

宇宙科学研究所報告

第111号

臼田宇宙空間観測所用 Xバンド冷却低雑音増幅器

市川 満・阿部安宏・井口和美・城田俊哉・廣澤春任

2000年10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
不定期継続刊行物です。

本報告についてのお問い合わせは下記に連絡下さい。

宇宙科学研究所 管理部庶務課法規・出版係

臼田宇宙空間観測所用 Xバンド冷却低雑音増幅器

市川 満*・阿部安宏**・井口和美**・城田俊哉**・廣澤春任*

(2000年8月22日受理)

An X-Band Cryogenically-Cooled Low Noise Amplifier for the Usuda Deep Space Station

Mitsuru Ichikawa*, Yasuhiro Abe**, Kazumi Iguchi**, Toshiya Shirota**
and Haruto Hirose*

Abstract: An X-band low noise amplifier has been developed for the Usuda Deep Space Tracking Station by utilizing High Electron Mobility Transistors (HEMT). Appropriate HEMT's have been selected among the commercially available FET devices by examining noise performance and stability at cryogenic temperatures. The amplifier has been designed using the device parameters at room temperature, then been adjusted and tuned at 77K, and finally been cooled to 15K to confirm and judge its performance. A noise temperature of 6-7 K in the amplifier unit and that of 10K in the amplifier system, have been achieved by this approach. The amplifier has been operating for the tracking of ISAS's Mars explorer NOZOMI since August 1999 at Usuda 64m antenna site.

要 旨

臼田宇宙空間観測所における深宇宙探査機の追跡用に Xバンドの低雑音増幅器を開発した。市販のHEMT（高電子移動度トランジスタ）ないしFET数種類について低温での雑音特性と安定性を調べ、適切なものを選択、その上で、(1) 増幅器を常温のパラメータを用いて設計、(2) 液体窒素温度77Kにおいて調整、(3) 動作物理温度15Kにおいて性能を測定、判定する、という手順を取った。その結果、増幅器単体の雑音温度6~7K、システムとして10K、の低雑音増幅器を製作することができた。開発した低雑音増幅器は64mアンテナに組み込まれ、1999年8月以来、火星探査機「のぞみ」の運用に使用されている。

重要語: 低雑音増幅器、HEMT、深宇宙局、深宇宙探査

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

** 日本通信機株式会社 Nihon Tsushinki Co., Ltd.

1. まえがき

臼田宇宙空間観測所における深宇宙探査機の追跡は、1985年1月8日に打ち上げられたわが国最初の深宇宙探査機「さきがけ」において始まった [1]。深宇宙探査機を追跡する地上局は、大型パラボラアンテナをはじめとして、数々の深宇宙探査に特有の設備や装置を備える必要があるが、それらの中に、重要なものとして、低雑音増幅器がある。深宇宙探査機は天文単位（1天文単位は約1億5千万km）を単位とするような遠方まで航行し、地球に到達する探査機からの電波は極めて微弱となるので、アンテナに接続される受信用の増幅器は、それ自身が発生する雑音を極力小さくする必要がある。「さきがけ」ならびにその半年後に打ち上げられた「すいせい」では、テレメトリにSバンドの周波数（2.2GHz帯）が用いられ、そのために、臼田宇宙空間観測所の建設に当たっては、まず、Sバンド用の低雑音増幅器の開発がなされた [2]。この装置はパラメトリック型増幅器で、ガスヘリウム冷凍機を備え、雑音温度は増幅部単体で5K、増幅器システムとして8Kであった。設置以来約15年にわたって、装置は順調に動作してきた [3]。

一方、宇宙科学研究所の科学衛星のテレメトリは、伝送データレートをより高めるために、Xバンド（8.4GHz帯）の電波を用いるようになった。1992年に打ち上げられた磁気圏観測衛星ジオテイル（GEOTAIL）、およびそれに先だって1990年に打ち上げられたジオテイルのための試験衛星「ひてん」は、地球周回衛星ではあるが月以遠という遠方まで航行することから、臼田宇宙空間観測所で追跡運用されることとなった [4]。この両衛星では、容量の大きな観測データをXバンドで、容量の小さな衛星監視データ等をSバンドで送信するように設計された。臼田局では、「ひてん」の打ち上げに向けて、電子冷却（ペルチェ効果冷却）のXバンド固体増幅器を整備した。この増幅器は、雑音温度55Kで、汎用品とも言えるものであるが、「ひてん」およびジオテイルからのテレメトリデータの受信には十分な能力を持つものであった。

