために, 図13に示した測定系において, QPSK復調器で再生された周波数140MHzの信号の位相ゆらぎを測定した。測定系において, 位相雑音の最も大きな発生源は, 最も高い通倍次数で作られる13.3GHzのローカル周波数信号であるが, その位相雑音は, 測定系の往復の経路で相殺される [24]。QPSK復調器に入力される140MHzの信号がもつ位相雑音は, 主に, 1.86GHzと760MHzのローカル周波数信号に付随する位相雑音と衛星搭載系で付加される位相雑音の和であり [24], 量的には後者が支配的と考えてよい。QPSK復調器で搬送波再生の際に付加される位相雑音も, 測定に影響

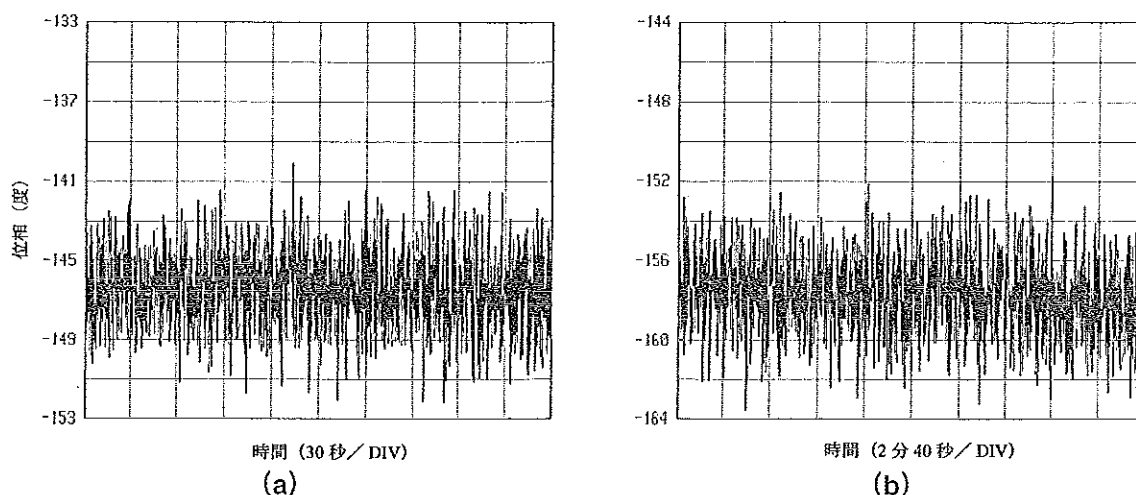


図15 位相測定データの例。(a) 短時間測定 (5分), (b) 長時間測定 (26分)

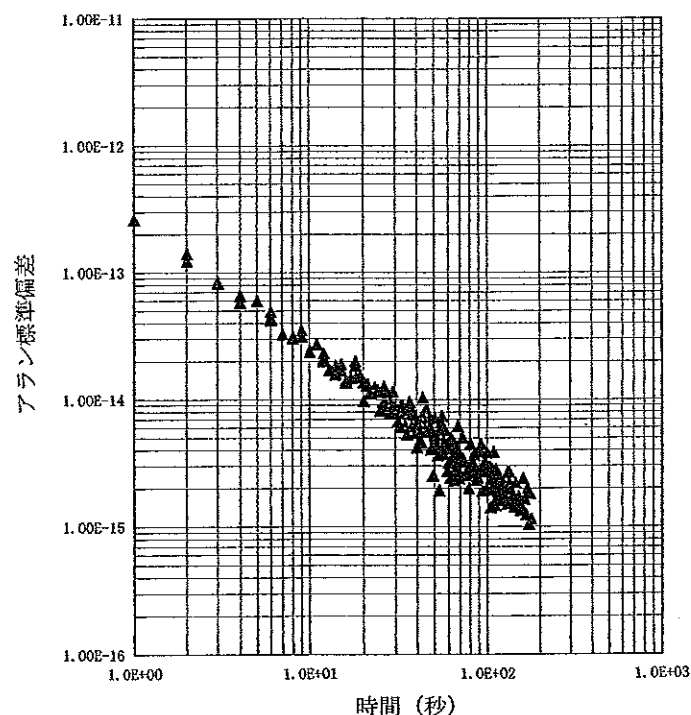


図16 衛星搭載系の位相安定度

を与えない程度のものである [25]。これらのことから、測定される位相ゆらぎを、衛星搭載系が搬送波に付加した位相雑音と見なすこととした。

はじめに位相測定データの例を示す。図15 (a) は短時間測定 (5分と設定) の例、図15 (b) は長時間測定 (26分) の例である。長時間測定は、実際には26分を単位として連続8回行い、それから長周期安定度のデータを取得している。位相安定度の測定では、受信機入力レベルを、その下限値である -115dBm とした。

長時間位相測定から位相安定度特性 (アラン標準偏差) を求めた結果を図16に示す。図は打ち上げオペレーションにおいて衛星搭載系の最終確認を行った際に得たものである。平均時間200秒付近まで、ゆらぎは白色性であり、フリッカー性のゆらぎが起こっていないことが見て取れる。図2に示した位相安定度の基準 (22GHzにおいてコヒーレントロス1%) に対して、それを約 10^{-1} 倍したものとなっており、満足な性能と判断された。以後、図16の特性を衛星搭載系の位相安定度特性を代表するものとして用いている。

