

宇宙科学研究所報告

第114号

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—

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

2001年3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」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 —

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[†]

(2001年1月26日受理)

The Phase Transfer System for the Scientific Satellite HALCA at the Usuda Ground Station

By

Haruto HIROSAWA*, Noriyuki KAWAGUCHI**, Zen-ichi YAMAMOTO*, Kazumi SAGAWA***,
Yu-ichi MASUDA***, Hideyuki KOBAYASHI**, Yasuhiro MURATA*, Hisashi HIRABAYASHI*,
Takeshi MIYAJI**, Takaji KATO*, Tsutomu ICHIKAWA*, Mitsuo YAMADA*,
Kenta FUJISAWA**, Kouzaburo INOUE*, Mitsuru ICHIKAWA*, Seiichi OHASHI***,
Yukinobu NAKAMIZO***, Souichi MATSUMOTO[†] and Takumi SATOH[†]

Abstract: 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 realizing space VLBI (Very Long Baseline Interferometry). This paper presents the phase transfer system for the scientific satellite HALCA (the name before the launch was MUSES-B) which was launched in 1997 by the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) and has become the first space VLBI satellite of the world. The phase transfer for HALCA is performed by using a two-way link, composed of a 15.3GHz ground-to-satellite link and a 14.2GHz satellite-to-ground one. A ground system for the phase transfer has been developed at the Usuda Deep Space Center of ISAS with such functions as: (1) Transmitting the up-link signal which frequency is Doppler-compensated such that the frequency becomes exactly 15.3GHz at the spacecraft, (2) receiving the downlink signal which has been transmitted from the spacecraft with the frequency of 14.2GHz keeping its phase coherent to the received up-link signal, and

* 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
[†] 三菱電機株式会社 Mitsubishi Electric Corporation

(3) detecting the loop phase and the two-way Doppler frequency shift from the received down-link signal. Great cares have been paid for achieving high phase stability in the design of the total system, each equipment and the circuits, of the ground station. A loop test at the Usuda station, using a satellite simulator, has shown that the ground system well satisfies the coherency requirement. For HALCA in the orbit, the phase transfer from the Usuda station has operated satisfactory, attaining phase stability necessary for the space VLBI observations under the VLBI Space Observatory Programme (VSOP).

要 旨

科学衛星「はるか」(打ち上げ前の名称 MUSES-B) のために開発した位相基準信号伝送システムに関して、臼田局システムを中心に述べている。位相基準信号の伝送 (phase transfer) は位相安定度の高い標準周波数信号を地上局から衛星へ電波によって送るもので、スペース VLBI (超長基線干渉計) を成立させるために必要な基本技術の一つである。「はるか」では、電離層の影響を配慮して、アップリンクの周波数を 15.3GHz、ダウンリンクの周波数を 14.2GHz とし、臼田宇宙空間観測所に、次のようなシステムを形成した。(1)水素メーザ原子周波数標準器を源発信器として、地上局から、衛星における受信周波数が丁度 15.3GHz になるように、衛星の軌道運動によるドップラー周波数シフトを補正して送信し、(2)衛星上の位相同期受信機出力からコヒーレントに生成された周波数 14.2GHz のダウンリンク送出波を、地上局において受信、(3)その受信信号から、往復 (two-way) 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。システムの設計・製作に当たっては、高位相安定度達成のために、機器設計、回路構成、温度安定度などに大きな注意を払った。地上系の折り返し試験を衛星シミュレータを用いて行い、製作したシステムが目標とした位相安定度特性を満たしていることを確認した。「はるか」打ち上げ後、地上-衛星-地上のループにおいて、システムの機能と性能の確認を行った。以後、本システムは「はるか」によるスペース VLBI 観測 (VSOP 観測) において、その役割を十分に果たしてきている。

重要語 : VLBI スペース VLBI 位相基準信号伝送 フェーズトランスファ
電波天文衛星 電波天文観測

構 成

1. はじめに
2. 位相基準信号伝送システム
3. 位相安定度および周波数制御に関する要求条件
4. 臼田局システムの構成と機能
 - 4.1 Ku 帯地上系の構成
 - 4.2 位相基準信号伝送における周波数制御のフロー
 - 4.3 RF 系装置
 - 4.4 10m アンテナ
 - 4.5 ドップラー周波数の補償
 - 4.6 位相・ドップラー計測
 - 4.7 衛星との間の回線に関する条件

- 5. 地上システムの試験
- 6. 衛星打ち上げ後の動作
- 7. むすび
- 付録1 衛星搭載システムの要約
- 付録2 臼田での大気中伝搬実験
- 参考文献及び註記

1. はじめに

科学衛星「はるか」の開発は、1989年、工学実験衛星 MUSES-B (Mu Space Engineering Satellite -B) の名のもとに始まった。MUSES-Bは、VSOP (VLBI Space Observatory Programme) 計画 [1] のための衛星として立案され、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1の目的とし [2]、それらの実験の総合の上に、地上の電波望遠鏡群の参加を得てスペース VLBI による電波天文観測を行うことを目指した [3, 4]。スペース VLBI は、地球上で行われている VLBI の宇宙への拡張で、人工衛星に電波望遠鏡を乗せることによって地球の直径という制約を受けない長大な基線を形成し、それにより電波天体の超高分解能のイメージングを行おうとするものである。MUSES-B (打ち上げ後「はるか」と命名) 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、大型パラボラアンテナの展開をはじめとする諸工学実験に成功して、世界最初のスペース VLBI 衛星となった [5]。「はるか」によるスペース VLBI 観測は、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 [6, 7, 8]。

MUSES-B が取り上げた工学実験課題の中に、位相基準信号の伝送がある。スペース VLBI のため衛星は、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きわめて大掛かりな装置で、それを衛星に搭載することは技術的に困難である。そこで、それに代わる手段として、地上局に水素メーザ装置を置き、水素メーザをもとに作成した基準信号を電波により衛星に送る、という方法が考えられてきた。この方法を phase transfer (位相基準信号の伝送) と呼ぶ。アメリカ航空宇宙局 NASA は 1986-87 年に静止軌道にあるデータ中継衛星 TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) を利用してスペース VLBI の可能性を調べる実験 [9] を行ったが、そこで phase transfer の手法も有効に機能することが示された。ただし、スペース VLBI 衛星は本来長楕円の軌道を廻る周回衛星でなければならず、往復する電波には大きなドップラー周波数シフトを生ずる。MUSES-B における位相基準信号伝送の実験は、地上系、搭載系を含めた装置系において高い位相安定度を実現するとともに、それに加えて、大きなドップラー周波数シフトに対処する高精度の送信周波数制御を行うという、新たな技術要素を含む工学課題であった。

位相基準信号伝送のためのシステムは地上局装置と衛星搭載装置からなる。また、信号の伝送特性には、対流圏と電離層を通る伝搬路が、大きな影響を与える。位相基準信号自体は、衛星に到達し、衛星に搭載されている機器に必要とする信号を供給して役目を終えるが、そのままでは、位相安定度が適切に保持されているかどうかの確認ができない。そこで、衛星に到達した信号を、衛星上で、位相の連続性を保ったまま、(周波数変換を施した上で) 地上局に向けて折り返し、地上局ではそれを受信して、位相安定度を測定する、という方法を取る。すなわち、往復してきた信号の位相安定度を測定し、それにより、昇り片道の信号の位相安定度の適否を判定する。更に、測定された位相ゆらぎを、VLBI の相関処理において位相補償に使うことも可能となる。

電波天文の観測は一般に電波天文バンドと称される特有の周波数帯で行われる。MUSES-B においては、

1.6, 5, および 22GHz の三つの周波数帯が取り上げられた。この内の 22GHz の観測は大型展開アンテナに対して極めて厳しい鏡面精度を要求する難度の高いものであったが、位相基準信号伝送系においても、周波数 22GHz において必要な要件を満たすことを開発の前提とした。

1989 年の衛星開発開始に先立つ概念検討では、位相基準信号の伝送を X バンドの双方向回線（地上から衛星-7GHz 帯、衛星から地上-8GHz 帯）を用いて行い、大容量の観測データの伝送に Ku バンド（14~15GHz 帯）を用いる案を立てていた。大容量の観測データの伝送もスペース VLBI に特有のもので、MUSES-B では、ビットレート約 130Mbps を目指していた。このような広帯域のデータの伝送には、従来から科学衛星で用いてきた X バンドを使うことができず（X バンドにおいて許される宇宙研究用の占有周波数帯域幅は 10MHz）、新たに Ku バンドの使用が必須であった。

MUSES-B 衛星の開発が開始されるとともに、位相基準信号伝送のための周波数について更に検討を進め、特に電離層の擾乱による位相安定度の低下、というリスクを回避するために、X バンドに替えて、Ku バンドを採用することとした。その際、衛星から地上への伝送には、大容量テレメトリのための回線を共用することができる。また、Ku バンドを用いる双方向通信によって、より精度の高いドップラーデータも取得できることとなった。VLBI の相関処理のためには、衛星に関して高い精度の軌道決定がなされる必要があり、Ku バンドのドップラーデータはその精度向上に大きく寄与することが期待された。

Ku バンドという周波数帯を科学衛星に使用することは宇宙科学研究所として初めてのことであり、地上系、搭載系ともに、多くの新たな開発が必要となった。本論では「はるか」における位相基準信号の伝送に関して、臼田宇宙空間観測所に設置した地上システムを中心に記述することを意図するが、位相基準信号伝送システムは、Ku バンド地上局のシステム全体の構成と深く関わっているので、次に、地上局全体に関して、その建設・製作の経過を述べておくこととする。

MUSES-B 衛星と交信する地上局は、テレメトリ、コマンド、レンジング等の衛星運用のための通常の機能と、位相基準信号の伝送、大容量テレメトリデータの受信、受信したデータの高密度磁気記録など、MUSES-B に特有の機能、とを備える必要がある。前者については、通常のアナログ衛星と同様、鹿児島宇宙空間観測所（KSC）の 20m アンテナ局を用いることは自明であったが、後者については、局の設置場所と用いるアンテナが、共に検討を要する課題であった。検討中盤の 1991 年末頃には三つの案があった。KSC の 20m アンテナを改造し、Ku 帯局用の機能を付加する案、設備更新を要求中であった KSC の精測レーダ（現在、新精測レーダとして実現）に Ku 帯局用の機能を付加する案、それに、直径 10m 程度のアンテナを用意し（アンテナ本体については通信総合研究所の協力を得ることが検討されていた）、臼田宇宙空間観測所に地上局を設ける案、の三つであった。これらの案は順次整理され、1992 年半ばに、臼田に Ku 帯地上局を設置し、かつアンテナについても新たなもの（直径 10m）を作る、ことが決定された。MUSES-B で行う実験や観測では、臼田の 64m アンテナを電波望遠鏡として使用し、64m アンテナと衛星とを同時に運用するので、Ku 帯地上局を臼田に置くことは、運用上の便宜、ならびに運用体制の効率化を図る上で望ましいことであった。臼田には既に水素メーザ原子周波数標準器が備わっていたことも利点であり（KSC には備わっていない）、また、VLBI 観測において準実時間での相関検出が可能になるという期待 [10] もあった。

衛星搭載観測機器の設計、そのプロトタイプモデル（PM）の製作と平行して、地上局システムの設計と機器の製作が進められた。新設のアンテナは、観測所の敷地西端に接する位置に置くこととした。64m アンテナとの干渉もなく、視界も適切であり、また、林道を通過することにより、新たな道路の造成無しに到達できる場所であった。

臼田 Ku 帯地上局の設備製作の経過を表 1 に示す。表には地上局を構成する主要な装置を全て挙げてある。これらの内、位相基準信号の伝送に関わる装置に関して、本論文で詳しく述べることとなる。衛星製作の過

表1 臼田地上局装置の開発・建設の経過

年度	装 置	年度	装 置
1991	Ku 帯 RF インターフェース装置 Ku 帯疑似 RF 送信装置 Ku 帯 QPSK 復調装置 Ku 帯 PCM 復調装置 トーンディテクター	1993	Ku 帯送信周波数変換装置 Ku 帯受信周波数変換装置 Ku 帯校正装置 基準信号発生装置 光伝送装置 (局運用用) タイムインタバル計測装置
1992	Ku 帯送受信周波数掃引装置 ドップラー位相計測装置 記録用インターフェース (K-4 用) VLBA レコーダ K-4 ターミナル デジタルサーボシミュレータ	1994	記録用インターフェース (VLBA 用) 臼田 K-4 インターフェース 時刻系 光伝送システム・光ケーブル 科学衛星・Ku 帯データ取得設備 (10mφアンテナ) ケーブル敷設・整地土台 ドップラー補正ソフトウェア Ku 帯追跡設備データ収集ソフトウェア Ku 帯テレメトリデータ処理ソフトウェア
		1995	Ku 帯局監視システム

程では衛星搭載機器の試験のために Ku バンド関係の試験用地上装置が必要であり、そのため、一部については、まず衛星試験用装置として製作し、後にそれを地上局設備に転換する、という方法をとった。QPSK 復調装置、PCM 復調装置、RF インターフェース装置、疑似 RF 送信装置などがそれである。

製作した位相基準信号伝送系については、地上試験により、機能・性能の確認を行った。別途製作された衛星シミュレータを用い、アンテナ給電点で折り返してループ位相を測定した。位相安定度は満足なものであった。

衛星「はるか」は 1997 年 2 月 12 日に打ち上げられた。「はるか」と臼田 Ku 帯地上局との間の通信の実験は 3 月 11 日に開始され、初日の実験で双方向コヒーレントな通信回線が成立した。次いで、位相安定度の測定、Ku バンドドップラーデータの取得を行い、位相基準信号伝送系が適切に動作することを確認した。5 月 13 日には、「はるか」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 (フリッジ) が検出された。

また、国際共同プログラムである VSOP の一環として、海外に 4 つの地上局が設けられた。NASA のゴールドストーン局、キャンベラ局、マドリッド局、ならびにアメリカ国立電波天文台 (NRAO) のグリーンバンク局である。これらは、臼田局と同様、位相基準信号の伝送、大容量テレメトリデータの受信、ならびにデータ磁気記録、等の機能を持つように作られ、「はるか」打ち上げ後の機能・性能の確認を経て、「はるか」によるスペース VLBI 観測に供されてきた。