1998年7月、宇宙科学研究所は火星探査機「のぞみ」を打ち上げた。「のぞみ」はSおよびXバンドの二つの周波数帯の送信機を搭載したが、主要な観測データはXバンドで送られる。「のぞみ」との間の通信距離は最大2.6天文単位（約3億9千万km）に達する。「のぞみ」の打ち上げに向けて、雑音温度10Kないしそれ以下のXバンドの低雑音増幅器を臼田局に整備することが必須の課題となった。

雑音温度10K以下の低雑音増幅器として、NASAのDeep Space Network (DSN) ではメーザ増幅器が長年にわたって用いられてきている [5, 6, 7]。DSNで通常の運用に使用されているXバンドのメーザ増幅器の雑音温度は3.8Kである [7]。一方、近年、電界効果トランジスタ（FET）デバイス技術が大きく進み、固体増幅素子HEMT（High Electron Mobility Transistor、高電子移動度トランジスタ）を極低温に冷却することにより低雑音の増幅器を製作することが電波天文学の分野で行われている [8, 9, 10]。固体素子冷却増幅器は、メーザ増幅器やパラメトリック増幅器に比べて、機器の構成が単純であり、保守も容易で、また、新たな開発に要する期間もより短いことが期待できる。そこで、臼田局用に、国内で高性能のものが入手可能なHEMTを用いて、低雑音の冷却増幅器を開発することとした。開発に当たっての課題は、雑音温度10Kの低雑音の実現と共に、深宇宙地上局で必要とされる高い運用信頼性の確保であった。製作した低雑音増幅器は、増幅部ユニットにおいて6~7K、増幅器システムとして10K、という雑音温度を実現し、1998年10月に臼田の64mアンテナ局に組み込まれた。1999年8月から「のぞみ」の追跡・運用に使用されている。

本稿は、臼田64mアンテナ局用に開発したXバンド冷却低雑音増幅器に関して、増幅器設計の方針と手法、製作した増幅器の構成、主要性能などを述べるものである。

2. 増幅素子の選択

低雑音増幅器の開発に当たって、性能の目標を

- ・動作周波数 8.4 ~ 8.5 GHz
- ・利得 35 dB 以上
- ・雑音温度 10 K

と設定した。入力導波管（断熱機構を含む）の損失および入力部の冷却アイソレータの損失による雑音の発生を考慮すると、増幅部ユニットとしてはおよそ7 K以下の雑音温度を目指すことになる。

増幅素子としてHEMTないしはそれと同等の性能をもつFETを採用することとし、市販され、入手が可能なものについて、常温（300K）と低温（15K付近）における素子の動作および性能を、実際に測定することにより調べた。15Kは製作する増幅器で予定した動作物理温度である。測定した素子は6種類であり、その内3種類が、冷却しても性能は良好で、安定していた。性能の良好であった3種類の素子、素子名称 MGF4318F、FHX13LG、FHX76LP について、常温300Kおよび物理温度18Kで得られた雑音温度の実測値と、カタログ上に与えられている特性（常温における雑音指数とSパラメータ等）を、表1に示す。3種類の素子の内で FHX76LP が雑音に関して最も高い性能を示し、周波数8.0GHzにおける雑音温度は温度18Kにおいて14Kで、常温300Kの値に対して1/8.5であった。また、周波数8.4GHzにおいて最も低い値、7K、を示した。

後述するように製作した増幅器は4段増幅回路であるが、この測定結果をもとに、初段および第2段には雑音特性の最も良い FHX76LP を用いることとし、第3段、第4段には、直線性への配慮から MGF4318F を用いることとした。FHX76LPとMGF4318F はともに PHEMT と呼ばれるタイプの素子である。なお、これらのデバイスは近年衛星放送用受信機における需要から高性能のものが安定に製作されるようになったものである。素子の構造としてはパッケージ型、チップ型、およびMMICの3種類があるが、メンテナンス性を配慮し、パッケージ型を使用することとした。