5. 衛星打ち上げ後の動作

衛星「はるか」は1997年2月12日に内之浦から打ち上げられた。ロケットによる軌道投入後、近地点高度を高めるマヌーバが施された。以後、遠地点高度21,400km、近地点高度560km、軌道傾斜角31度の楕円軌道を周回している。打ち上げから約2週間後の2月24日から2月28日にかけて大型アンテナの展開が行われ、3月に入って、2月から続いていた衛星の姿勢制御系の一連の試験が終了した。Kuバンドアンテナの指向

制御の試験も衛星姿勢制御系の試験に並行して行われ、その完了を受けて、3月11日に、「はるか」と臼田地上局との間のKuバンドの通信の実験を開始した。実験は順調に行われ、同日から、128Mbpsのレートでのデータの受信が行われるとともに、ループ位相とKuバンドドップラーの測定がなされた。海外リンク局 [8] と「はるか」との通信も3月20日ころから開始された。

「はるか」と臼田局との間のKuバンドの通信の回線状況を初期の記録から示すと（この日臼田の天候は霧）、「はるか」が遠地点付近（レンジ25,200km）にあったとき、アップリンクにおいて、衛星搭載受信機（KRX）の受信レベルは -93.5dBm 、これから導かれたKRXのC/Noは 76.6dB で、所要 C/No (60.0dB) に対して約16dBの回線マージンがあった。また、ダウンリンクに関しては、受信C/Noの測定値が 99.3dB で、所要C/No (89.9dB) に対して約9dBのマージンがあった。いずれも十分な余裕である。

地上-衛星-地上のtwo-wayのループについて測定された位相安定度特性は良好であった。図17にループの位相データから求めたアラン標準偏差の代表例（臼田、1997年3月20日）を示す。短かい平均時間では機器に起因する白色性の位相ゆらぎが支配的で、長い平均時間に大気起因するフリッカー性のゆらぎが現れている。測定されたループの位相安定度特性は、観測周波数1.6GHzおよび5GHzにおいて、コヒーレンスロス1%の条件を十分満たし、実際、両周波数において、臼田局に降ろされた「はるか」の観測データと、臼田64mアンテナなどの地上電波望遠鏡の観測データとの間で、次々と干渉縞の検出がなされた。観測周波数22GHzに関しては、打ち上げとともに搭載大型アンテナの給電回路の損失が著しく増大するという不測の事態が起こり、スペースVLBI観測を行うに到らなかった [26]。位相基準信号の伝送に関しては、図17の例にも見るように、22GHzにおけるコヒーレンスロス1%という（厳しい）基準を、短周期では十分満たし、一方長周期においては大気起因するゆらぎのために満たされてはいないが、大気起因する長周期のゆらぎは相関処理において位相補償を行うことが可能であるので、22GHzに対しても機能しうるシステムを実現できたと判断している [8]。

なお、1997年年末から1998年前半にかけて、オリオン星雲Orion-KLの水メーザ天体において極めて大きなバーストが起こり、22GHz帯の電波強度が「はるか」によって検出できるレベルとなった。1998年2月、

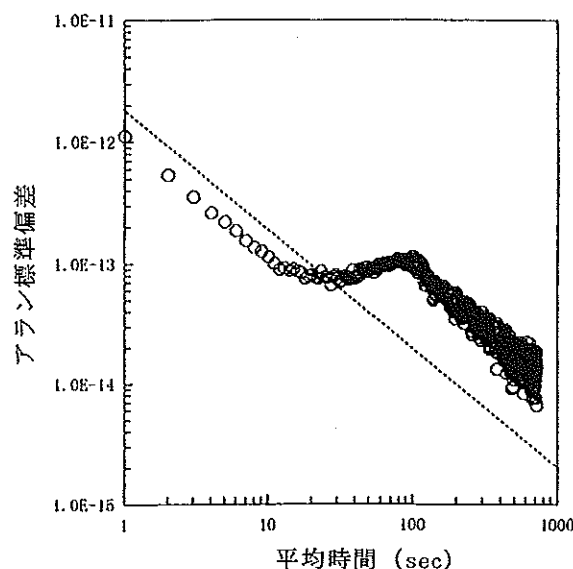


図17 軌道上の「はるか」と臼田地上局の間のリンクにおいて取得されたループ位相安定度の代表例（1997年3月20日）。

「はるか」とアメリカ国立天文台VLBA (Very Long Baseline Array) との間で、22GHzの観測において干渉縞が検出され、さらにその天体のイメージも生成された [27]。この観測の際の地上リンク局は海外局 (NASAゴールドストーン局) であったが、このOrion-KLの水メーザの観測の成功は、「はるか」の位相基準信号伝送系および搭載観測信号系が22GHzにおいても機能することを確認したものとなった。

6. む す び

科学衛星「はるか」において、Kuバンドの通信のための搭載系はミッション機器であった。位相基準信号の伝送と128Mbpsというレートの大容量データの伝送は、工学実験衛星「はるか」の工学課題であるとともに、「はるか」によるスペースVLBI観測を可能にするための基本要素であった。位相基準信号の伝送では、地上系とともに、衛星搭載系に関して、高い位相安定性が要求され、開発した「はるか」の搭載系においては、必要とされる性能を満たすことができた。臼田宇宙空間観測所に設置した地上系 [8] とともに、衛星搭載系は、「はるか」によるスペースVLBI観測において、その役割を十分に果たしてきた。「はるか」における衛星搭載系開発の実績は、さらには、「はるか」に続くスペースVLBI衛星 2 号機 [7] へ向けての重要な技術的基礎をなすものとなる。

本稿に述べた衛星搭載系の開発は、その設計、製作、試験などに携わった多くの方々の努力と献身のもとになされたものである。本稿はそれらの多くの方々を代表して著者らが取りまとめを行ったものである。