本稿は、「はるか」における基本的な工学実験の一つであった位相基準信号の伝送に関して、臼田宇宙空間観測所に設置した地上局システムを中心に述べるものである。位相基準信号伝送のためのシステムは衛星搭載部分を含めて完結するものであるが、衛星搭載システムについては、本論文と対をなすもの [11] が別途作成される予定である。

2. 位相基準信号伝送システム

位相基準信号伝送のためのシステムは、前章にも述べたように、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）の二つの無線回線を必要とする。信号は、衛星において、位相の連続性を保って折り返される。

MUSES-B用の周波数を決めるに当たっては、既に述べたように、電離層の影響による位相安定度の低下を強く配慮した。周波数をKuバンドに決めるに当たって行われた検討を要約すると次のようになる [13]。Xバンドを用い、例えばアップリンクの周波数を7.2GHz、ダウンリンクの周波数を8.45GHzとすると、かなり穏やかな電離層の状態を仮定した時でも、観測周波数22GHzのフリンジ周期（45ピコ秒）と同程度の経路変動を生ずることが推算される。一方、Kuバンドを使い、仮にアップリンクを13.9GHz、ダウンリンクを15.05GHzとすると、予測されるランダムな経路変動は10ピコ秒程度となり、影響は小さい。

Kuバンドによる地上から衛星への伝送については、衛星搭載受信機における位相安定度の確保を優先させるために、周波数拡散は行わず、無変調（CW送信）とする方針を取った。しかし、このことは、宇宙用周波数の調整のための国際機関であるSFCG（Space Frequency Coordination Group）の勧告（REC 6-6R3）に抵触することとなった。そこでSFCGにウェイバー（例外許可）を申請し [12, 13]、SFCGの会合（SFCG-10、米国メリーランド州Gaithersburgにて1990年10月に開催）において厳しい論議の上で了承を得た [14]、という経緯があった。

わが国郵政省電気通信局においても、Kuバンドの周波数の選定にはかなりの調整を要した。最終的に決定された周波数は

- 地上から衛星 15.3 GHz
- 衛星から地上 14.2 GHz

である。

MUSES-Bの位相基準信号伝送系の概略を図1に示す。地上からは、無変調の単一周波数の電波を、衛星に到達したところで丁度15.3GHzとなるように、衛星の軌道運動によるドップラー周波数シフトを補償して送信する。衛星では、受信した信号に位相同期して、ローカル周波数信号、シンセサイザの基準信号、サンプリング時間基準などが作られ、また、15.3GHzからダウンリンクの14.2GHzへのコヒーレントな折り返し

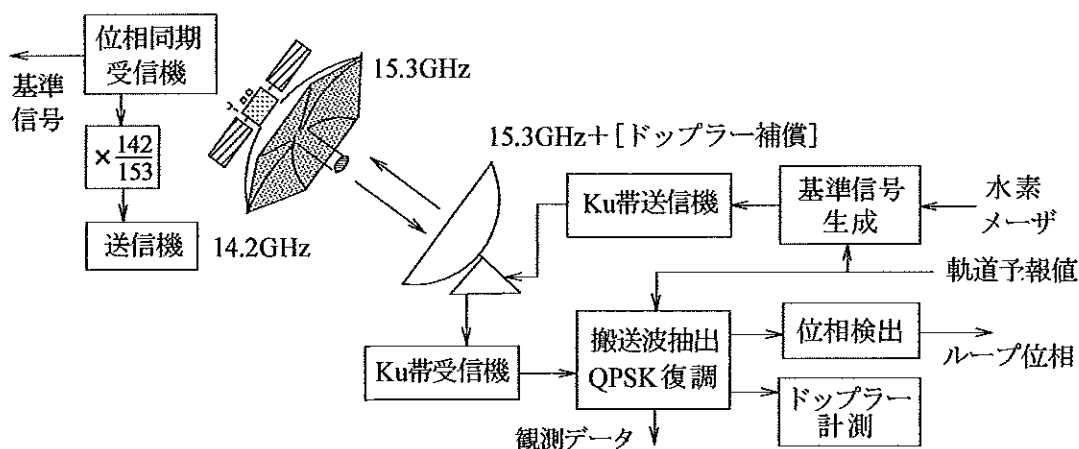


図1 MUSES-B（はるか）の位相基準信号伝送系の概略

がなされる。折り返しの際の周波数比は142/153である。観測データは、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である。地上局の受信機では、QPSKの復調を行うと共に、抽出された搬送波成分を用いて、往復(two-way)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。なお位相の計測の際、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。計測されたループ位相の変動分は、地上送信波がもつ位相雑音、周波数補償が完全でないことによる残留ドップラーシフト分、伝搬路の位相ゆらぎ、および衛星上の機器で発生する位相雑音、などが重なったものとなっている。

3. 位相安定度および周波数制御に関する要求条件

位相基準信号の伝送では、衛星上の基準周波数信号の周波数がある確度をもって一定に保たれ、かつその位相が、あるレベル以上の(高い)安定度をもつことが要請される[15]。VLBIの相関積分において、相関値が、可能な積分時間(例えば300秒)において大きな損失無しに検出できるだけの位相安定性を、衛星上の観測データは持たなければならない。つまり衛星上の基準周波数信号はそれだけの位相安定性を持たなければならない(コヒーレンス条件)。また、衛星上の観測データは、相関処理において、遅延時間と遅延時間変化率(周波数に相当)で規定される相関検出窓のなかに捕捉されなければならない(フリンジの初期捕捉)。そのため、相関処理を能率的に行うためには、衛星データの時系のオフセットと遅延時間変化率(周波数)のオフセットが、相関検出窓の大きさに比べて過大になってはならない。

周波数の制御に関しては、軌道決定に基づいてドップラーシフトの予測を行い、アップリンクの周波数を制御する、という方法を取る。他に、往復(two-way)ドップラー周波数の計測データを用いてアップリンク周波数を実時間で制御するという、実時間での相関処理を目指した着想が立てられ[16]([閉ループ制御]と呼ばれる)、その研究もなされた[17, 18]が、閉ループ制御の内容については本稿では触れない。

VSOP相関器[19]において、相関検出窓の大きさは、軌道決定の精度の予測に基づき、次のように設定された。

- ・遅延時間 1μ 秒 (軌道決定の位置予測精度 300m)
- ・遅延時間変化率 2×10^{-10} 秒/秒 (軌道決定の速度予測精度 6 cm/秒)

後者の遅延時間変化率の窓の大きさに対して、実際の観測データがもつであろう周波数オフセットは実質的には軌道決定の精度によって決まると予想され、製作する地上システムとしては、周波数確度に関しては、この窓に比べて一桁厳しい、 10^{-11} 秒/秒程度以上であれば十分と考えた[15]。

実際に、周波数制御は、位相の連続性の確保のために、周波数の変化を高い精度で追跡する必要があり、4.5節で述べるように、周波数制御を時間ステップ 10μ 秒、周波数インクリメント 10μ Hz単位の微細ステップの階段近似で行うこととした。この場合、上述の必要確度は十分に満たされ、また、後述するように、この周波数インクリメントが衛星上に起こす位相誤差は1度の程度に比べて無視できるほど小さい。

なお、衛星の時系については、本論に述べる以外の多くの要因が係わり[15]、別の技術課題に属するので、ここでは取り上げない。

位相安定度に関する要求条件はつぎのように定めた。

衛星上の機器に供給される基準周波数信号は次のようなランダムな位相変動を伴う。

- (i) 水素メーザ周波数標準器自体に起因する位相雑音 - 送信に至る過程で、周波数逓倍器など通過することによりパワーが増大する。
- (ii) 地上局設備において発生する(i)以外の位相雑音成分

(iii) 対流圏と電離層を伝搬する過程で生ずる位相シンチレーション

(iv) 衛星上の機器で発生する位相雑音

これらの内、(i), (ii), (iv)を極力小さくすることが、地上局や衛星搭載系の設計・製作において求められる。(iii)は自然現象であり、すでに述べたように、電離層については、Kuバンドを選択することにより、その影響の軽減を図ったが、対流圏の影響は残っている。

ランダムな位相変動があるとき、相関積分の出力は、位相変動が無いときに比べて低下する。その低下の度合いは、コヒーレンス関数

$$C(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \exp[j\Delta\phi(t)] dt \quad (1)$$

を用いて

$$L_C = \langle C^2(T) \rangle^{1/2} \quad (2)$$

により与えられる。ここで $\Delta\phi(t)$ は位相変動、 T は積分時間である。 $L_C \leq 1$ であり、 $L_C = 1$ は完全にコヒーレント、つまりロスが無い場合である。 $1 - L_C$ がコヒーレンスロスに当たる。基準周波数信号のランダムな位相変動は平均時間によって統計的性質が異なり、一般に、短周期(およそ1~10秒)では位相に関して白色性(ガウス性)であり、長周期(100~1000秒)では、周波数に関してフリッカー性である。

本システムでは、式(2)のコヒーレンスの低下を、two-wayのループにおいて計測される位相データを用いて計算、判定することとし(実際、片道に関しては情報を得ることができない)、

$$L_C = 0.99 \quad (3)$$

と仮定して、それを満たすのに必要な位相安定度を求めた[20]。

はじめに、位相変動を白色性として、位相角のゆらぎの程度を調べる。位相角のゆらぎの標準偏差を σ とすると、

$$L_C = \exp(-\sigma^2/2) \quad (4)$$

が成り立ち、これから、 $L_C = 0.99$ を満たす σ は

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.142 \text{ rad} \\ &= 8.1 \text{ deg} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。MUSES-Bでは、観測周波数として、1.6、5および22GHzの3つのバンドを予定しており、当然、これらの内で、22GHzにおいて、要求される位相安定度は最も厳しい。式(5)の位相変動は、22GHzにおいて、1.0 psecの遅延時間ゆらぎに相当する。

ここでは位相安定度の基準をアラン標準偏差を用いて表現することとする。白色性位相変動に関しては次式が成り立つ[21]。

$$\langle C^2(T) \rangle = \exp(-4\pi^2 f_0^2 K_2^2 / 3) \quad (6)$$

ここで、 f_0 は周波数、 K_2^2 は計測時間1秒($\tau = 1$)におけるアラン分散である。観測周波数を22GHzとし、コヒーレンスロスを1%($L_C = 0.99$)とすると、 $\tau = 1$ に対して、アラン分散の平方根であるアラン標準偏差(K_2)は、

$$K_2 = 1.8 \times 10^{-12} \quad (\tau = 1 \text{ sec}) \quad (7)$$

となる。なお、以後、アラン標準偏差を、通常の記号 σ_y を用いて表す。

白色性変動のもとでは、

$$\sigma_y(\tau) \propto 1/\tau$$

であるので、変動の統計を白色性と仮定して、 $\tau = 10$ 秒について求めると

$$\sigma_y = 1.8 \times 10^{-13} \quad (\tau = 10 \text{sec}) \quad (8)$$

となり、ここでは更に 100 秒まで外挿して、

$$\sigma_y = 1.8 \times 10^{-14} \quad (\tau = 100 \text{sec}) \quad (9)$$

とする。

100 秒よりも長い平均時間に対しては、統計をフリッカー性と仮定すると、その統計のもとではアラン標準偏差は平均時間 τ によらず一定値を取るのので、式(9)の 100 秒における値に接続して、 σ_y に 1.8×10^{-14} の一定値を与えることにする。

以上から、周波数 22GHz においてコヒーレンスロスが 1% 以下であるような位相変動のアラン標準偏差の範囲は図 2 のようにまとめられる [20]。位相基準信号伝送システムの設計に当たっては、図 2 の 22GHz に対する条件を位相安定度に関する要求の目安とした。

なお、周波数 5GHz においてコヒーレンスロスが 1% 以下である条件は、図 2 の境界線を、1 秒における 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。

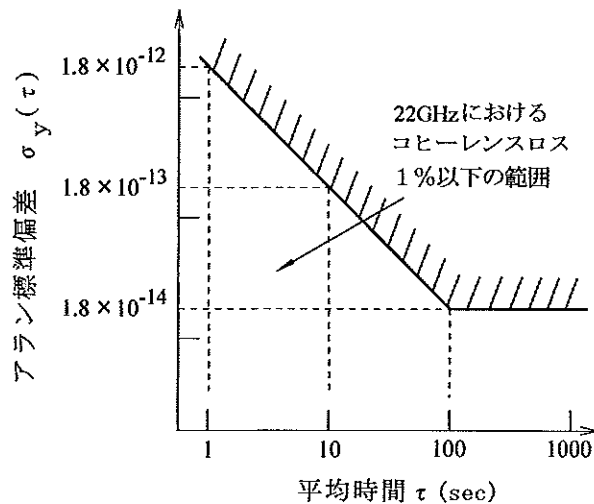


図 2 位相安定度に関する設定基準。アラン標準偏差に関する条件として表示。図中の境界線は 22GHz におけるコヒーレンスロスが 1% であるようなアラン標準偏差と平均時間の関係。

4. 臼田局システムの構成と機能

4.1 Ku 帯地上系の構成

臼田宇宙空間観測所研究棟 2 階に、MUSES-B 運用のための地上装置を設置し、直径 10m のパラボラアンテナを研究棟から直線距離 500m の山間傾斜地に設置した。研究棟の装置とアンテナの間は長さ 600 m の光ファイバーケーブルにより接続した。図 3 は位相基準信号伝送に関わる地上系システムの機器構成・系統図である。また、図 4 は研究棟に設置した装置の写真である。