表1 固体増幅素子の特性の比較

	MGF4318F	FHX13LG	FHX76LP
カタログNF値	0.43dB at 8GHz	0.37dB at 8GHz	0.32dB at 8GHz
HEMT 構成 素子 ゲート長	InGaAs 0.25um	PHEMT 0.2um	PHEMT 0.15um
300K雑音温度 f=8GHz	133.5K 1.67dB	143.6K 1.74dB	119K 1.49dB
18K 雑音温度 f=8GHz	19.1K 0.27dB	21.0K 0.30dB	14K 0.20dB
倍率	7.1	6.84	8.5
18K雑音温度 最小値	15K 7.5GHz	12K 7GHz	7K 8.4GHz
S11	0.74 -132	0.70 -133	0.66 -117
S12	0.09 6.6	0.06 7.9	0.07 15.2
S21	3.24 58.8	3.30 46.4	4.35 61.9
S22	0.35 -108	0.49 -114	0.39 -92.6

3. 冷却低雑音増幅器の設計

3.1 設計の方針

増幅器の設計に当たっては、必要な利得の確保と、雑音温度を最小にすること、という二つの要請を満たす必要がある。利得が最大になるように入出力整合を行う「利得整合」と、入力等価雑音温度を最小にする「雑音整合」の二つの整合は一般に両立しないので、ここでは、雑音温度を最小とすることを優先させる。製作する増幅器は、全体を冷却デュワー内に収め、15K付近の温度に保持する。この動作温度環境はガスヘリウム冷凍機を用いて容易に実現できるもので、増幅器の運用信頼性を確保する上で適切な動作温度である。デュワー内には、増幅器本体とともに、冷却アイソレータと断熱機構付きの導波管が入る。

増幅器を製作するに当たっては、増幅素子とともに、抵抗、コンデンサ、基板、半田、接着剤など、全ての部品が低温下で性能を維持し、同時に安定でなければならない。また、低損失の冷却アイソレータも必要となる。増幅素子の特性はSパラメータ (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}) とノイズパラメータ (Γ_{opt} , T_{min} , R_n) によって表現され、これらに関しては常温のデータのみが与えられている (常温での雑音特性は、通常、雑音指数で表されるが、本稿では、雑音温度を用いる)。これらのパラメータは冷却すると変化する。また、増幅回路を15Kの極低温において調整することも極めて困難である。そこで、次の方法を取ることにした。

増幅器の設計は常温と仮定して行う。組み上げた装置を液体窒素デュワーに入れ、液体窒素温度77Kにおいて、調整を行う。すなわち、雑音特性を最適にし、かつ必要な利得-周波数特性を持つようにする。これをもって低温 (15K) での増幅器を代表させるものとし、次に、増幅器の性能を、動作温度15Kにおいて測定する。ここで期待通りの性能となっていれば増幅部ユニットとして完成とし、不十分であれば上の調整を繰り返す。

3.2 利得整合と雑音整合

増幅器1段は、図1に示すように、Sパラメータ [S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}] をもつ増幅素子と入力整合回路、出力整合回路からなる。入力整合回路を負荷側からみた反射係数を Γ_s 、出力整合回路を入力側からみた反射係数を Γ_l 、この状態での増幅素子の入力反射係数を Γ_{in} 、出力反射係数を Γ_{out} とすると、増幅器1段の利得は

$$\Gamma_s = \Gamma_{in}^* \quad \text{および} \quad \Gamma_l = \Gamma_{out}^* \quad (1)$$