付録 1 観測信号系の概要

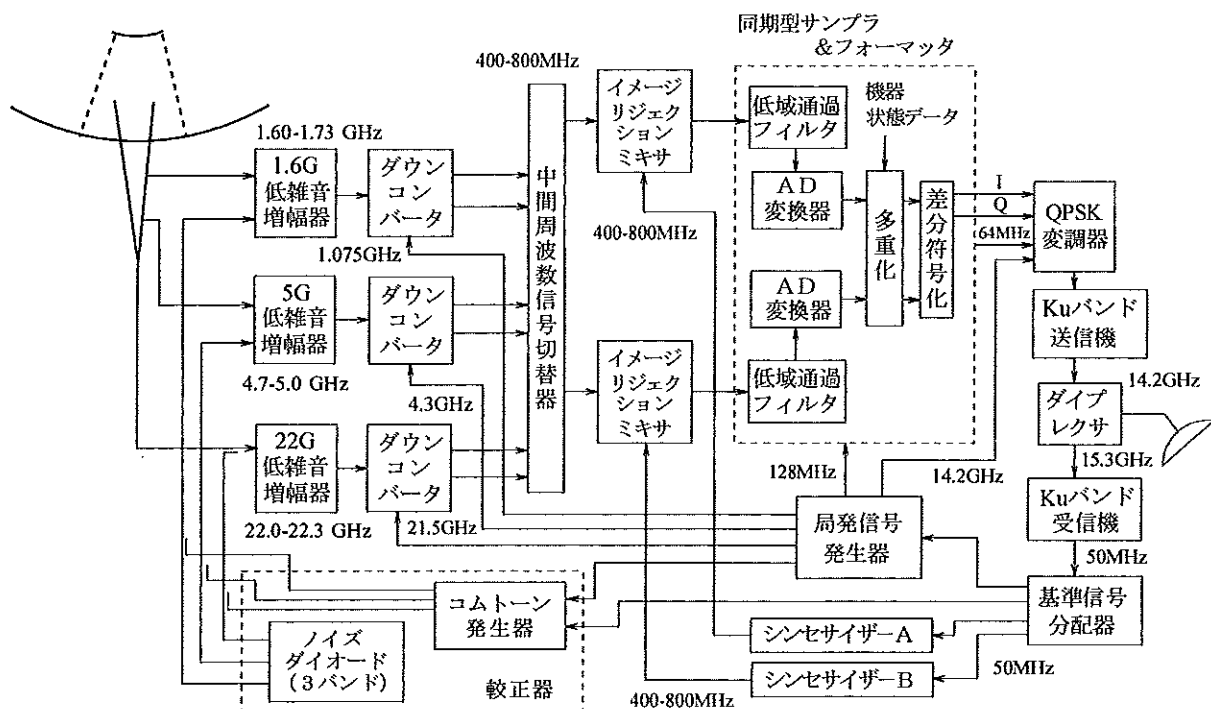
「はるか」は1.6, 5および22GHzの三つの周波数帯で電波天体を観測するVLBI用観測システムを搭載した [26]。搭載システムは、三つの観測周波数に対する低雑音増幅器 (LNA) とダウンコンバータ (DC), 中間周波数信号切替器 (IFSW), 二台の周波数シンセサイザ, イメージリジェクションミキサ (IRM), 同期型サンプラおよびフォーマッタ (SSF), 局発信号発生器 (LOGEN), 較正器, QPSK変調器, Kuバンドの送信機と受信機, 基準信号分配器, 送受共用のKuバンドアンテナなどからなる。付図 1 に搭載システムのブロックダイアグラムを示す。3 バンドはいずれも左回り円偏波を観測しており、その観測周波数範囲は、それぞれ、1.60~1.73 GHz, 4.7~5.0 GHz, 22.0~22.3 GHz, 観測周波数帯域幅は、いずれにおいても、16MHz, 32MHz, あるいは64MHzである。

低雑音増幅器 (LNA) は各バンドともHEMT (高電子移動度トランジスタ) を用いており、雑音温度は、1.6GHzで30~40 K (周波数と温度に依存、以下も同様)、5GHzで50~60 K, 22GHzで130~160 Kである。3 台のダウンコンバータ (DC), 1.6GHz DC, 5GHz DC, 22GHz DCには、それぞれ、1.075GHz, 4.3GHz, 21.5GHzのローカル周波数信号が入力される。これらのローカル周波数信号は高い位相安定度を必要とするもので、位相基準信号の伝送 (phase transfer) によって供給・生成された50MHz基準信号を用いて、局発信号発生器において作られる。各ダウンコンバータからは、1.6GHz DCにおいて525~655 MHz, 5GHz DCにおいて400~700 MHz, 22GHz DCにおいて400~800 MHzの中間周波数信号が、それぞれ同一内容で2系統出力され、全3周波数で6系統の信号が中間周波数信号切替器 (IFSW) に入力される。

中間周波数信号切替器では、入力された6系統の信号から任意の2系統の信号を (コマンドにより) 選択

し、それらを2台のイメージリジエクションミキサに向けて出力する。イメージリジエクションミキサでは、中間周波数信号の任意の32MHz帯域の信号を、320kHz~32MHzのベースバンド信号（上側帯域を抽出）に周波数変換する。取り出す周波数帯域を設定するために、2台の周波数シンセサイザ（SYNTH-A、-B）から、各イメージリジエクションミキサへ、それぞれ独立の局発信号が供給される。周波数シンセサイザは、50MHz基準信号をもとに、400~800 MHzの間の周波数を1 MHzステップで発生するもので、周波数の設定はコマンドにより行う。こうして、2周波数帯のそれぞれが同時に観測されるモードと、単一周波数帯において二つの異なった周波数帯が選択されて観測されるモードの二つを取ることができる。