前章において、ループの位相安定度に関する要求条件を述べ、ある平均時間から先はフリッカー性となる

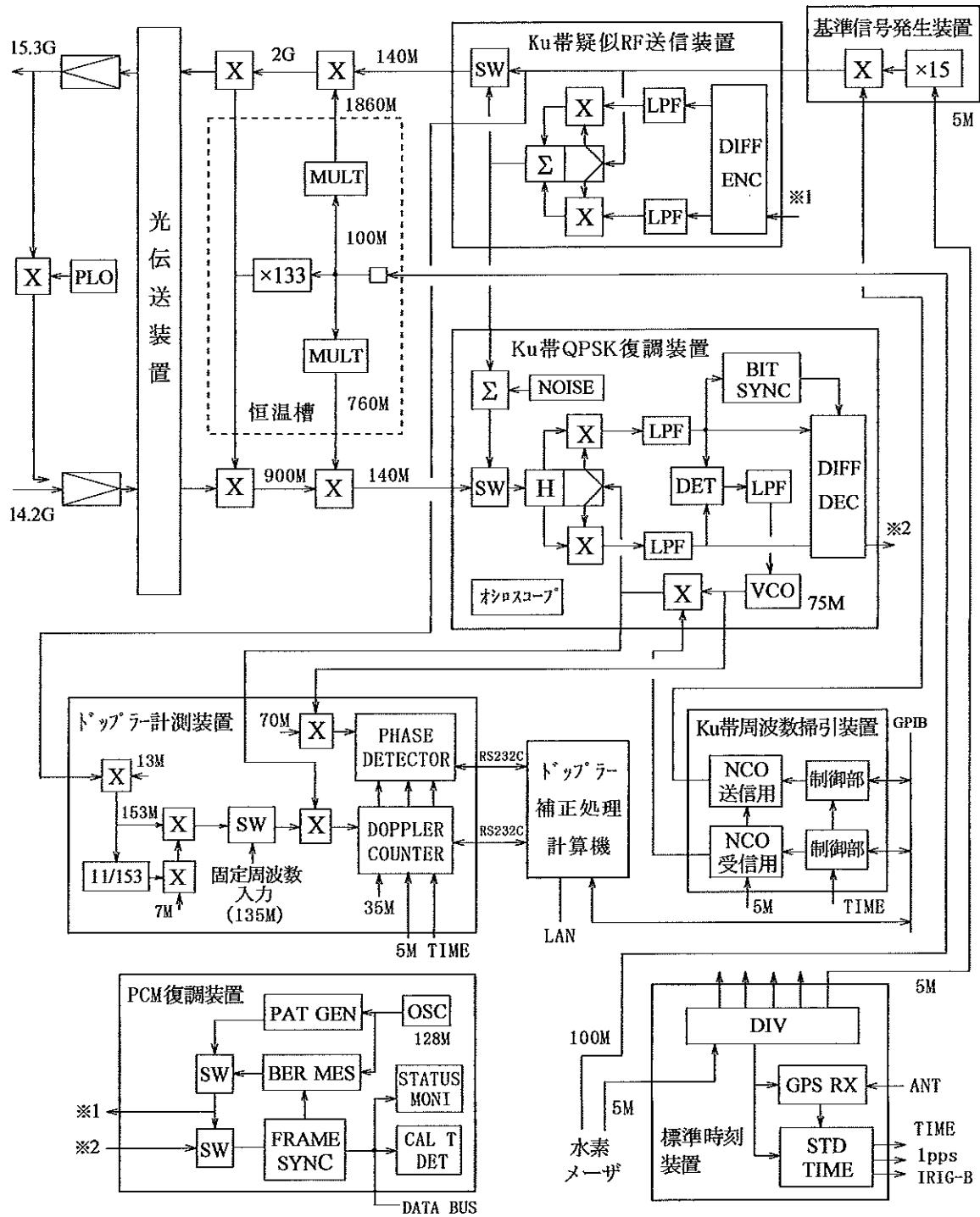


図3 位相基準信号伝送に関わる臼田局地上システムの構成

ことを仮定したが、装置系だけについて見れば、出来るだけ長い平均時間まで白色性であることが望ましい。ループの位相安定度は、短周期側は主に装置系の特性で決まり、長周期側は主に大気による位相ゆらぎによって決まる。装置系が長い平均時間まで白色性であれば、大気による長周期のゆらぎを、装置系のゆらぎから、

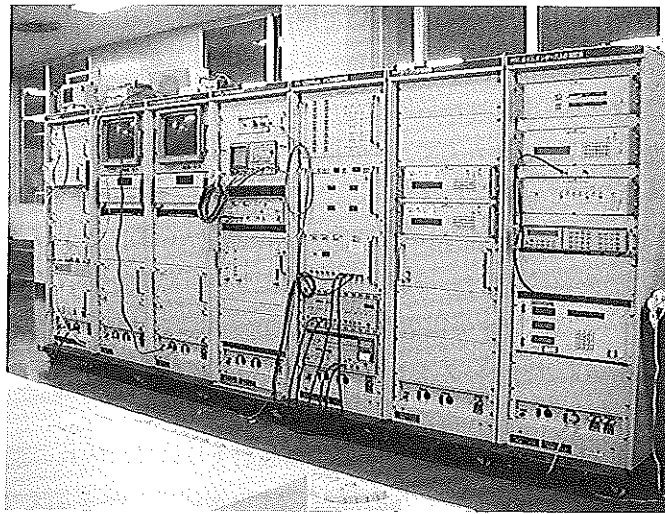


図4 研究棟に設置した臼田局 Ku 帯地上装置

より分離して抽出できるようになり、大気ゆらぎの相関処理における補正や、さらには実時間のアップリンク周波数制御（閉ループ制御）[16]をより有効に行える可能性がある。そこで、地上系の設計・製作にあたっては、長時間の位相安定度に十分な注意を払った。

図3をもとに、機器構成と、位相基準信号伝送における信号の流れを説明する。まず、基準信号発生装置において、観測所内別室にある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Ku帯周波数掃引装置において生成し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。出力をKu帯疑似RF送信装置を経て周波数変換部へ導き、2GHz、次いで15.3GHzへと上方周波数変換（アップコンバート）する。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を用いるが、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する。こうして作成された15.3GHzのアップリンク信号を光ファイバケーブルを通してアンテナ地点に導き、そこで、増幅した上で衛星に向けて送信する。

衛星からの電波は周波数14.2GHzとなりQPSK変調を施されて戻ってくるが、それをアンテナで受信し、増幅した上で、光ファイバケーブルを通して、研究棟に導く。研究棟では、まず周波数変換部において、900MHz、次いで140MHzへと、下方周波数変換（ダウンコンバート）する。ここでは、先に用いた13.3GHz、および、同じく水素メーザの100MHz信号から生成した760MHzのローカル周波数信号を用いる。周波数変換で使用する13.3GHz、760MHz、および1860MHzの3つのローカル周波数信号を生成する回路は恒温槽に収納し、温度を一定に保つことよって、位相ドリフトを抑えている。

周波数140MHzとなった受信信号を次いでKu帯QPSK復調装置に入力し、搬送波の抽出とQPSKの復調を行う。搬送波抽出のための、位相検波器、低域通過フィルター（LPF）、電圧制御発振器（VCO）からなるループにおいて、Ku帯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を混合する。搬送波抽出ループから取り出される出力信号は二つであり、一つはループ位相検出用の信号（中心周波数75MHz）、もう一つはドップラー計測用の信号（中心周波数140MHz）である。

ドップラー計測装置は参照信号切り替え回路部と位相検出器、ドップラーカウンターからなる。位相検出器には、上述の、周波数75MHzの位相検出用の信号をバイアス周波数5MHzの信号に周波数変換した上で入力する。ドップラーカウンターには、(1)同じく上述の搬送波抽出ループからの周波数140MHzのドップ

ラー計測用信号を基準周波数 135MHz (固定) を用いて周波数変換した信号 (バイアス周波数 5MHz), あるいは, (2) 同ドップラー計測用信号を, Ku 帯疑似 RF 送信装置から導いた 140MHz のアップリンク信号 (但しこの場合にはアップリンク信号を, 周波数固定とする, 4.2 および [22] 参照) を基準として周波数変換した信号 (バイアス周波数 5MHz), を入力する. 位相検出器およびドップラーカウンターの出力は, 共に, ドップラー補正処理計算機において処理される.

Ku 帯周波数掃引装置は送信用および受信用の数値制御発振器 (NCO), およびそれぞれに対する制御部からなり, 軌道情報に基づき周波数補正量は, ドップラー補正処理計算機から入力される.

その他, 標準時刻装置においては, GPS 受信機を用いて 1 pps および IRIG-B の標準時刻信号を生成し, 各機器に供給する. また, 光伝送には, シングルモードの高位相安定光ファイバーケーブルおよび広帯域用光伝送変復調器を使用している.

以上が, 位相基準信号伝送系の地上部分に関する, 機器構成および信号の流れの説明である. 図 3 には, Ku バンドに関わる地上系全体の構成を示しておくために, PCM 復調装置も書き加えてあるが, これは位相基準信号の伝送には関わらない. また, Ku 帯疑似 RF 送信装置内に見られる QPSK 変調回路, および, アンテナ地点に設けた位相同期発振器 (PLO) を含む折り返し回路は, 主にテレメトリの局内折り返し試験のためのものである.

4.2 位相基準信号伝送における周波数制御のフロー

位相基準信号伝送系は地上-衛星-地上という大きな往復経路からなる. その経路に沿って, 信号や雑音は周波数 (あるいは位相) の形で伝えられる. 図 5 は, 基準信号伝送の経路に沿っての, 周波数制御のフロー (流れ) を説明するものである.

送信側において, 軌道決定に基づいて予測した補償用ドップラー周波数予報値 $f_{ud}(t)$ を用いて, 送信周波数 $f_u + f_{ud}(t)$ を作る. ここで

$$f_u = 15.3\text{GHz}$$

である. この予報値 $f_{ud}(t)$ は, 衛星に到達したときの受信周波数が丁度 15.3GHz となるように作られる. すなわち, 伝搬時間 T_u を経て衛星で受信される周波数

$$f_s(t + T_u) = [f_u + f_{ud}(t)] \times [1 + v(t + T_u)/c], \quad (10)$$

ここで, $v(*)$: 衛星の視線方向の速度 (時間の関数, 近づくときに正),
 c : 真空中の光速,

が

$$f_s(t + T_u) = f_u = \text{一定値}$$

であるように, 地上で, 周波数 $f_u + f_{ud}(t)$ の信号を, 時刻 t において送信する. このような時刻-周波数の定め方をアップリンク送信時刻基準と呼ぶ.

地上から送信された信号には, 水素メーザ装置, RF (Radio Frequency) システムなどの地上系で発生する位相雑音に乗る. 以後, 逐次付加されていく位相ゆらぎを含めて, それらの寄与を説明的に示すために, 等価的な加算的周波数ゆらぎとして, 式に Δf_1 なる付加項を加えていく. まず地上発生分を Δf_1 とする.

さて送信された信号が伝搬時間 T_u を経て衛星に到達したときの周波数は, ゆらぎを加えて,

$$f_s(t + T_u) = [f_u + f_{ud}(t) + \Delta f_1] \times [1 + v(t + T_u)/c] + \Delta f_2 \quad (11)$$

と書ける. Δf_2 は, 伝搬路で生ずる位相ゆらぎである.

衛星上では受信した周波数を $142/153 (= r)$ 倍して, 送信信号の周波数とする. 衛星上で発生する位相雑

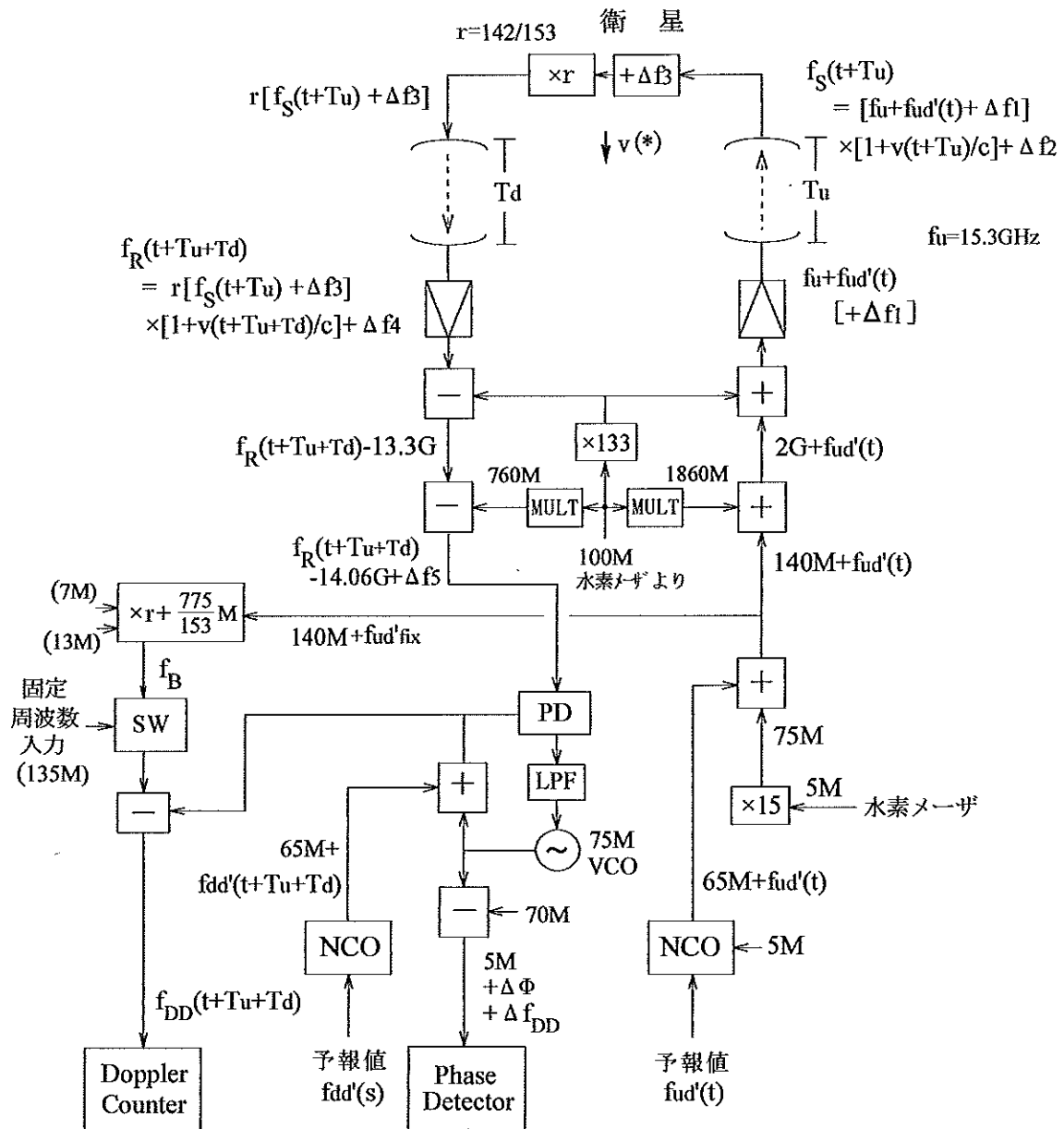


図5 位相基準信号伝送経路に沿っての周波数制御のフロー

音を等価的に Δf_3 とすると、送信周波数は $r \times [f_s(t + T_u) + \Delta f_3]$ となる。衛星から地上までの伝搬時間を T_d とし、下り伝搬路で生ずる位相ゆらぎを Δf_4 とすると、地上での受信周波数は次のように書ける。

$$f_R(t + T_u + T_d) = r \times [f_s(t + T_u) + \Delta f_3] \times [1 + v(t + T_u + T_d)/c] + \Delta f_4 \quad (12)$$