の共役整合条件が満たされるときに最大となる (付録参照)。入出力回路の整合がこれからはずれるにつれて、利得は低下する。

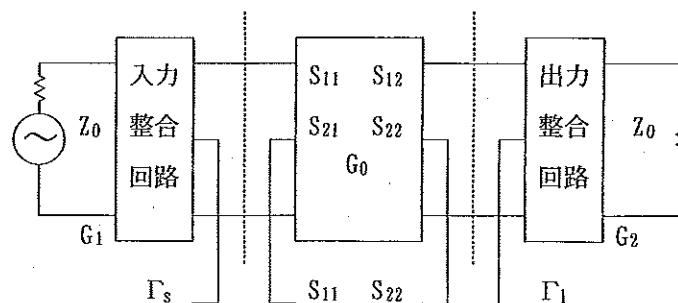


図1. 増幅器一段の基本構成. G_1 , G_0 , G_2 については付録参照

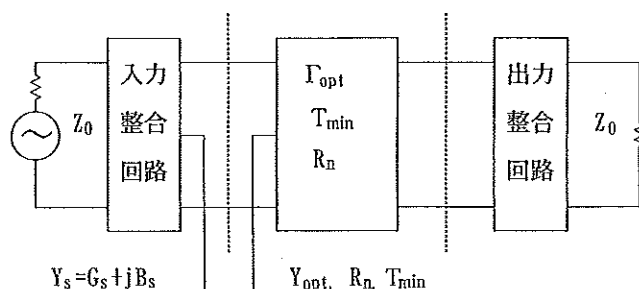


図2. 雑音整合

一方、増幅器の雑音温度は電源アドミッタンスを変えると変わり、雑音温度が最小となる電源アドミッタンスが存在する。図2は雑音整合を説明するための一段増幅回路の構成である。増幅素子に関しては、 Γ_{opt} 、 T_{min} 、および R_n の三つの雑音パラメータが一般に与えられる。ここで T_{min} は雑音温度の最小値、 Γ_{opt} は雑音温度が最小となるような電源の反射係数、 R_n はその時の素子の等価雑音抵抗である。これらのパラメータは、常温に関しては、周波数ごとに測定され、カタログ上に記載されている(T_{min} は実際には雑音指数 NF_{min} で与えられている)。

反射係数に替えてアドミッタンスを使い、入力整合回路を増幅素子側から見込むアドミッタンスを $Y_s (= G_s + jB_s)$ 、増幅素子の雑音温度が最小値 T_{min} を取る電源アドミッタンスを $Y_{opt} (= G_{opt} + jB_{opt})$ とおく。アドミッタンス Y は反射係数 Γ と、 $Y = (1 - \Gamma) / (1 + \Gamma)$ により関係付けられる。増幅器の雑音温度は、アドミッタンスを用いて、

$$T_n = T_{min} + (R_n / G_s) T_o (Y_s - Y_{opt})^2 \quad (2)$$

のように与えられる [11, 12]。なお、 $T_o = 290K$ である。雑音温度を最小にするには、 $(Y_s - Y_{opt})^2$ を最小にすればよい。

設計に当たっては、入出力整合回路を式(1)の共役整合条件を満たすようにした上で、雑音温度最小(T_{min} の動作状態に近づける)へ向けて、入力整合回路およびHEMTのソース接地を調整していく。実際の設計に当たっては、Ansoft社のSuper-Compactのシステムアナライザを使用した。回路の構成と回路素子の定数、常温での最小雑音温度、利得、VSWR等を、反復試行のもとに決定した。

一方、増幅素子で発生する雑音は温度を下げると減少する。低温にすると、利得に相当するパラメータ S_{21} が増大し、また同時に S_{12} の抵抗分が減少するためである。低温下では雑音に対する最適整合条件が変わるので、入出力整合回路を、雑音温度が最小となるように再調整することが必要となる。

製作する増幅器は多段構成である。雑音特性の最適化は初段(および第2段)において行い、増幅器全体の利得-周波数特性を平坦にするための調整は、後段において行う。増幅器の入力には冷却アイソレータを使用し、初段に関して、雑音最適化を図ることによって起こる入力整合回路と信号入力線路との間のVSWRの劣化に対処するが、第一段以降の段間にはアイソレータを使用しないので、そこでは、VSWRと周波数特性ならびに帯域に十分考慮を払う。

整合回路はコンデンサとインダクタンスで構成されるが、実際には、様々な損失を伴う。それらの損失は雑音温度の上昇をもたらす。入力回路の損失としては、DCバイアスのためのキャパシタにおける誘電体損失、分布定数線路の導体損失と誘電体損失、さらに分布定数線路からの高次モードによる輻射損失などがある。これらの中で、入力キャパシタにおける誘電体損失が最も大きな影響を与える。キャパシタとしては、使用周波数に適したチップコンデンサをその $\tan \delta$ を調べて選択する。