同期型サンプラおよびフォーマッタ（Synchronous Sampler & Formatter, SSF）では、2台のイメージリジエクションミキサから各1系統ずつ出力されるベースバンド信号を、16MHz又は32MHz切り替えのローパスフィルタにより帯域制限を行った後、高速AD変換器により、2ビットまたは1ビット量子化でデジタル化を行う。取り込むチャンネルの数（2ないし1）、ローパスフィルタの帯域、および量子化ビット数の組み合わせにより、付表1に示すような3つの観測モードがある。通常はモード1で観測を行っている。デジタル化された観測データは、フォーマッタにおいて、フレーム同期パターン、フレームID番号、観測系機器ステータスデータなどと多重化処理され、ダウンリンク用の128Mbpsの観測データとして編集される。このデータは、さらに、QPSK変調データ（I、Qデータ；各64Mbps）に変換され、差分符号化が施されて、64MHzのクロック信号とともに、QPSK変調器（KMOD）へ向けて出力される。なお、SSFには、局発信号発生器（LOGEN）から、50MHz基準信号に位相同期した周波数128MHzのクロック信号が供給され、各種タイミングコントロールと64MHzのクロック信号の生成に使われる。また、高速AD変換器入力には振幅検出用の検波器（12ビットADを用いて出力）を設けてあり、そこでのレベルモニターに基づき、入力信号の電圧レベルをコマンドによって調整し（各ダウンコンバータにおいて、可変減衰器により調節）、高速AD変換器の入力信号電圧を最適化している。



付図1 「はるか」搭載の観測信号系の構成

付表 1 観測モード

| | モード 1 | モード 2 | モード 3 |
|-------------|-------|-------|-------|
| チャンネル数 | 2 | 2 | 1 |
| チャンネル当たり帯域幅 | 16MHz | 32MHz | 32MHz |
| 量子化ビット数 | 2 | 1 | 2 |

QPSK変調器, Kuバンド送信機, Kuバンド受信機, 送受共用Kuバンドアンテナ等については, 本文に詳しく述べてあり, ここでは繰り返さない。

較正器はコムトーン発生器とノイズダイオードからなる。コムトーン発生器は1MHz間隔の櫛状の輝線スペクトラムを有する信号 (P-CAL信号と呼ぶ) を発生するもので, 観測周波数帯域内の位相・振幅特性の較正を行うのに用いる。ノイズダイオードはシステム雑音温度の測定, 周波数-振幅特性の較正に用いる。これらの較正用信号は各バンドの低雑音増幅器に方向性結合器を介して注入される。較正用信号はいずれもコマンドによりON, OFFされる。また, 設定された周期でスイッチするモードもある。