周波数補償を施したアップリンク周波数を $f_w(t)$ 、すなわち

$$f_w(t) = f_u + f_{ud}'(t) \quad (13)$$

と置き、式(1)、(13)を式(12)に代入して整理すると、

$$f_R(t+T_u+T_d) \approx r \times f_w(t) + r \times f_w(t)[v(t+T_u) + v(t+T_u+T_d)]/c + r \times (\Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3) + \Delta f_4$$

となる。ただし、 $(v/c)^2$ に比例する項と、 v/c と微小変動の積に比例する項を省いた。この信号が下方周波数変換（ダウンコンバート）され、位相検波器（PD）に導かれたところでは、周波数は次のようになる。

$$f_R(t+T_u+T_d) - 14.06\text{GHz} = 140\text{M} + r \times f_{ud'}(t) + r \times f_w(t)[v(t+T_u) + v(t+T_u+T_d)]/c + [r \times (\Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3) + \Delta f_4 + \Delta f_5] \quad (14)$$

なお、 Δf_5 はアンテナ以降の地上系で付加される位相ゆらぎを一括して、等価的な周波数ゆらぎとして表したものである。

搬送波抽出ループからは、4.1にも述べたように、二つの信号が取り出される。

まず、位相検出器の入力となる信号についてみると、それにはダウンリンクのドップラー周波数予報値の補償が働いて、

$$\begin{aligned} & \text{位相検出器入力信号周波数 } f_{PD} \\ & = 5\text{M} + r \times f_{ud'}(t) + r \times f_w(t)[v(t+T_u) + v(t+T_u+T_d)]/c \\ & \quad + [r \times (\Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3) + \Delta f_4 + \Delta f_5] - f_{dd'}(t+T_u+T_d) \end{aligned} \quad (15)$$

である。ここで、 Δf_5 は式(14)中の Δf_5 に搬送波抽出ループの位相ジッターを加えたものである。また、 $f_{dd'}(t+T_u+T_d)$ はダウンリンクの補償用ドップラー予報値 $f_{dd'}(s)$ の時刻 $t+T_u+T_d$ における値である [23]。

式(15)中の位相ゆらぎの項をまとめて

$$\Delta \Phi = [r \times (\Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3) + \Delta f_4 + \Delta f_5]$$

と置き、また

$$\begin{aligned} \Delta f_{DD} = & [r \times f_w(t) v(t+T_u)/c + r \times f_{ud'}(t)] \\ & + [r \times f_w(t) v(t+T_u+T_d)/c - f_{dd'}(t+T_u+T_d)] \end{aligned} \quad (16)$$

と置くと、式(15)は

$$f_{PD} = 5\text{M} + \Delta \Phi + \Delta f_{DD} \quad (17)$$

となる。式(16)の Δf_{DD} は、アップリンクおよびダウンリンクそれぞれのドップラー補償の残差の和に相当している。（注：式(11)において $f_s(t+T_u)$ は 15.3GHz に近い周波数であるべきであるから、 $f_{ud'}(t)$ と $v(t+T_u)$ とは互いに逆符号の値をとる。）式(17)は、位相検出器の入力信号が、5MHz のバイアスに、two-way のループ全体において発生した位相ゆらぎと、ドップラー補償の残差、が加わったものとなっていることを示している。

一方、もう一つの信号はドップラー計測のためのものである。「はるか」における標準的なドップラー計測は、この信号から固定周波数 135MHz を差し引いてドップラーカウンターに入力するもので [22]、この場合、ドップラーカウンター入力信号の周波数は

$$f_{DD}(t+T_u+T_d) = 5\text{M} + r \times f_w(t)[v(t+T_u) + v(t+T_u+T_d)]/c + r \times f_{ud'}(t) + \Delta \Phi \quad (18)$$

である。この式の第2項は、ドップラー補償を施したアップリンク周波数の r 倍の周波数

$$r \times f_w(t) = r \times [f_u + f_{ud'}(t)]$$

に対する two-way のドップラー周波数シフトとなっている。第3項 $r \times f_{ud'}(t)$ は補償用アップリンク周波

数値報値の r 倍であり、既知である。すなわち、 f_{DD} は two-way のドップラー周波数シフトを測れる量となっており、 f_{DD} の計測から視線速度 v を算出できる。なお、ドップラー計測においては、 $\Delta\Phi$ は雑音となる。

この他、ドップラー計測系は、アップリンクのドップラー補償値を適当な代表値 $f_{ud'fix}$ に固定して、従来の S バンドドップラー計測装置の方式と同等のロジックで two-way のドップラー周波数シフトを計測するモードも備えている [22]。その場合には、図中のスイッチ SW を切り替え、信号周波数から周波数 f_B (図参照、送信の経路から導かれた 140MHz 帯の信号から抽出) を差し引く。このときのドップラーカウンター入力周波数は

$$f_{DD}(t + T_u + T_d) = 5M + r \times [f_u + f_{ud'fix}] [v(t + T_u) + v(t + T_u + T_d)] / c + \Delta\Phi \quad (19)$$

である。

4.3 RF 系装置

RF (Radio Frequency) 系の基準信号発生装置および送信・受信の周波数変換装置は地上系として位相安定度に最も注意を払ったところである。図 6 はそれらの部分の構成系統図である。送信基準信号のもとには水素メーザ装置の 5MHz 信号を逡倍することにより生成しているが、送信周波数変換および受信周波数変換のためのローカル周波数信号は水素メーザの 100MHz 出力を基準周波数として、できるだけ少ない逡倍・混合操作のもとに生成している。すなわち、ステップリカバリダイオード (Step Recovery Diode, SRD) を採用し、1.9GHz、1.8GHz、および 700MHz の信号を高調波発生により生成、それらを用い、最小限の逡倍および混合回路の組み合わせにより、1860MHz、760MHz、および 13.3GHz のローカル周波数信号を生成している。これらのローカル周波数信号を生成する部分は温度の影響を最も大きく受けるので、それらを恒温槽 (+45 度一定) に入れ、長期位相安定度低下の要因とならないようにしている。またバンドパスフィルター、アイソレータなどの RF 系回路の要素部品は出来るだけ広帯域とし、かつ温度による位相変動の小さなもの

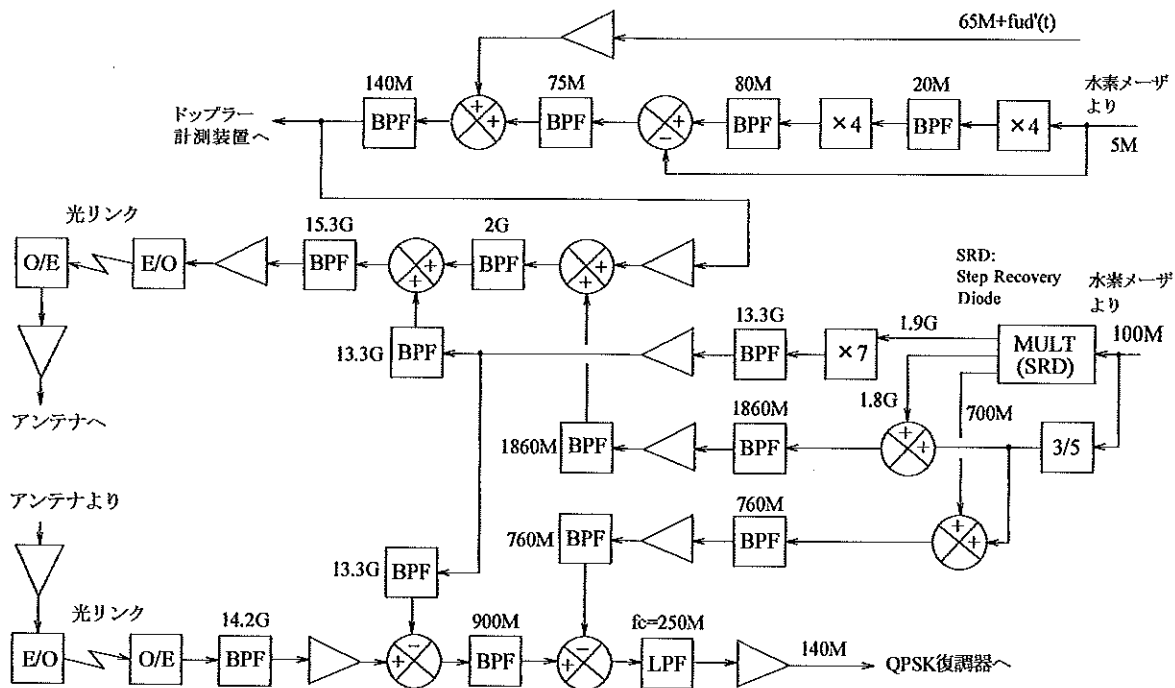


図 6 RF 系装置の構成

を使用している。13.3GHzの信号は、送信、受信の周波数変換部に対して共通のローカル周波数信号となっており、往復路で共通に起こる位相変動は、往復のループにおいて相殺されるようになっている（衛星に到達する片道の信号については効かない）。

Ku帯（14～15GHz帯）の信号を光ファイバーケーブルを用いて伝送することは、宇宙科学研究所の地上局設備においては、初めてのことであった。設計当初は周波数変換装置をアンテナ地点に置き、送信・受信の中間周波数信号とローカル周波数信号とを光伝送路を用いてアンテナ地点に送ることを検討した。しかし、周波数変換装置の温度環境をアンテナ地点において十分良好に保つことが困難であることから、研究棟に周波数変換装置を置き、Kuバンドの信号の光伝送を行うこととしたものである。光伝送装置の温度による位相変動については、事前に同一仕様品を用いて測定を行い、採用可能であることを確認した。設置した光伝送装置単独の位相変動は、使用環境において、100秒積分でアラン標準偏差 1×10^{-15} 程度（測定限界）以下であった。また、600mという伝送距離は、採用したシステムの標準使用距離（10km以上）に較べて短かったため、伝送路に光減衰器を挿入した。

4.4 10m アンテナ

MUSES-BのKuバンドの通信のために臼田宇宙空間観測所に直径10mのパラボラアンテナを設置した。アンテナは鏡面に修整を施したカセグレン型で、鏡面の直径は10m、給電にはコルゲートホーンを用いている。アンテナ利得は15.3GHz（送信周波数）において61.9dB、14.2GHz（受信周波数）において61.5dBである。追尾はプログラム方式で、指向精度は0.01度(rms)、角度の検出精度はAZ軸、EL軸とも ± 0.008 度である。鏡面精度の実測値は、主鏡0.39mm rms、副鏡0.05mm rmsであった。

アンテナの製作・建設は1994年度に行われ、その際、1992年度に製作されたデジタルサーボシミュレータが駆動制御と遠隔制御のための装置として組み込まれた。アンテナの設置位置を図7に、アンテナの全景写真[24]を図8に示す。アンテナ地点には駆動制御装置や駆動電源等を収納するシュルタを設けている。アンテナ遠隔制御装置は研究棟2階に設置しており、機器制御用の光伝送路を介して、アンテナと接続している。