3.3 安定性

増幅器回路を設計、製作していくに当たって、安定性を十分な余裕をもって確保しなければならない。増幅回路では、理論的に安定である条件 [13]、

$$K \text{ (安定係数)} > 1$$

が満たされるとき、先に述べた共役整合条件 (式 (1)) を満たす入出力整合回路が存在する。 $K > 1$ のもとで、入出力回路に共役整合をとらせ、安定な回路とすることが、実際に雑音の最適化や利得の確保を行っていく上で前提となる。しかもこうして作られた理論的に安定な回路も、実際には、コンデンサによる帰還や外箱の影響など、理論的に捕捉しきれない要因によって発振する場合もある。また、常温で安定でも温度を下げることにより発振することもある。製作に当たっては、安定性の確認を十分行う。

4. 増幅器の構成と調整

4.1 入力変換部

増幅器の入力は導波管 (WRJ-9) とし、入力変換部の導波管を増幅器回路部に直接接合して、増幅器回路部と入力変換器の間の損失が増えないようにした。図 3 は増幅器回路部ならびに入力変換部の外観図面である。

導波管から同軸への変換にはエンド・ランチャー (End Launcher) 型を採用した [14]。L型のループが管軸中央からオフセットした位置に置かれ、ループは導波管後面において、コネクタを介して増幅器に接続される。入力変換部の動作中心周波数は8.5GHz、帯域幅は2.5GHzである。図 4 にL型ループの形状と位置を示す。ループの調整によって無損失に近い状態が実現できている。ループの寸法、位置の詳細は次の通りである。線の太さ1.0mm、高さ5.4mm、長さ11.0mm、導波管の側壁とループ (線の中心) の間の距離12.7mm、テフロン部分の長さ9.0mm、テフロンの直径8mm ϕ 。図 5 は製作した入力変換部の損失および反射損失の実測値である。

4.2 多段構成増幅器

増幅器の利得の目標値を35dBとしたので、1段当たりの利得を12dBとし、4段構成とすることとした。増幅素子としては、先に述べたように、初段および第2段に低温での雑音特性の良いFHX76LPを用い、第3、第4段には、利得の直線性を考慮してMGF4318Fを用いた。常温において、1段当たりの利得を12dB、4段で48dB

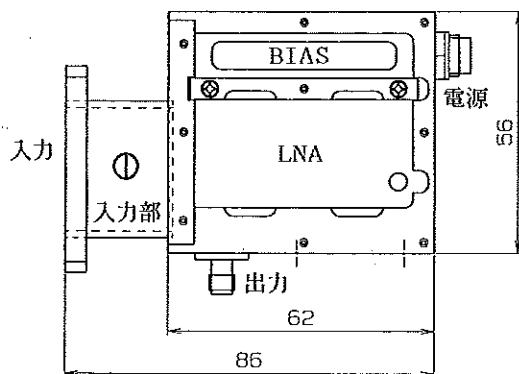


図 3. 増幅器回路部と入力変換部の外観形状および寸法

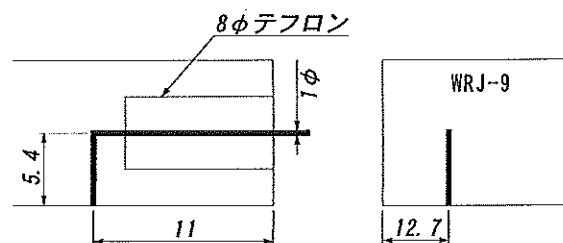


図 4. 入力変換器L型ループの形状と位置

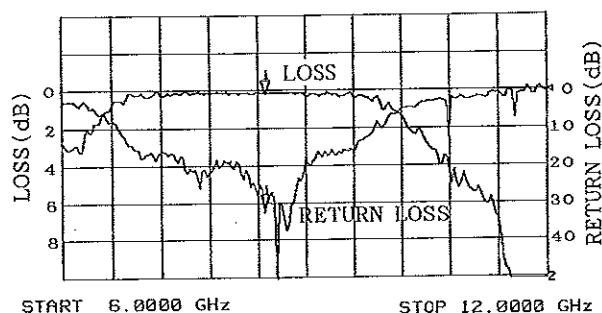


図5. 入力変換器の損失ならびに反射損失

とし、出力減衰器の減衰を6dB、段間減衰器を3dBとして、全体の利得がおよそ35dBとなるようにした。この設定のもとで低温15Kにすると、利得はおよそ40dBとなる。図6に増幅器の回路図を示す。増幅素子のドレイン電流を、FHX76LPについては5mA、MGF4318Fについては12mAとした。ドレインは抵抗51Ωで駆動している。この状態で回路の安定係数Kは全周波数帯域にわたって1より大きくなっており、増幅器の動作の安定が確保されている。