搭載観測信号系の軌道上での動作状況は文献 [26] に詳しく述べられている。

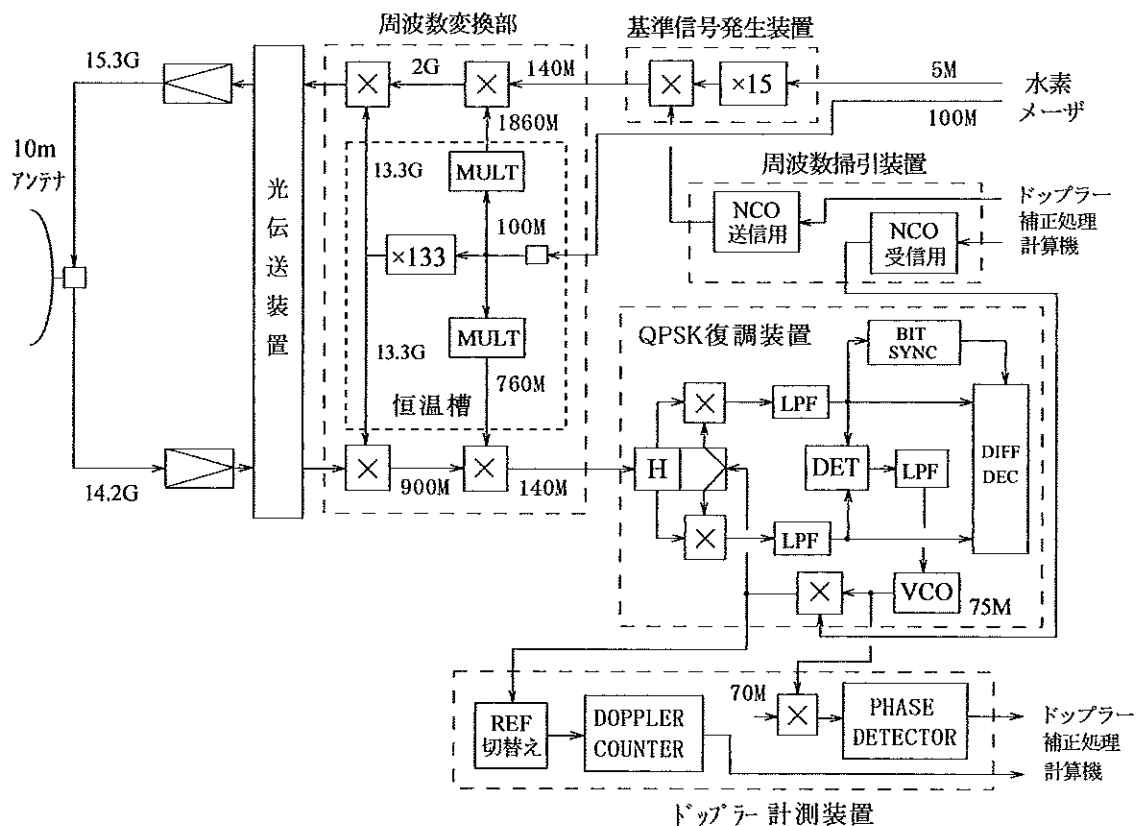
付録 2 臼田地上局システムの概要

臼田宇宙空間観測所研究棟 2 階にMUSES-B (「はるか」) 運用のための地上設備が設置され, 研究棟から直線距離500mの山間傾斜地に直径10mのKu帯用のパラボラアンテナが設置された [8]。研究棟の装置とアンテナの間は光ファイバーケーブルにより接続された。付図 2 に臼田地上局の位相基準信号伝送に関わる部分の構成を示す。図をもとに, 位相基準信号伝送に関わる地上局システムの動作を説明する。

まず, 基準信号発生装置において, 水素メーザ原子周波数標準器から供給される5MHzの信号を15通倍し, そこに周波数掃引装置において生成されたアップリンクドップラー周波数補償用信号を混合する。アップリンクドップラー周波数補償用信号は, アップリンクの電波の周波数が衛星で受信されたときに丁度15.3GHzになるように, 衛星の軌道情報に基づいて作成される [28]。基準信号発生装置の出力 (140MHz) は, 周波数変換部において, 2GHz, 次いで15.3GHzへとアップコンバートされる。周波数変換に当たって, 1860MHz及び13.3GHzの二つのローカル周波数信号が用いられるが, それらは, 水素メーザから供給される100MHzの基準信号を用いて生成される。15.3GHzのアップリンク信号は光ファイバーケーブルを通してアンテナ地点に導かれ, そこで, 増幅された上で衛星に向けて送信される。

周波数が14.2GHzとなり, QPSK変調を施されて戻ってきた衛星からのダウンリンクの電波は, アンテナで受信され, 増幅された上で, 光ファイバーケーブルを通して, 研究棟に導かれる。研究棟では, まず周波数変換部において, 900MHz, 次いで140MHzへと, ダウンコンバートされる。そこでは, 先に用いられた13.3GHz, および同じく水素メーザの100MHz信号から生成された760MHzのローカル周波数信号が用いられる。13.3GHz, 1860MHzおよび760MHzの三つのローカル信号を生成する回路は恒温槽に収納され, 温度による位相ドリフトを抑えている。また, アンテナの給電部近くに設置される機器も, 温度制御を行った小室内に入れ, 温度による位相変化を緩やかにしている。

周波数140MHzとなった受信信号はQPSK復調装置に入力され, そこで搬送波の抽出とQPSKの復調が行



付図2 臼田地上局の位相基準信号伝送に関わる部分の構成

われる。搬送波抽出のための、位相検波器、低域通過フィルター、電圧制御発振器からなるループにおいて、周波数掃引装置において生成したダウンリンクドップラー周波数補償用の信号が混合される。搬送波抽出ループからはループ位相検出用の信号とドップラー計測用の信号が取り出される。ドップラー計測装置内には位相検出器とドップラーカウンターがあり、そこでループの位相と、two-wayのドップラ周波数シフトが計測される。

付録3 搭載機器の重量および必要電源

位相基準信号伝送に関わる搭載機器 (Kuバンドアンテナを除く) であるKuバンド受信機 (KRX), 基準信号分配器 (REFDIV), 局発信号発生器 (LOGEN), QPSK変調器 (KMOD), Kuバンド送信機 (KTX), およびKuバンドダイプレクサ (KDIP) の重量を付表2に, それら (ダイプレクサを除く) における供給電圧と消費電流を付表3に示す。

付表2 機器の重量

| | |
|--------------------|---------|
| Kuバンド受信機 (KRX) | 2.85 kg |
| 基準信号分配器 (REFDIV) | 1.00 |
| 局発信号発生器 (LOGEN) | 2.44 |
| QPSK変調器 (KMOD) | 1.32 |
| Kuバンド送信機 (KTX) | 2.11 |
| Kuバンドダイプレクサ (KDIP) | 0.54 |

付表3 電源電圧と消費電流

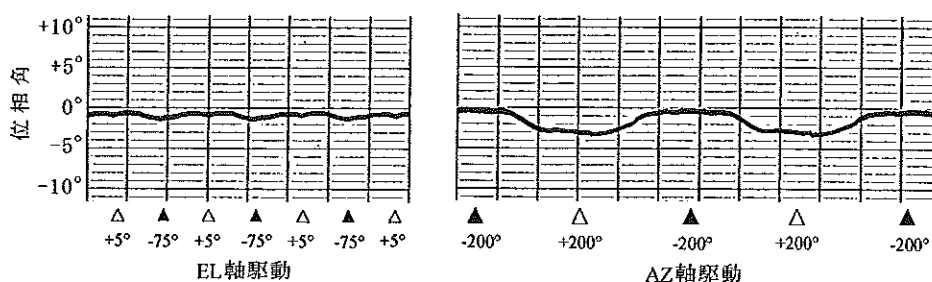
| | KRX | REFDIV | LOGEN | KMOD | KTX |
|-------|---------|---------|---------|----------|--------|
| +27V系 | | | | | 1.4A以下 |
| +12V系 | 170mA以下 | 158mA以下 | | | |
| +7V系 | | | 234mA以下 | 125mA以下 | |
| +5V系 | 210mA以下 | 1mA以下 | 0.2mA以下 | 0.1mA以下 | |
| -7V系 | | | 8.3mA以下 | 422mA以下 | |
| -12V系 | 90mA以下 | 19mA以下 | 379mA以下 | 12.4mA以下 | |
| +15V系 | | 0 mA* | 0 mA* | 0 mA* | |