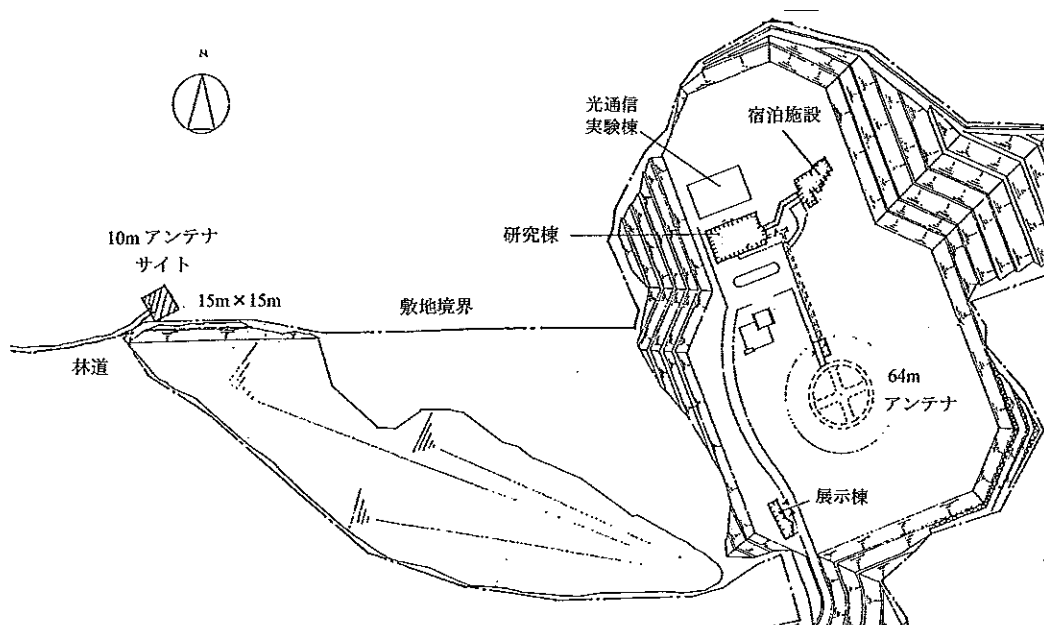


図7 臼田宇宙空間観測所における10mアンテナの設置位置

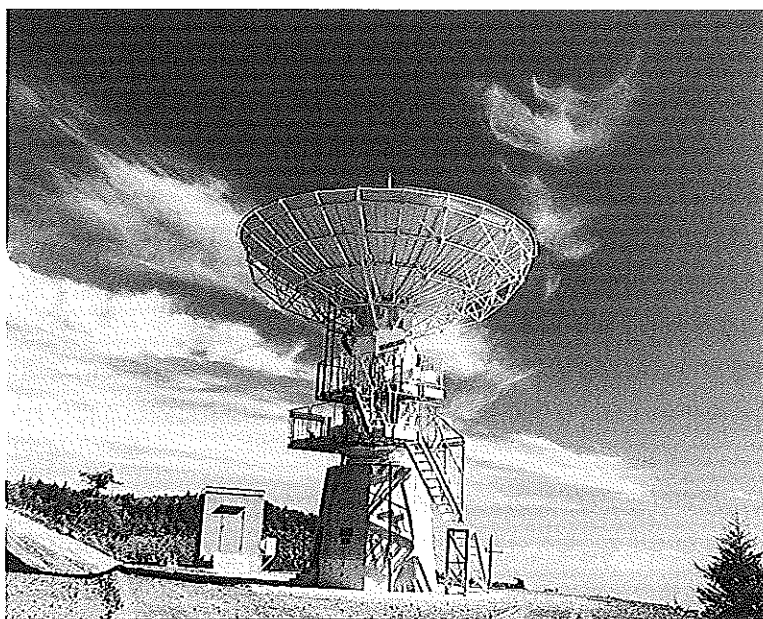


図8 10m アンテナの全景写真

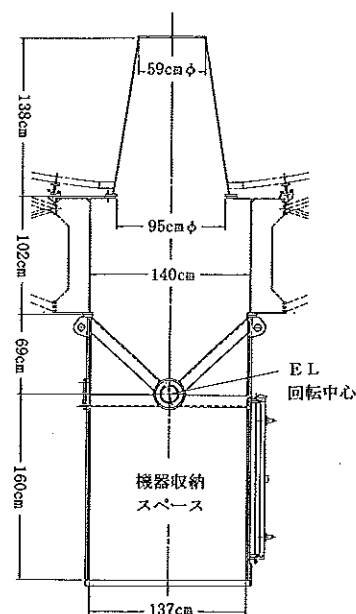


図9 アンテナに設けた背面小室

表2 風によってアンテナに生ずる位相変動の推算
周波数 15.3GHz, 平均風速 13m/s と仮定.
瞬間最大時の風速は 20m/s と仮定.

原因	位相変動	備考
風による AZ/EL 交点変動によるもの	2.0 度	変動量 0.3mm 瞬間最大時には 5.5 度
風による焦点変動および主副反射鏡の位置変動によるもの	3.3	瞬間最大時には 9.2 度
駆動時のガタによる AZ/EL 交点変動によるもの	3.7	駆動ガタ 0.2mm
合計	9.0 度	単純和

位相基準信号の伝送に関わる事柄として、鏡面に風が当たったときの送信波（および受信波）の位相変動が問題となった。検討の結果、位相変動は、風による AZ 軸 EL 軸交点の変動、風による焦点および主・副反射鏡の位置の変動、および駆動時のガタによって起こり、例えば平均風速 13m/s を仮定したときに、位相変動量は、周波数 15.3GHz において 10 度程度となることが推算された。表 2 は推算の結果の要約である（備考欄に瞬間最大風速 20m/s におけるピーク値も付記）。風による鏡面の変位の時間的な挙動は単純ではないが、ここに見る程度の大きさの位相の変動は許容できる（風速 20m/s での運用は現実的でない）ものと判定し、アンテナの設計・製作を進めた。

アンテナには、フィードホーンの下方に、アンテナとともに回転する、背面小室と呼ぶ機器収納空間を設

けている。背面小室は図9に示すような形で、底面の大きさは135cm×137cm、使用可能な高さは約225cmである。そこに、Ku帯の電力増幅器（出力最大50mW）、受信用低雑音増幅器、Ku帯トランスレータ、光伝送送受信器、電源、他の機器を2架構成で配置している。これらにおいても大きな温度の変化は位相変化に繋がるので、背面小室内を、ファンとヒーターを用いて温度制御し、温度の変化率が2.5°C/hr以下であるようにしている。なお許容できる温度の範囲は0～+40°Cと広い。

4.5 ドップラー周波数の補償

MUSES-Bは打上げ前遠地点高度約20,000km、近地点高度約1,000kmの長楕円軌道をとることを予定していた。そのさい、近地点付近で、視線速度が大きな値を取るときの代表値を±6 km/sとすると、周波数15.3GHzの電波に生ずるドップラー周波数シフトはおよそ300kHzとなる。またその状態での代表的な速度変化率は3m/s²で、これに対応する周波数変化率はおよそ150Hz/sである。衛星が遠地点に向かうにつれて、これらの値は相対的に小さくなる。

地上局位相基準信号伝送系の送受信周波数掃引装置は、このような衛星の軌道運動によって発生するドップラー周波数シフトを補償するための信号を発生する。装置は基本的に外部制御発振器であり、ここでは、出力信号の位相の連続性が強く要求された。仕様の決定に当たっては、近地点における運用まで考慮して、

- (1) ドップラーシフトの予測に基づき入力周波数情報を1秒毎とし、
- (2) それを使って、
 - ・更新時間間隔10μ秒
 - ・周波数インクリメント単位10μHz

という細密な階段状周波数制御（巨視的には周波数はランプ状に変化[25]）を行うこととした。衛星搭載の位相同期受信機のループ帯域幅は、MUSES-Bの場合、1kHzであり、この周波数インクリメントが衛星上に起こす位相誤差は1度の程度に比べて無視できるほど小さい[26]。また、機器自体が発生する位相雑音も配慮すべき特性の一つであるが、周波数掃引装置の出力は送信に到るまで通倍されないため、RF系のローカル周波数信号のような通倍される信号を生成する機器に比べると、全体の特性に対する影響は小さい。

図10にドップラー周波数補償制御部の動作の概念を示す。送信周波数用、受信周波数用とも内容は同一である。周波数掃引装置は、ファクトリコンピュータ、ドップラー制御盤、および周波数シンセサイザからなる。ファクトリコンピュータでは、外部のドップラー制御用計算機から入力されるドップラー制御データと制御開始時刻を用いて、1秒毎の周波数情報を作成し、それをドップラー制御盤に向けて出力する。ドップラー制御盤では、その情報をもとに内挿計算により10μ秒毎の周波数データを作成し、それを周波数シンセサイザに入力する。周波数シンセサイザからは65MHz+Δf(t)の信号が出力される。Δf(t)の取りうる範囲は±1MHzとしてある。図にある800msec遅延タイミング信号は、ファクトリコンピュータからデータを送出するタイミングに係わるものである。

周波数シンセサイザの構成を図11に示す。100kHzの基準信号（5MHzの基準信号を50分の1に分周して作成）と、65MHz帯出力信号を1/N分周した100kHzを位相比較し、位相ずれ分をVCOにより補正することにより、位相同期ループを形成している。分周比Nを変化させることにより出力の周波数を制御できるが、可変ステップを小さくするためにはNを実効的に帯分数とする必要があり、ここではFractional-N Synthesizerと呼ぶ手法[27]を採用している。（図のパルススワローはVCO出力信号から1サイクルを除去する回路。また、BCD-PWM、D/Aの経路は位相比較器の出力位相に生ずる位相ジッターを補償するためのもの。詳しくは文献参照。）

図12は「はるか」運用中の周波数制御表示画面の一例である。画面には1秒ごとの送信用制御周波数が17秒間にわたって表示されている。

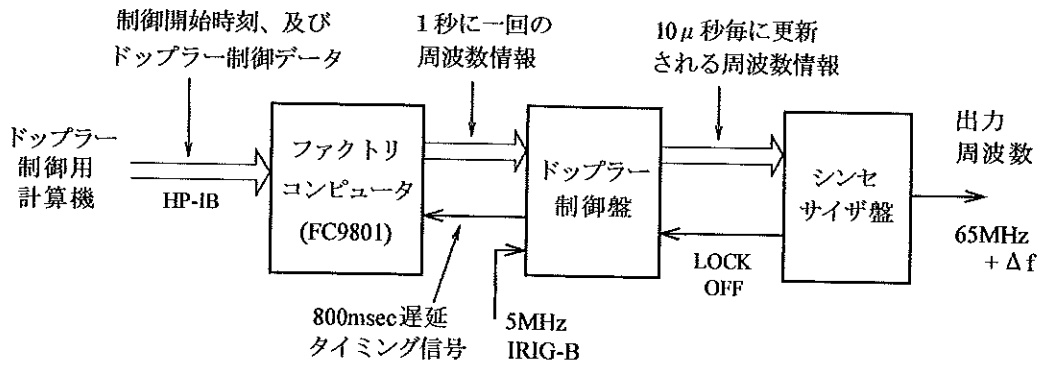


図10 ドップラー周波数補償制御部の動作の概念

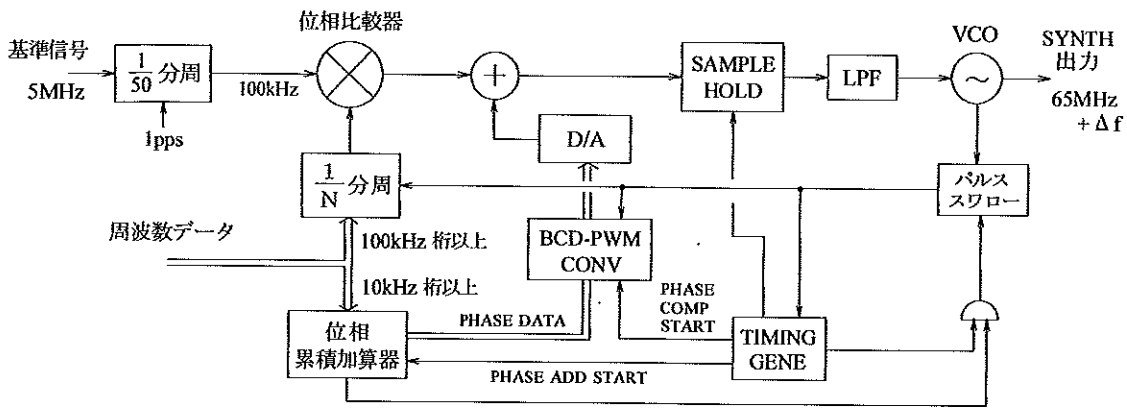


図11 周波数シンセサイザの構成

時刻	340 04:50:02 (UTC)		リンク	送信用	
制御周波数	15,300,064,445.40613 (Hz)		ロック	LOCK	
目標周波数	15,300,064,428.63703 (Hz)		スリップ	OFF	
オフセット	-16,86835 (Hz/s)				
スライスレート	+0.00000 (Hz/s)				

PRED	予報値開始時刻	予報値終了時刻	予報値数		
5511	340 03:24:24	340 07:56:49	16346		
No.	時刻	周波数 (Hz)	No.	時刻	周波数 (Hz)
[5126]	04:49:49	65,064,664.78959	[5136]	04:49:59	65,064,496.02057
[5127]	04:49:50	65,064,647.93169	[5137]	04:50:00	65,064,479.14923
[5128]	04:49:51	65,064,631.02094	[5138]	04:50:01	65,064,462.27597
[5129]	04:49:52	65,064,614.14627	[5139]	04:50:02	65,064,445.40613
[5130]	04:49:53	65,064,597.26702	[5140]	04:50:03	65,064,428.63703
[5131]	04:49:54	65,064,580.39118	[5141]	04:50:04	65,064,411.66568
[5132]	04:49:55	65,064,563.51343	[5142]	04:50:05	65,064,394.79342
[5133]	04:49:56	65,064,546.64176	[5143]	04:50:06	65,064,377.93168
[5134]	04:49:57	65,064,529.76551	[5144]	04:50:07	65,064,361.06912
[5135]	04:49:58	65,064,512.89267			

図12 周波数制御表示 CRT 画面の一例

4.6 位相・ドップラー計測

地上局と衛星の間を往復してきた信号に関して、ドップラー計測装置において、位相とドップラー周波数の計測を行う。これらの計測では、どちらも、位相計測型インテグレートドップラーカウンタを用いている。これは位相角を周波数の積分として計測するものである。

位相計測では、4.2節の式(17)にあたる周波数 f_{PD} を

$$\theta_k = 2\pi \int_0^{kT} f_{PD} dt \quad (20)$$

により積分する。k は整数、T はサンプリング周期である。 θ_k は計測開始時刻における初期位相角からの変化分となっている。なお、 f_{PD} は 5MHz のバイアス周波数を含むが、5MHz の位相の回転は固定量であり、上の積分結果から除くことができる。

ドップラー計測では、式(18)ないし(19)に相当する周波数を積分し、

$$\theta_k = 2\pi \int_0^{kT} f_{DD} dt \quad (21)$$

という計測値を得る。求めるドップラー周波数 (f_{dd} とおく) は θ_k の差分から求められるが、 f_{PD} はバイアス周波数 (f_{bias} , 現システムでは 5MHz) を含むので、

$$f_{dd} = (\theta_k - \theta_{k-1}) / (2\pi T) - f_{bias} \quad (22)$$

として f_{dd} を得る。

位相計測型インテグレートドップラーカウンタは、上の二つの計測に共通する式(20)および式(21)の形の積分を行う。カウンタの動作原理を図13に示す。入力である周波数 $5\text{MHz} + g(t)$ の信号をまずAD変換してデジタル化する。サンプリング周波数は30MHz、ビット数は8である。作られた時系列データを、一方ではMSB (Most Significant Bit) 検出器へ、他方ではシフトレジスタへと、送り出す。前者では、MSBの検出が正弦波1個の検出に当たるので、その出力を累積カウンタで数えることにより、波の数 n が分かる。つまり 2π の整数倍の位相角 $2\pi n$ が測られる。一方、後者は、 $0 \sim 2\pi$ の間の位相角を測るもので、位相角データを(最終的に)出力するサンプリングクロック t_k 毎に、時系列データをシフトレジスタに、ある時間長さ T にわたって格納する。ただしその際、時刻 t_k を中心に $\pm T/2$ のデータが格納されるように、入力を遮断する時刻を $T/2$ だけ遅らせる。 T は次に述べる信号処理における積分時間となる。次に、このデータ(波形データである)に関して、デジタルシグナルプロセッサ (DSP) を用いて、まず周波数の推定を行い、