1枚の基板（1ステージ）には、図7に示すように、増幅段2段を載せている。増幅部は基板2枚からなる。基板にはtan δの小さなテフロン（比誘電率 $\epsilon_r = 2.20$ ）を用いている。基板の厚さは、HEMTのソース接地を配慮して、8.4GHzに対する1/4波長（6mm）に比べて十分小さな寸法であるようにし、実際には0.6mm（1/4波長の1/10の厚さ）とした。

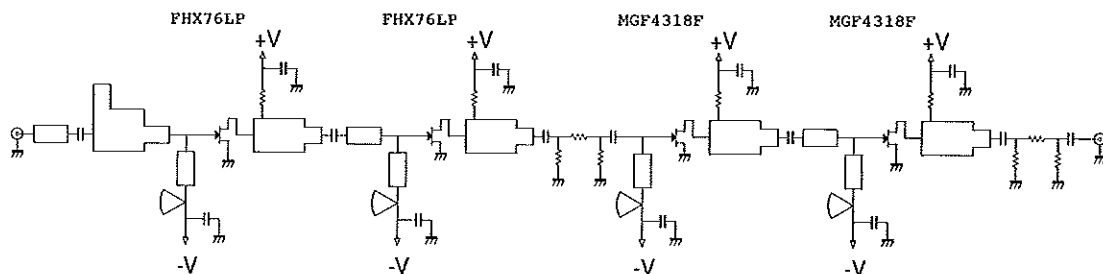


図6. 増幅器回路図

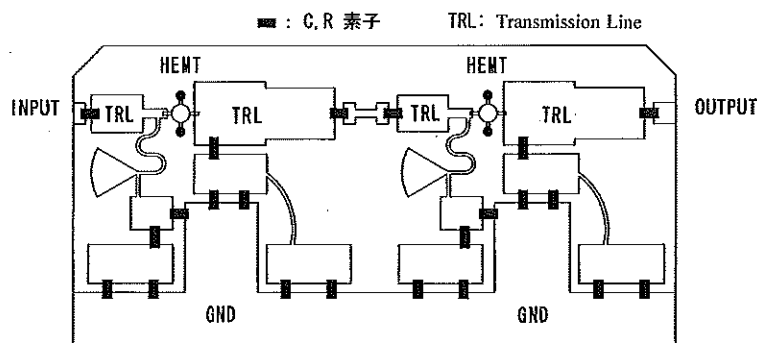


図7. 増幅器前段2段の基板パターン

4.3 調整

製作した増幅器回路部について、先ず常温で、2段ずつの、安定性と利得を調べた。すなわち、前段では入力を初段に入れ、第2段の出力を取り出し、後段においては入力を第3段の前の減衰器から挿入した。後段については利得の平坦性も調べた。

次に、低温下で、次のような調整を行った。増幅器を液体窒素温度（77K）の環境に置き、まず、各段の増幅素子ごとに、利得と、バイアスおよび安定性を確認した。次いで、NFメータとデジタル・オシロスコープを用い、周波数に応じて、利得と雑音温度を調べ、必要な調整を施した。雑音については初段が中心で、主な調整部位は、テフロン基板（厚さ0.1mm）を用いて作った約1mm角のコンデンサ、入力側の伝送路の幅、およびHEMTのソースの接地面との距離などである。利得およびその平坦度についての調整は、後段において、ドレイン側の伝送路の幅を変えることにより行った。