* コマンド非応答時

参考文献及び注記

- [1] H. Hirabayashi: "Introduction to the VSOP Mission and its Scientific Goals," *Adv. Space Res.*, Vol. 11, No. 2, pp. (2) 372- (2) 379, Pergamon Press, 1991.
- [2] H. Hirosawa and H. Hirabayashi: "VLBI Space Observatory Programme (VSOP) Satellite," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 10, No. 6, pp. 17- 23, 1995.
- [3] H. Hirosawa and H. Hirabayashi: "Design and Development of the Space VLBI Satellite for the VSOP (VLBI Space Observatory Programme)," *Space Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 161-167, 1996.
- [4] H. Hirosawa, H. Hirabayashi, H. Kobayashi, Y. Murata, T. Kii, P. Edwards, M. Natori, T. Takano, Z. Yamamoto, T. Hashimoto, K. Inoue, A. Ohnishi, T. Ohshima, T. Ichikawa, K. Fujisawa, K. Wajima, R. Okayasu, M. Inoue, N. Kawaguchi, S. Kameno, K. Shibata and Y. Asaki: "Space VLBI Satellite HALCA and Its Engineering Accomplishments," *49th International Astronautical Congress*, Paper No. IAF-98-Q.1.01, Melbourne, Sept 28-Oct 2, 1998.
- [5] H. Hirabayashi, H. Hirosawa, H. Kobayashi, Y. Murata, P. G. Edwards, E. B. Fomalont, K. Fujisawa, T. Ichikawa, T. Kii, J. E. J. Lovell, G. A. Moellenbrock, R. Okayasu, M. Inoue, N. Kawaguchi, S. Kameno, K. M. Shibata, Y. Asaki, T. Bushimata, S. Enome, S. Horiuchi, T. Miyaji, T. Umemoto, V. Migenes, K. Wajima, J. Nakajima, M. Morimoto, J. Ellis, D. L. Meier, D. W. Murphy, R. A. Preston, J. G. Smith, S. J. Tingay, D. L. Traub, R. D. Wietfeldt, J. M. Benson, M. J. Claussen, C. Flatters, J. D. Romney, J. S. Ulvestad, L. R. D' Addario, G. I. Langston, A. H. Minter, B. R. Carlson, P. E. Dewdney, D. L. Jauncey, J. E. Reynolds, A. R. Taylor, P. M. McCulloch, W. H. Cannon, L. I. Gurvits, A. J. Mioduszewski, R. T. Schilizzi and R. S. Booth: "Overview and Initial Results of the Very Long

- Baseline Interferometry Space Observatory Programme," *Science*, Vol. 281, pp. 1825-1829, 18 September 1998.
- [6] H. Hirabayashi, R. A. Preston and L. I. Gurzits, ed.: *VSOP Results and the Future of Space VLBI*, Advances in Space Research, Vol. 26, No. 4, 2000.
- [7] H. Hirabayashi, P. G. Edwards and D. W. Murphy, ed.: *Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI*, Proc. of the VSOP Symposium, ISAS, Jan. 2000.
- [8] 廣澤春任, 川口則幸, 山本善一, 佐川一美, 増田裕一, 小林秀行, 村田泰宏, 平林 久, 宮地竹史, 加藤隆二, 市川 勉, 山田三男, 藤沢健太, 井上浩三郎, 市川 満, 大橋清一, 中溝幸伸, 松本操一, 佐藤 巧: 「科学衛星『はるか』の位相基準信号伝送システム - 臼田地上局システムを中心にして -」, 宇宙科学研究所報告, 第114号, 31p., 2001年3月.
- [9] 衛星搭載を想定したCostas Loop 復調器を試作し, PNコードにより変調したアップリンク信号を受信, 搬送波再生を行ったときの位相安定度を調べた. 標準的な設計の復調器では, 位相安定度を確保する上で必要なC/Noを回線的に実現できないことが明らかとなった. 一方, 低いC/N時に検波器のDCドリフトの補正を行う回路を付加すると, リンクマージンをぎりぎり確保できることが判明したが, 衛星搭載としての信頼性を考慮すると, その採用にはリスクがあり, 見送りとした.
- [10] H. Hirose: "VSOP (VLBI Space Observatory Programme) Mission and its Telecommunications," *The 10th Space Frequency Coordination Group (SFCG) Meeting*, Input Document SF10-4, Gaithersburg, MD, USA, Oct. 1-5, 1990.
- [11] N. Kawaguchi: "Phase Transfer with an Unmodulated Carrier for Space VLBI Mission," *The 10th Space Frequency Coordination Group (SFCG) Meeting*, Input Document SF10-5, Gaithersburg, MD, USA, Oct. 1-5, 1990.
- [12] *Minutes of the 10th Annual Meeting of Space Frequency Coordination Group (SFCG)*, pp.12-13, Gaithersburg, MD, USA, Oct. 1-5, 1990.
- [13] 「はるか」の衛星計画の一環としてVLBIのための相関器が開発された. VSOP相関器と名付けられている. 国立天文台三鷹に設置され, 運用されている.
- [14] ダウンリンク信号のスペクトラムの裾が搭載受信機の受信バンド内に混入し, 受信機のキャリア追尾ループのS/Nを低下させるのを避ける.
- [15] 「はるか」の観測データはわが国のVSOP相関器 [13] と共に, アメリカ国立電波天文台 (NRAO) のVLBA相関器 (ニューメキシコ州ソコロにある) およびカナダのドミニオン天文台の相関器 (ペンテイクトンにある) によって相関処理されている.
- [16] 川口則幸の提案で, 閉ループ (closed loop) 制御と名付けている.
- [17] ステップリカバリーダイオードの立ち上がり時間は数100ピコ秒のオーダーである. C-MOSの論理回路の場合, 立ち上がり時間は10ナノ秒の程度, ECLを用いてもナノ秒のオーダーで, これらに比べて格段に速い.
- [18] 信号切り替え回路のアイソレーションは約90dBであり, 例えば, 漏洩した50MHzの信号が観測周波数22GHzまで通倍されると, 不要波のレベルは約53dB増大し, 約-37dBとなる.
- [19] アンテナ駆動モータを動かした時にフレキシブルケーブルで起こる位相変動が調べられた. ケーブルの可動部分の長さを1.5mとし, 終端を短絡して, 反射波の位相を測定している. 駆動モータを一軸毎に動かし, AZ軸に関しては-200度~+200度の範囲, EL軸に関しては-75度~+5度の範囲を往復させた. 測定周波数は15.3GHzであった. 真空中で動作させ, ケーブルの温度を-60℃と-20℃にした.