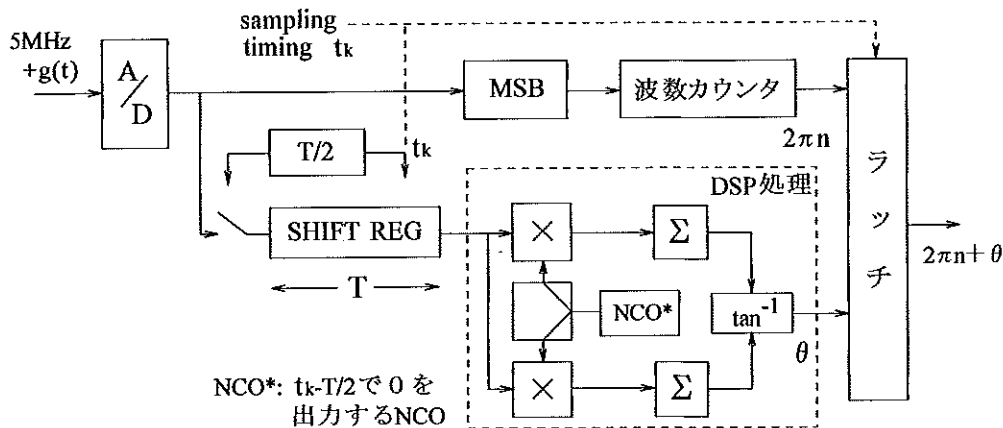


図13 位相計測型インテグレートドップラーカウンタの動作原理

$t_k = 0$ において位相角が0であるようなローカル信号を作る。次に、それを用いて原データに関してI/Q検波(積分時間Tの相関積分)を行い、得られるI相、Q相の出力の比をとって、位相角を算出する。この値に先の $2\pi n$ を加えると、時刻 t_k における位相角が得られる。データを出力するサンプリング時間は1/10秒(1秒当たり10データの出力)、および1秒(1秒当たり1データ)の切り替えとしている。

この方式の位相計測カウンタの計測誤差は、入力信号に含まれる熱雑音と、カウンタ単体をもつ内部雑音によって決まる。前者は、入力信号のSN比に依存し、QPSK復調器の搬送波追尾ループが十分高いループ内S/Nをもって動作することから、実質的に問題とならない。後者については、シフトレジスタ長が有限であることによる誤差(相関積分において高次の項の影響がでる)、ローカル周波数の推定誤差、量子化雑音などが効くが、この内第1のものが支配的である。そこで、シフトレジスタ長を、加速度という別種の誤差要因が効かない範囲で、可能な限り長くすることにより対処している。シフトレジスタ長を256(8.5)、512(17)、1024(34)、2048(68)、4096(136)の5段階の可変としたが(括弧内は対応する積分時間で、単位は μ 秒)、最大長において、内部雑音による位相角出力値の誤差は $360 \text{度} / 2^{10}$ ($=360/1024 \text{度}$)以下となっている。これに対応するドップラー周波数計測精度は、速度換算で、約0.3mm/sec rmsである。なお、位相角出力のビット数は12(出力分解能 $360/4096 \text{度}$)である。

4.7 衛星との間の回線に関する条件

位相基準信号の伝送においては、衛星搭載の位相同期受信機(PLL)の位相ジッターが許容できるレベル以下となるような電力が、衛星に、到達しなければならない。MUSES-Bでは、搭載受信機PLLの等価雑音帯域幅を1kHz(付録1参照)とし、ループ内S/Nとして30dBを確保するために、衛星上で要求される信号電力対雑音電力密度比(Pr/No)を60dBHzとした。この時、PLLループの位相ジッターは約 $\pm 1.3 \text{度}$ である。15.3GHzの無線回線を、この Pr/No の値に対して更に10~15dBのマージンをもつように設計した。地上アンテナとともに、衛星搭載アンテナも指向性であるので、地上での送信電力は極めて小さくてよく、実際、送信電力を50mW(17dBm)としている。

一方ダウンリンクにおいても、QPSK復調器の搬送波抽出ループの位相ジッター(熱雑音による)が大きいと、位相計測に誤差を生ずる。しかし、実際には、QPSKの復調に必要な Pr/No は90dBHzと大きく(さらに約9dBのマージンをもって回線は設計された)、ここに生ずる位相誤差(ループの等価雑音帯域幅は100kHz)は、先に述べたように、位相計測装置の内部雑音に比べて無視できるものである。

5. 地上システムの試験

完成した地上システムについて、衛星搭載機器のプロトタイプモデル相当品として製作された「衛星シミュレータ」を用いて、位相基準信号伝送の試験を行った。「衛星シミュレータ」はKu帯受信機(KRX)、ローカル信号発生器(LOGEN)、QPSK変調器(KMOD)、Ku帯送信機(KTX)などからなり、衛星の当該部分(付録1参照)と同一の性能を持つ。

試験では、「衛星シミュレータ」を白田局10mアンテナ地点に置き、地上局の送信端子および受信端子に、シミュレータの受信機入力および送信機出力を、それぞれ、適切なレベルのもとに、接続した。形成されたtwo-wayのループにおいて、位相の時間変動を測定した。図14はループ位相測定データの一例である。図には約2時間(7,000秒)にわたる位相変化が示されているが、大きな位相の変動は見られない。

折り返し試験において測定されたループ位相のデータから、位相安定度の指標であるアラン標準偏差を求めた結果を図15に示す。平均時間 $\tau = 100 \text{秒}$ においてアラン標準偏差はおよそ 1×10^{-14} であり、その先200秒付近まで白色性の特性が延びている。付録1付図2に示す衛星搭載系の位相安定度特性からの低下分

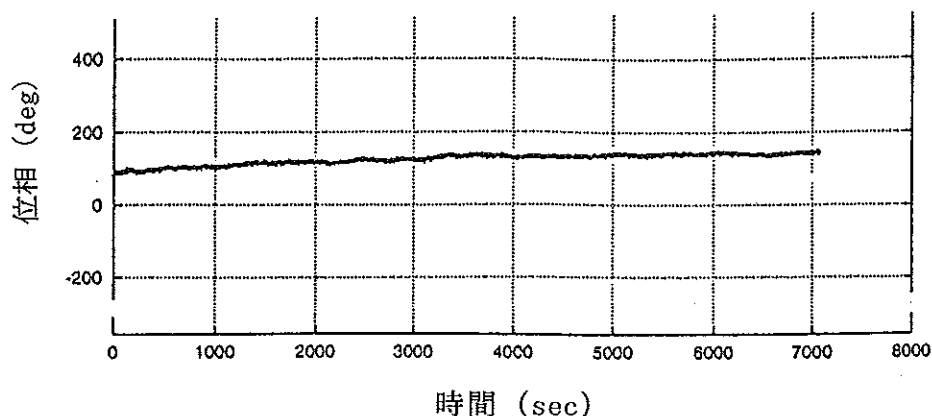


図14 「衛星シミュレータ」を用いたアンテナ折り返し試験において測定されたループ位相データの例

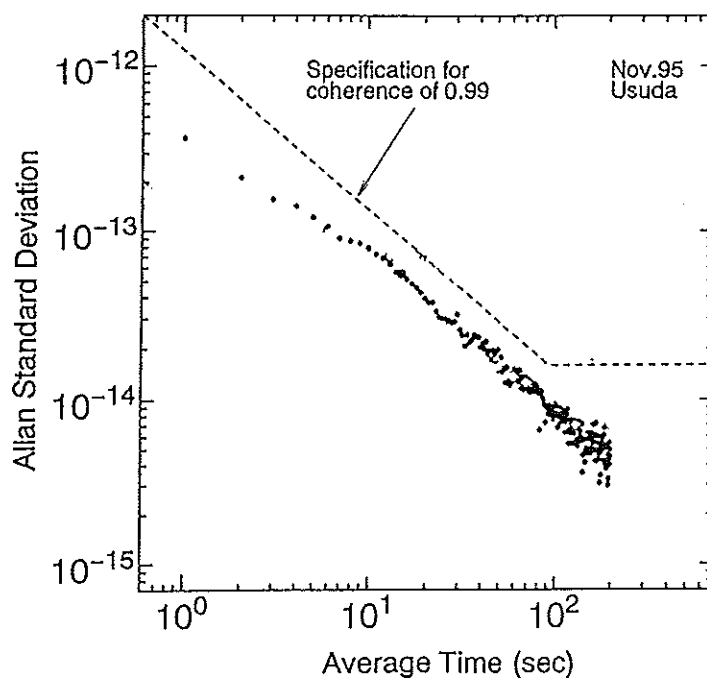


図15 「衛星シミュレータ」を用いたアンテナ折り返し試験において測定されたループ位相安定度。点線は周波数 22GHz に対するコヒーレンスロスが1%となる位相安定度 (図2参照)。

が地上局設備での位相変動の付加分である。位相安定度特性全体は 22GHz に対するコヒーレンスロス 1% の条件を十分に上回っている。特に 100 秒から先、200 秒付近まで白色性の特性が延びていることは、地上装置系に関して熱雑音以外の要因を極力少なくしたことの現れであると言える。図 15 の測定結果は、地上系・衛星搭載系を含めた全装置系が位相安定度に関して目標を十分に達成したことを示すものである。

また、参考として、上述「衛星シミュレータ」をアメリカ国立電波天文台 (NRAO) グリーンバンク局に運び、ループの位相安定度を測定した結果を、図 16 に示す。白田局と比較すると、短期安定度においてはグ

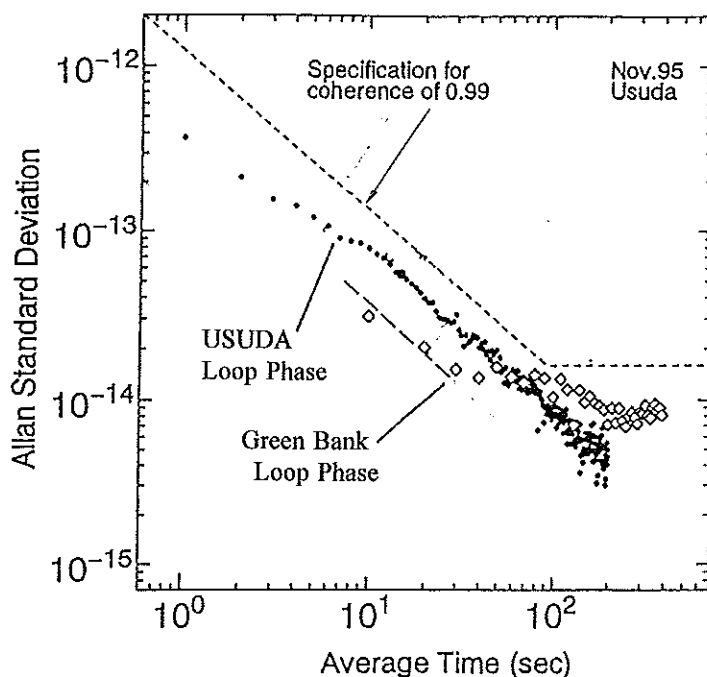


図16 「衛星シミュレータ」を用い、アメリカ国立天文台 Green Bank 局においてアンテナ折り返し試験を行って得られたループ位相安定度。図15を再掲し、その上に記入。

グリーンバンク局が勝るが、数10秒より長い平均時間の長期安定度に関して臼田局が勝っている。臼田局において長期安定度の確保に力を注いだ効果がここに現れていると言える。

6. 衛星打ち上げ後の動作

臼田局に整備した装置の一部は衛星の試験に用いる装置も兼ねていた。宇宙科学研究所相模原における MUSES-B 衛星の最終組立と総合試験、および衛星打ち上げに当たっての鹿児島宇宙空間観測所（内之浦）での衛星の最終確認試験においては、それら一部の装置を臼田局から移動して用いた。臼田局においては、衛星打ち上げ直前に装置系の再組立を行う必要があった。

また、臼田局において、前章に述べた地上系の試験の延長として、大気中伝搬を含む位相伝送実験も行った。その実験については概略を付録2に記す。

MUSES-B 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。M-V型ロケット初号機による打ち上げであった。衛星の軌道は楕円で、遠地点高度は21,400km、近地点高度は560km、軌道傾斜角は31度である。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、衛星の姿勢制御と搭載 Ku バンドアンテナの指向制御（付録1参照）が確立した。

「はるか」と臼田局との間の Ku バンドの通信の実験を3月11日に開始した。アップリンク信号の衛星上での捕捉、128Mbps のレートでのデータダウンリンクが適切に行われ、同日中にアップリンク、ダウンリンク双方向コヒーレントな通信回線が成立した。以後、「はるか」が臼田局から可視である時間帯には、このリンクが取られることとなった。「はるか」に対して位相基準信号の供給が定期的に行われるとともに、ループ位相とドップラーの計測が継続的に行われてきた。図17にループ位相データの一例を示す。

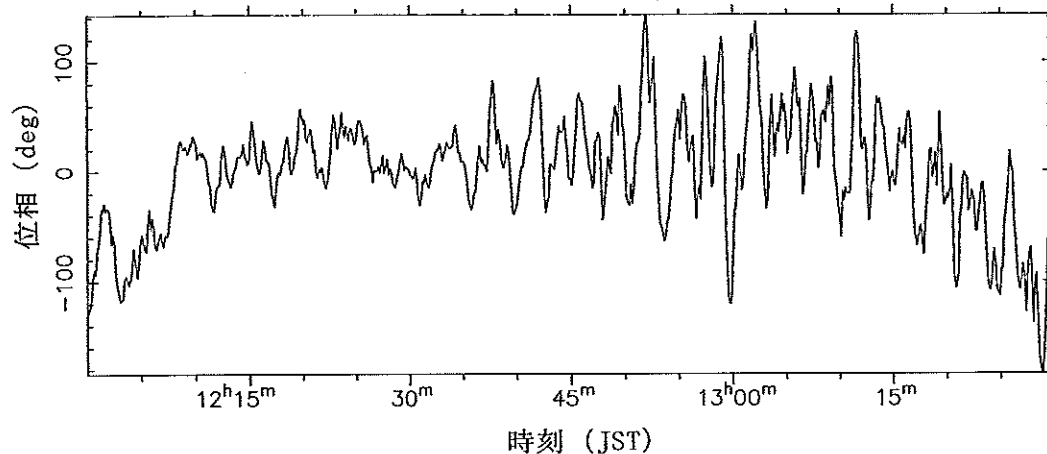


図17 軌道上の「はるか」との間のリンクにおいて取得されたループ位相データの一例。
(このデータではドップラー補償残差を十分に除ききっていない。)