5. 低雑音増幅器の性能

5.1 増幅器本体の性能

製作の最終段階は、低温での特性の測定である。製作した増幅器の本体部分（入力変換部と増幅回路部からなる）を測定用の冷却デューアールに入れ、動作物理温度15Kに保って、Yファクター法により雑音温度を測定した。ノイズソースとしては、アバランシェ・ダイオードを使用した [15, 16]。アバランシェ・ダイオードは、雑音のON/OFFができ、雑音特性が広帯域で、周波数を掃引しながら現象を観測できる、等の利点がある。図8は測定系（雑音温度および利得を測定）のブロック図である。ノイズソースの温度は10,000Kと高く、そのために減衰器（冷却デューアール内にある）を用いている。ノイズソースのホット温度を T_h 、コールド温度を T_c 、周囲温度（デューアール温度）を T_d 、減衰器の減衰量を A_{tx} 、ノイズソースをON/OFFしたときの雑音電力の比を Y とすると、増幅器の入力等価雑音温度 T_e は

$$T_e = (T_{h1} - T_{c1} \cdot Y) / (Y - 1)$$

で与えられる。ここで

$$T_{h1} = T_h / A_{tx} + T_d (1 - 1 / A_{tx})$$

$$T_{c1} = T_c / A_{tx} + T_d (1 - 1 / A_{tx})$$

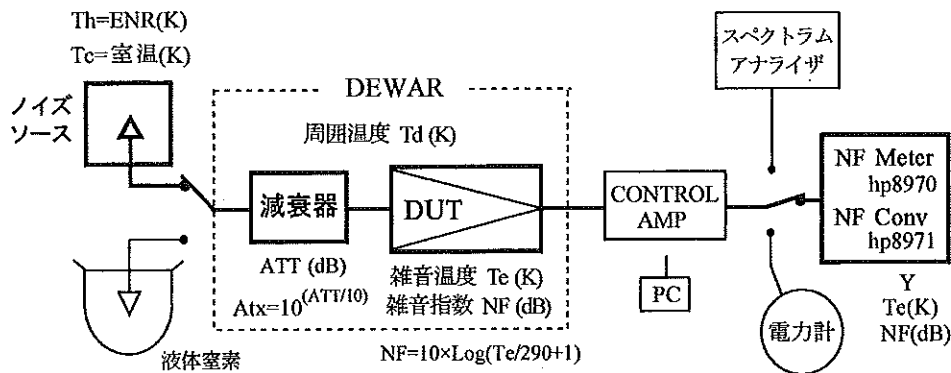


図8. 雑音温度および利得の測定系

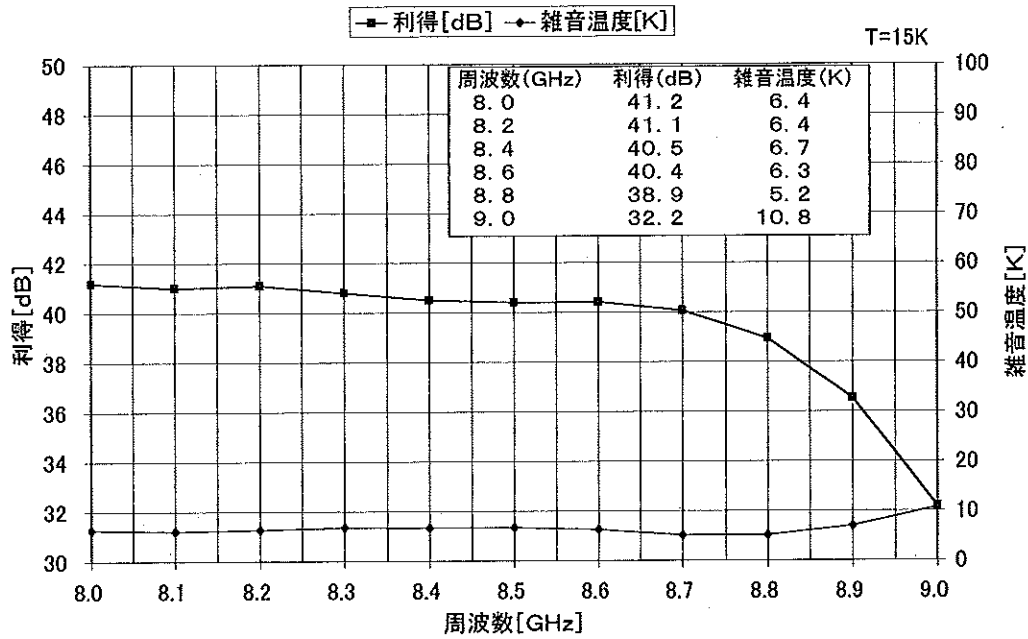


図9. 低温 (15K) での雑音温度と利得

である。なお、 $T_d(1 - 1/A_{tx})$ は温度 T_d の減衰器が発生する雑音に相当する。