付図3 アンテナを駆動した時のフレキシブルケーブルに起因する位相変動。図左はEL軸駆動時で、 $+5^\circ$ と -75° の間を往復、図右はAZ軸駆動時で、 -200° と $+200^\circ$ の間を往復。

二つの温度で位相変動に顕著な差はなく、どちらもAZ軸駆動時に約2.5度、EL軸駆動時に約1度のふれ幅であった。付図3に -60°C の場合のデータを示す。「はるか」の軌道周期は6時間20分で、1パスの可視時間は約1時間から5時間である。1パスの間にアンテナはAZ軸で120度程度、EL軸で40度程度動く。従ってここ見られた程度の位相変動は実際上問題にならない。フレキシブルケーブルの位相変動の測定は栗原和宏（NEC）氏によって行われた。

- [20] Kuバンドアンテナの第1サイドローブレベルは -22dB 以下であり、大型アンテナの鏡面の裏側での反射減衰を $10\sim 20\text{dB}$ と仮定すると、 $-32\sim -42\text{dB}$ のレベルの干渉波が加わることとなる。それによって生ずる位相の誤差は $1.4\sim 0.4\text{deg}$ である。
- [21] ループ帯域幅 $2B_L$ の二次系のPLLの固有角周波数 ω_n は、ダンピング係数が $0.7\sim 1.0$ のとき、 $B_L/\omega_n \approx 0.6$ を満たすことが知られている（F. M. Gardner, *Phaselock Techniques*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1979）。 $2B_L = 1\text{kHz}$ のとき、 $\omega_n \approx 830\text{ rad/s}$ となる。PLLの位相応答に関して、位相誤差が $12\sim 13$ 度程度以下（同相成分と直交成分のパワーの比が10以上）であることを位相が応答していることの判定基準とすると、そのような条件を満たす角周波数は、サーボ系のシステム応答理論から、 $0.1\omega_n$ 付近以下であることが言える。これから、ループ帯域幅 1kHz のPLLの位相応答角周波数はおよそ 83 rad/s 、すなわち、位相応答周波数は約 13Hz である。
- [22] 局発信号発生器では 50MHz の基準信号を 14.2GHz に通倍するためにPLOを用いている。このPLOに関して、[21]と同様に位相応答周波数を調べることができる。PLOの等価雑音帯域幅は少なく見積もっても 50kHz 程度と考えられ、位相応答周波数は 1.3kHz と推定される。これから、ダウンリンクに関して測定された位相雑音特性（図14（a））の 1.3kHz 以下の範囲には、Kuバンド受信機の 50MHz 基準信号の位相雑音特性そのもの（PLLを構成する 50MHz のVCXO自身の自走状態の位相雑音の高域成分がその主なもの）が現れることが推測されるが、実際には、そのレベルの推定値は測定値に比べて極めて小さく、本文に述べたように、 14.2GHz 発生用PLOのサンプリングダイオードの立ち上がり時間のゆらぎが位相雑音の主要因である。サンプリングダイオードの立ち上がり時間のゆらぎはショット雑音で、周波数には依存しない。なお、PLO中のアクティブループフィルタの演算増幅器も雑音発生源となりうるが、その雑音はフリッカー性で、 $1/f$ 、ないし $1/f^2$ の周波数依存性をもつ。測定された位相雑音は、 10Hz から 1kHz において、ほぼ平坦であることから、演算増幅器の寄与は少ないと考えた。
- [23] [22]に述べたように、局発信号発生器の 14.2GHz 発生用PLOは周波数およそ 1kHz 以上の位相雑音には応答しない。つまり、およそ 1kHz 以上では、出力側には、 14.2GHz 発生用PLOのVCOの自走状態の位

相雑音の高域成分が現れる。

[24] 測定系の各機器の出力信号の位相雑音を

5MHzの水晶発振器の出力： $\Delta\phi_R$

MOD出力 140MHz： $(140/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_M$

LOGEN出力 1.86GHz： $(1860/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_{1.86}$

13.3GHz： $(13300/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_{13.3}$

760MHz： $(760/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_{0.76}$

とすると、15.3GHzのアップリンク信号の位相雑音 $\Delta\phi_{UP}$ は

$$\Delta\phi_{UP} = (13300/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_{13.3} \\ + (1860/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_{1.86} + (140/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_M$$