ループ位相の安定度は満足の行くものであった。初期の計測で得られた位相安定度の代表例を図18(a)(b)(c)に示す。3月20日から22日の三日間のもので、図18の3例を図15のアンテナでの折り返し試験で得られた特性と比較すると、短周期では、予想通り機器に起因するゆらぎ成分のみであり、長周期には大気に起因するゆらぎ（フリッカ性の雑音）が乗っていることが分かる。「はるか」による電波天体観測は、まず周波数1.6GHzにおいて始まり、ついで5GHzへと進んだが、位相基準信号伝送におけるループ位相の安定度は、周波数1.6GHzおよび5GHzにおける必要条件を十分に満たすもので、実際に、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での観測データとの間で、次々と干渉縞の検出がなされた。以後、次に述べる周波数22GHzに関する不具合のために、観測は専ら1.6GHzおよび5GHzの2周波数帯に関して行われ、臼田の位相基準信号伝送系はそれらの観測において完全に機能を果たしてきた。

第3の観測周波数帯であった22GHzに関しては、衛星搭載大型アンテナの給電回路において、打ち上げとともに損失が著しく増大する（導波管部と推定）という不測の事態が起こった。そのため、22GHzにおいて、システム雑音温度が大きく増大し、またアンテナ利得も低く、極めて強い天体からの電波の検出はなされたものの、電波天文観測には到らなかった。位相基準信号伝送そのものについて見ると、大気に起因する長周期変動に対しては相関処理での位相補償が可能であるので、22GHzに対しても、必要とする機能ならびに特性を満たすものを実現できたと判断している。

また、Kuバンドにおける往復（two-way）のドップラーデータに関しても、同データがKSC20m局で取得されるSバンドのドップラーデータに較べてより高い観測精度を持つことが確認され[28]、相関処理用の軌道決定に活用されてきている。

図18の3つの場合についてさらに述べると、そこには、大気に起因するゆらぎが日によって異なった振舞いをするのが明瞭に示されている。図18(a)の3月20日の場合、天候は晴れで、アラン標準偏差は平均時間10数秒まで白色性である。翌3月21日には、運用開始前からかなりの降雪があり、図18(b)に見るように、降雪の影響と見られる安定度の低下が起こった。3月22日には快晴となったが、安定度は、図18(c)に見るように回復せず、降雪時に較べてむしろ低下している。3月22日の場合、快晴となったために前日に降った雪が急速に融け、水蒸気を大量に含んだ大気が激しい乱流状態にあったためと推測される[29]。

臼田局において測定されてきたループ位相や往復ドップラーのデータは、実際の周回衛星を用いて、さま

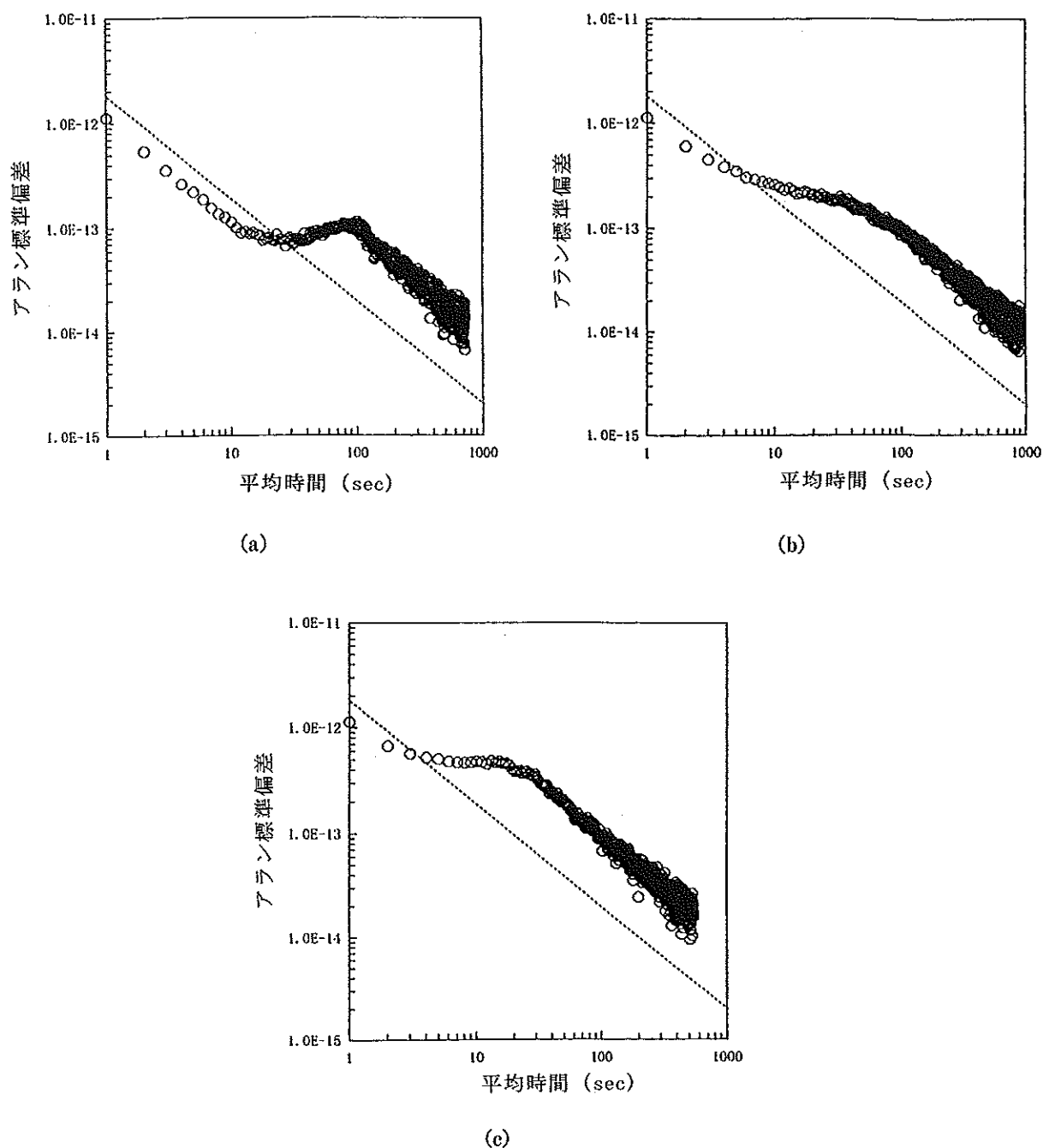


図18 軌道上の「はるか」との間のリンクにおいて取得されたループ位相安定度。
 (a)1997年3月20日, (b)1997年3月21日, (c)1997年3月22日. 図中の
 点線は周波数22GHzに対するコヒーレンスロスが1%となる位相安定度
 (ここでは平均時間100秒以上についても白色性の特性を延長).

ざまに変化する気象・天候のもとで継続的に得られていると言う点で、極めて貴重なものとなった。「はるか」と臼田局の間でなされた位相基準信号伝送のデータを活用して、次のような幾つかの研究がなされている。大気ゆらぎに関する統計的性質を詳細に追求し、それに基づいてVLBIの新しい観測手法を提案した研究[29]、スペースVLBIにおける実時間相関を日指したアップリンク周波数制御(閉ループ制御)の研究[18]、位相変動データの分析に基づく新たな大気モデルの提案[30]、などである。また、臼田局の10mアンテナ

に 22GHz 帯のラジオメータを共軸に取り付け、大気中の水蒸気からの放射と位相基準信号伝送のループ位相を同時に測定することにより、電波干渉計における大気補償の手法の向上を図る研究も開始されている [31, 32].

7. む す び

科学衛星 MUSES-B (打ち上げ後「はるか」) のプロジェクトにおいて、位相基準信号の伝送 (phase transfer) は一つの基本的な工学課題であった。位相基準信号の伝送は地上系と衛星が一体となって動作するものであり、特に地上系に関して、新たな研究と多くの開発を必要とした。これは従来の宇宙科学研究所の科学衛星では例の無かったものである。臼田宇宙空間観測所に設置した位相基準信号伝送システムは、「はるか」打ち上げ後の実験においてその性能が確認され、以後、「はるか」によるスペース VLBI 観測 (VSOP 観測) において、十分にその役割を果たしてきた。位相基準信号伝送系の確立は、「はるか」における工学研究の大きな成果の一つである。

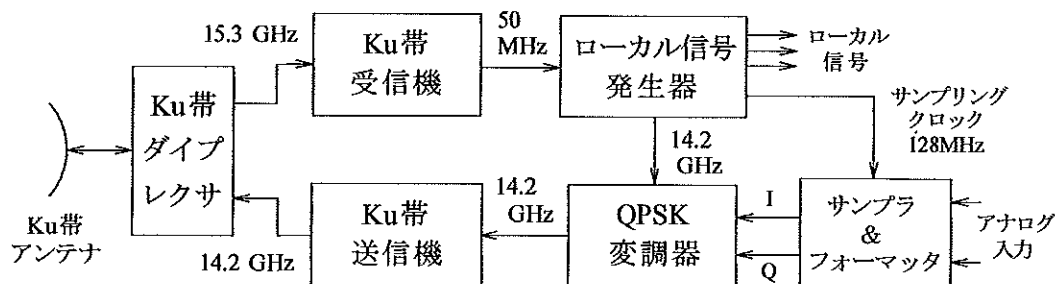
本研究所においてはスペース VLBI 衛星 2 号機へ向けての検討がすでに開始されている [8]。2 号機では、22GHz 帯とともに、より高い周波数である 43GHz 帯での観測が目指されており、位相基準信号の伝送は引き続き重要な研究課題となる。「はるか」における成果は次へ向けての研究の土台をなすものである。

臼田局の位相基準信号伝送システムの開発およびその実験の成功は、そこに参加された宇宙科学研究所、国立天文台、担当頂いたメーカ各社、他の多くの方々の共同の成果である。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。

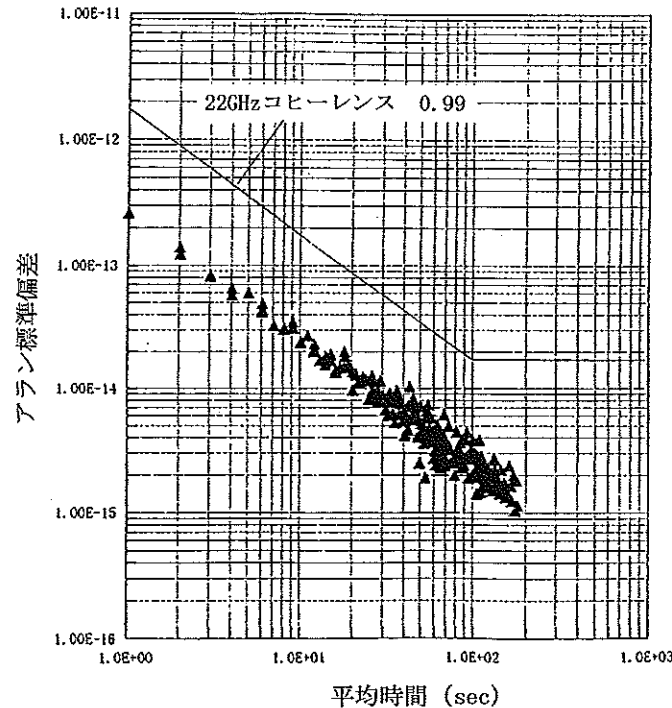
付録 1 衛星搭載システムの要約

ここに衛星搭載システムの要約を行う。位相基準信号伝送に関わる衛星搭載機器は Ku 帯アンテナ、ダイプレクサ (KDIP)、Ku 帯受信機 (KRX)、ローカル信号発生器 (LOGEN)、QPSK 変調器 (KMOD)、Ku 帯送信機 (KTX) などからなる [11]。付図 1 はそれらが構成するシステムの系統図である。

Ku 帯受信機は等価雑音帯域幅 1kHz の位相同期受信機で、受信捕捉可能周波数範囲は $15.3\text{GHz} \pm 460\text{kHz}$ である。受信機は 50MHz の基準信号を生成し、信号分配器 (付図 1 では省略) を経て、ローカル信号発生器にそれを供給する。ダウンリンク用の搬送波周波数 14.2GHz は、ローカル信号発生器において生成され、



付図 1 衛星搭載機器の位相基準信号伝送に関わる部分の構成



付図2 衛星搭載系の位相安定度

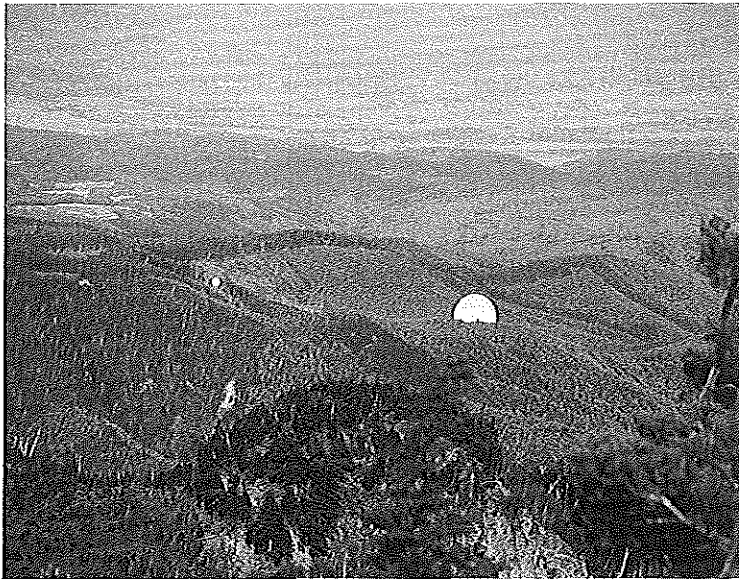
QPSK 変調器に供給される。Ku 帯送信機の送信出力は 4W である。Ku 帯アンテナは、直径 45cm のパラボラで、衛星の姿勢制御系から供給される姿勢情報と地上から送られ、衛星上に蓄積された軌道情報をもとに、地上局を追尾する。アンテナ給電線の可動部分にはフレキシブルケーブルを用いている。フレキシブルケーブルの曲がりの変化による位相ドリフトは、相関処理の積分時間程度の時間内では無視できるほど小さい。