である。衛星搭載系で付加される位相雑音を $\Delta\phi_{SC}$ とし、ダウンリンクの14.2GHzの信号の位相雑音を $\Delta\phi_{DOWN}$ とすると

$$\Delta\phi_{DOWN} = (14.2/15.3) \Delta\phi_{UP} + \Delta\phi_{SC}$$

となる。4.1節の場合と同様に、 $14.2/15.3 \approx 1$ と見なして

$$\Delta\phi_{DOWN} \approx \Delta\phi_{UP} + \Delta\phi_{SC}$$

とする。周波数14.2GHzの信号はダウンコンバートされ、周波数140MHzの信号となるが、その位相雑音を $\Delta\phi_{RX-IF}$ とすると、

$$\Delta\phi_{RX-IF} = \Delta\phi_{DOWN} \\ - [(13300/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_{13.3} + (760/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_{0.76}]$$

である。ここで、最も高い通倍次数で作られる13.3GHzの局発信号の位相雑音は相殺され、

$$\Delta\phi_{RX-IF} = \Delta\phi_{SC} + \Delta\phi_{1.86} - \Delta\phi_{0.76} + (1100/5) \Delta\phi_R + (140/5) \Delta\phi_R + \Delta\phi_M$$

となる。右辺の項の中では、 $\Delta\phi_{SC}$ が最も大きく、かつ

$$|\Delta\phi_{SC}| \gg |\Delta\phi_{1.86}| > |\Delta\phi_{0.76}| > |\text{残りの各項}|$$

と考えてよく、

$$\Delta\phi_{RX-IF} \approx \Delta\phi_{SC}$$

と言える。

[25] QPSK復調器では、搬送波再生においてループ帯域幅30kHz (45dBHz) 以上のPLLが用いられており、入力信号に熱雑音が加算されない本測定系の場合、搬送波の位相雑音は-40dBc以下と見積もることができる。このとき、再生搬送波の位相雑音の電力密度はたかだか $-40\text{dBc}/45\text{dBHz} = -85\text{dBc/Hz}$ と推定される。図14 (a) と比較すると明らかなように、このレベルはダウンリンク信号の位相雑音に比べて十分に低く、QPSK復調器で付加される位相雑音は、測定に影響を与えないと考えられる。

[26] H. Kobayashi, K. Wajima, H. Hirabayashi, Y. Murata, N. Kawaguchi, S. Kamenno, K. Shibata, K. Fujisawa, M. Inoue and H. Hirose: "HALCA's Onboard VLBI Observing System," Publ. Astron. Soc. Japan, Vol. 52, No. 6, pp. 967-973, 2000.

[27] H. Kobayashi, T. Shimoikura, T. Omodaka and P. J. Diamond: "Monitoring of the Orion-KL Water Maser Outburst," *Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI* (Proc. of the VSOP Symposium), H. Hirabayashi, P. G. Edwards, and D. W. Murphy, ed., pp. 109-112, ISAS, Jan. 2000.

[28] 補償用周波数予報値を1秒単位で作成し、1秒の間を、更新時間間隔10 μ 秒、周波数インクリメント単位10 μ Hzとして、周波数を、位相の連続性を保持しながら、階段状に細密に変化させている [8].

既 刊 行 物

- 第 96 号 (1997年 8 月) 自由ピストン2段膜衝撃波管の試作
第 97 号 (1997年 9 月) Space Flyer Unit (SFU) で計測されたガス環境
第 98 号 (1997年 11 月) 惑星間空間衝撃波による電子フェルミ加速
第 99 号 (1998年 2 月) レールガン・二次アークの挙動
第 100 号 (1998年 3 月) 弾性振動に起因するViperロケットの軌道分散
第 101 号 (1998年 6 月) 科学衛星「はるか」のアンテナ展開実験
第 102 号 (1999年 2 月) 天文観測用科学衛星の姿勢決定系におけるカルマンフィルタ
第 103 号 (1999年 3 月) カプセル型物体の動的不安定性についての実験的研究
第 104 号 (1999年 3 月) ロケット搭載用テレビジョンシステム
第 105 号 (1999年 10 月) S-310-27号機による中層大気水上気密度の測定
第 106 号 (1999年 12 月) S-310-27号機によるDCプローブ測定-ES層中の電子温度について-
第 107 号 (2000年 2 月) SEPACプロジェクトのエンジニアリングとマネジメント
第 108 号 (2000年 2 月) 飛行時間法を用いた中性ガス質量分析器の開発
第 109 号 (2000年 3 月) 金星ホルの生成機構に関する一考察
第 110 号 (2000年 8 月) 臼田宇宙空間観測所水素メーザ標準周波数時刻システム
第 111 号 (2000年 10 月) 臼田宇宙空間観測所用Xバンド冷却低雑音増幅器
第 112 号 (2000年 10 月) 探査機異常監視・診断システム (ISACS-DOC)
第 113 号 (2000年 12 月) 宇宙用熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性と全半球放射率の温度依存性に関する測定データ
第 114 号 (2001年 3 月) 科学衛星「はるか」の位相基準信号伝送システム-臼田地上局システムを中心にして-
第 115 号 (2001年 3 月) 成層圏大気中の多種の微量成分観測を目的とした気球搭載用大気採取装置の研究

宇 宙 科 学 研 究 所 報 告

第 116 号

2001年 9 月

発行者 宇 宙 科 学 研 究 所
〒229-8510 神奈川県相模原市山野台 3-1-1
電話 (042)759-8009
印刷者 タイヨー印刷株式会社
〒229-1123 神奈川県相模原市上溝 4-9-10
電話 (042)762-2157