搭載系の折り返し系としての位相安定度は付図2のように測定されている [11, 29]。位相雑音は典型的な白色性である。

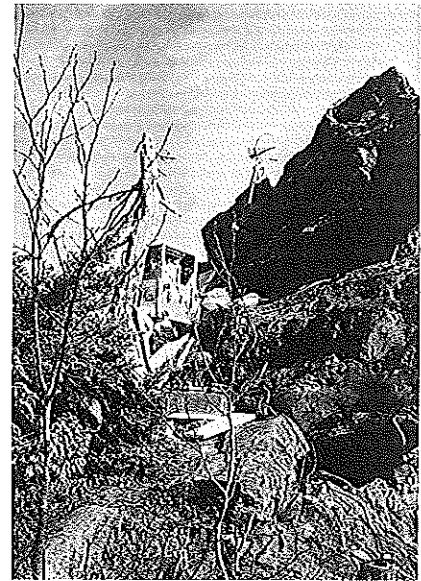
付録2 臼田での大気中伝搬実験

衛星トランスポンダを、北八ヶ岳中腹、臼田局の 10m アンテナ局から約 5km 離れた地点に運び、大気中伝搬を含む経路での位相基準信号伝送の実験を行った。10m アンテナからトランスポンダ設置点を見る高度角（仰角）は 6 度であった。トランスポンダ側の送受信にはホーンアンテナを用い、アンテナを、風により動かないように岩塊に固定した。実験の状況を写した写真を付図 3 (a)(b) に載せる [24]。付図 4 にみるように、測定された位相データには、大気中の伝搬路の変動によると考えられる大きな時間的変化が見られる。（トランスポンダが熱的に安定するのに約 2000 秒を要したので、図の横軸は 2000 秒から始まっている）。位相ゆらぎをアラン標準偏差で表すと付図 5 のようになった。平均時間約 10 秒以上において、大気に起因するフリッカ性のゆらぎが大きく現れている [29]。ここに見る振る舞いは、軌道上の衛星と間のリンクにおいて現われる大気ゆらぎの影響を予見させるものであった。

また、この実験の終盤に天候が急速に崩れ、臼田局付近に強い風が吹いた。その際、アンテナ付近の風と相関があると見られる位相変動が観測されている。位相変化の振幅は 15 deg p-p 程度に達し、4.4 節に述べた事前予測に合致するものであった。



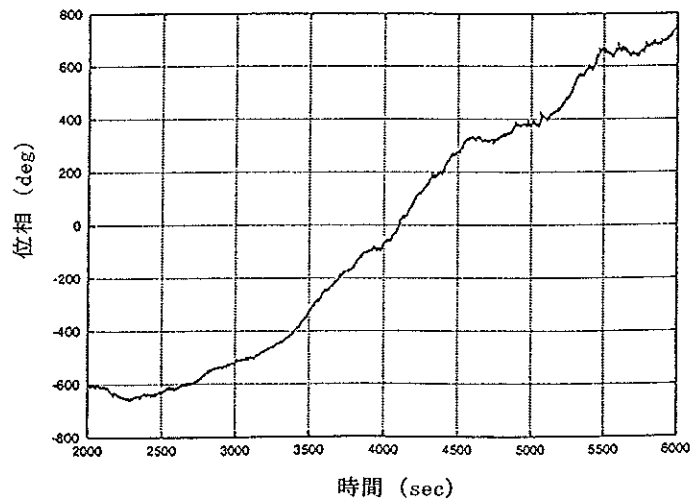
(a)



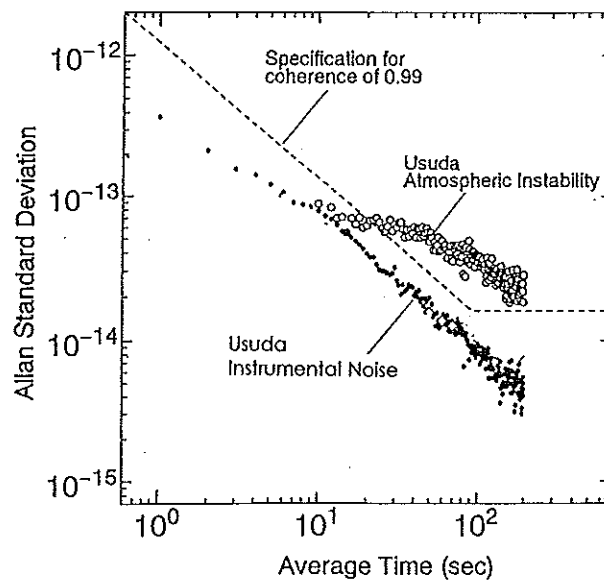
(b)

付図3 臼田での大気中伝搬地上実験.

(a) 折り返し点から見た10m アンテナと64 m アンテナ, (b) 折り返し点の機器設置状況.



付図4 測定されたループ位相のデータ



付図5 ループ位相データから求めたアラン標準偏差

参考文献及び註記

- [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, H. Hirabayashi, T. Orii, and E. Nakagawa, "Design of the Space-VLBI Satellite Muses-B," *Proc. 19th Int. Symp. on Space Technology and Science*, pp.775-780, Yokohama, May 1994.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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, 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.
- [7] H. Hirabayashi, R. A. Preston and L. I. Gurvits, ed., *VSOP Results and the Future of Space VLBI*, Advances in Space Research, Vol.26, No.4, 2000.
- [8] H. Hirabayashi, P. G. Edwards, and D. W. Murphy, ed., *Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI*, Proc. of the VSOP Symposium, ISAS, Jan. 2000.
- [9] G. S. Levy, et al., "Orbiting Very Long Baseline Interferometry Observations Using the Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS) at 2.3 and 15 GHz," *39th Congress of Int. Astronautical Federation*, IAF-88-414, Bangalore, Oct. 1988.
- [10] N. Kawaguchi, H. Kobayashi, T. Miyaji, H. Mikoshiba, A. Tojo, Z. Yamamoto, and H. Hirosawa: "Ground Supporting Facilities for VSOP Observations," *VLBI Technology, Progress and Future Observational Possibilities*, T. Sasao, S. Manabe, O. Kameya and M. Inoue, ed., Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, pp.26-33, 1994.
- [11] 宇宙科学研究所報告「科学衛星『はるか』の位相基準信号伝送システムー衛星搭載系篇ー」(仮題)を小林秀行, 冨家文穂, 高橋今朝人, 他が著者となって作成準備中.
- [12] H. Hirosawa: "VSOP (VLBI Space Observatory Programme) Mission and its Telecommunications," *The 10th Space Frequency Coordination Group (SFCCG) Meeting*, Input Document SF10-4, Gaithersburg, MD., USA, Oct. 1-5, 1990.
- [13] N. Kawaguchi: "Phase Transfer with an Unmodulated Carrier for Space VLBI Mission," *The 10th Space Frequency Coordination Group (SFCCG) Meeting*, Input Document SF10-5, Gaithersburg, MD., USA, Oct. 1-5, 1990.
- [14] *Minutes of the 10th Annual Meeting of Space Frequency Coordination Group (SFCCG)*, pp.12-13, Gaithersburg, MD., USA, Oct. 1-5, 1990.
- [15] 川口則幸による MUSES-B 地上系技術資料「VSOP 位相伝送系について」(1993, 未発表)に基づく.
- [16] 川口則幸の提案
- [17] 清水純一, 川口則幸, 廣澤春任: 「スペース VLBI 観測におけるアップリンク周波数制御に関する検討」, 電子情報通信学会信学技報, SANE96-96, Feb. 1997.
- [18] 鈴木和正, 川口則幸, 春日 隆, 廣澤春任, 山本善一, 「スペース VLBI 観測のためのアップリンク周波数制御」, 電子情報通信学会論文誌 (2000 年 11 月投稿)
- [19] スペース VLBI のための新たな相関処理装置の研究が MUSES-B 衛星の開発と平行してなされ, 1993 年度の補正予算において, その開発・製作が認められた. VSOP 相関器と名付けられた. 国立天文台三鷹に設置され, 「はるか」打ち上げ後, 運用に供されている. Ref.: Y. Chikada, N. Kawaguchi, M. Inoue, M. Morimoto, H. Kobayashi, S. Mattori, T. Nishimura, H. Hirabayashi, S. Okumura, S. Kuji, K. Sato, K. Asari, T. Sasao, and H. Kiuchi, "The VSOP Correlator," *Frontiers of VLBI*, H. Hirabayashi, M. Inoue, H. Kobayashi, ed., pp.79-84, Universal Academy Press, Tokyo, 1991.
- [20] 川口則幸による MUSES-B 地上系技術資料「VSOP リンク局地上系の所要位相安定度について」(1994 年 4 月, 未発表)に基づく.

- [21] A. R. Thompson, J. M. Moran, and G. W. Swenson, Jr.: *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, p.279, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [22] ドップラー計測には4つのモードを持たせ、Mode 0, Mode 1, Mode 2, Mode 3と名付けている。予報値によるアップリンク周波数制御を行い、ダウンリンク信号周波数から固定値(135MHz)を差し引いてドップラーカウンターに入力する場合をMode 2と呼び、「はるか」の定常運用ではこの方式によりドップラー計測を行っている。アップリンクの周波数補償値をドップラーシフトの予測に基づき適当な代表値 $f_{ud'fix}$ に固定した上で、ドップラー計測用信号を、Ku帯疑似RF送信装置から導いた140MHz帯の同アップリンク信号を基準として周波数変換する(図5参照)場合をMode 0と呼ぶ。これは、従来から本研究所の科学衛星で用いているSバンドドップラー計測と同等である。残りのMode 1とMode 3では、いずれもMode 2と同様にダウンリンク信号周波数から固定値(135MHz)を差し引いて計測するが、アップリンク送信に関しては、Mode 1では周波数を固定し、Mode 3では周波数を可変制御する。Mode 3は「閉ループ制御」[16, 17, 18]を行う場合である。
- [23] 使用するダウンリンクドップラー補償予報値は時刻 $t + T_u + T_d$ におけるものであり、ここで t はアップリンク送信時刻基準に基づく時刻であることから、ダウンリンクドップラー補償予報値を表す関数の時間変数には t を用いず、それと異なる変数 s を用いている。
- [24] 清水純一氏(大学院学生としてアップリンク周波数制御の研究に参加[17])の撮影
- [25] NASA ジェット推進研究所(JPL)が担当した海外リンク局(ゴールドストーン, キャンベラ, およびマドリッド)では、周波数を1秒ごとにステップ状に変化させている。臼田局においては、周波数変化が大きい時の誤差の発生を懸念し、ここに述べるようなランプ状制御を採用した。
- [26] 位相同期(PLL)受信機の周波数ステップ入力応答の位相誤差は $\Delta\theta = (\Delta\omega/K)[1 - \exp(-K\Delta t)]$ で与えられる(完全2次系を仮定)。ここで、 K はループ利得、 $\Delta\omega$ は角周波数ステップ、 Δt は時間である。MUSES-B搭載の受信機では雑音等価帯域幅 B_L は1kHzで、 B_L と K の関係 $B_L = K/4$ から、 K は4kHzである。 Δt が 10μ 秒と小さいので、 $K\Delta t$ は1に比べて十分小さく、上式は $\Delta\theta = \Delta\omega\Delta t$ と近似できる。周波数ステップを例えば 10μ Hzの100倍としても、 $\Delta\theta \sim 10^{-7}$ (rad)であり、この階段状周波数制御において発生する位相誤差は1度に比べて無視できるほど小さい。
- [27] W. F. Egan: *Frequency Synthesis by Phase Lock*, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [28] T. Ichikawa and T. Kato, "Navigation and MUSES-B Mission HALCA," *Proc. 13th Int. Symp. on Space Flight Dynamics*, American Astronautical Society, pp.833-840, Maryland, May 1998.
- [29] N. Kawaguchi: *New VLBI Observing Techniques under Strong Atmospheric Fluctuations*, Doctoral Dissertation Thesis, The Graduate University for Advanced Studies, November 1997.
- [30] 小野真裕, 川口則幸, 廣澤春任: 「科学衛星「はるか」の位相基準信号伝送における大気位相揺らぎの測定と大気構造に関する考察」, 電子情報通信学会信学技報, SANE98-43, Aug. 1998.
- [31] M. Ishiguro, N. Kawaguchi, Y. Asaki, H. Kobayashi, and H. Hirose, "A Novel Method to Compute the Troposphere Path Delay Fluctuations with 22GHz Water Vapor Line Emissions," *26th General Assembly of the International Union of Radio Science*, Paper JF.P.3, Toronto, August 1999.
- [32] 朝木義晴, 小林秀行, 石黒正人, 廣澤春任, 市川 満, 平林 久, 「22GHz水蒸気ラインラジオメータによる大気位相遅延の測定: 『はるか』ラウンド・トリップ位相と水蒸気輝度温度との比較実験」, 電子情報通信学会信学技報, SANE2000-104, Nov. 2000.

既 刊 行 物

- 第 94 号 (1997年 3 月) ロケット搭載用窒素振動温度計測器の開発に関する基礎研究
第 95 号 (1997年 8 月) 熱圏下部の窒素分子振動温度, 回転温度および数密度—観測
ロケット S-310-24 号機による観測—
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蒸気密度の測定
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質質量分析器の開発
第 109 号 (2000年 3 月) 金星ホー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 バンドン冷却低雑音増幅器
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

宇宙科学研究所報告

第 114 号

2001年 3 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 藤原印刷株式会社
〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-6-4
電話 (042) 573-3090