図9は、雑音温度の測定の結果、完成品と判定した増幅器ユニットの雑音特性である。そこには利得-周波数特性も併せて示してある。利得も同じくノイズソースを用いて測定したものである。また、比較のために、図10には、この増幅器ユニットを常温で動作させたときの特性を示す。図9に見るように、冷却時の雑音温度は8.4~8.5GHzにおいて、6.5~6.7Kと測定されている。利得も、8.4~8.5GHzにおいて約40dBが確保され、帯域内で十分平坦である。これらの特性は所期の目標を満たすものである。

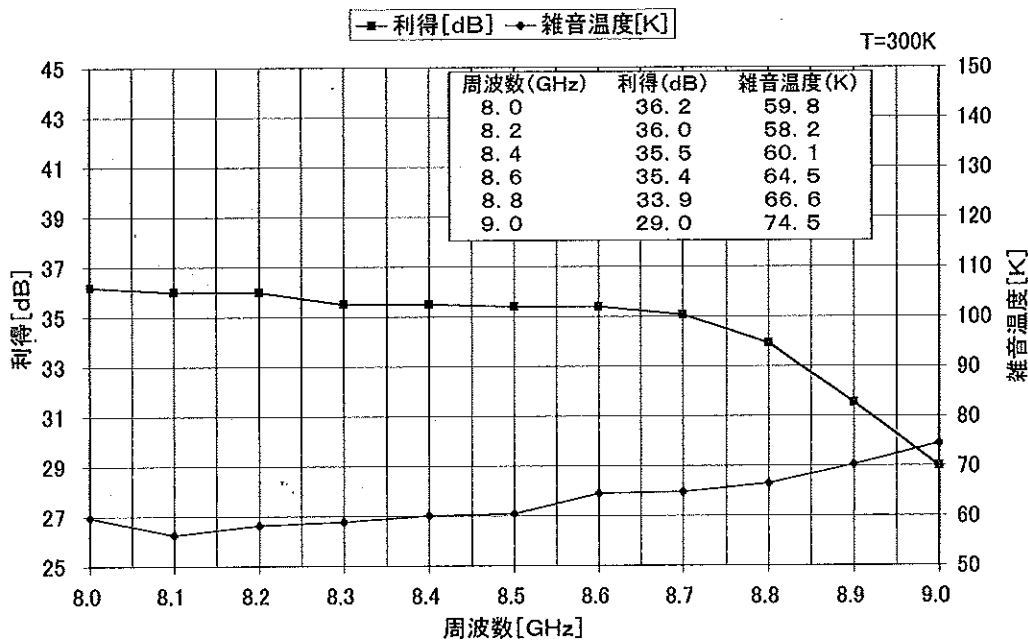


図10. 常温 (300K) での雑音温度と利得

なお、図9に見るように、使用周波数帯から外れてはいるが、8.8GHzにおいて、雑音温度5.2Kが得られていることも注目しておきたい。

5.2 低雑音増幅器システムの雑音温度

5.1にその性能を述べた増幅器本体を、冷却アイソレータ、入力用導波管（断熱変換器と呼ぶ）とともに、冷却デュアーに納めた。入力用導波管は外界（300K）との間の温度差を受け持つためのエポキシ/ガラス繊維を用いた断熱機構をもち、また、そこではカプトン膜を用いて真空と外気との遮断を行っている。アイソレータには冷却して使用できる特別仕様の市販品を用いた。図11は増幅器本体部分の外観、図12は低雑音増幅器システム全体を写した写真である。冷却デュアーはガスヘリウム冷凍機により冷却されている。冷却のためのコンプレッサーの容量は5W、消費電力は2kVAである。

増幅器システムの雑音温度は使用周波数帯において10Kと測定された。増幅器本体（6-7K）からの増加分は、冷却アイソレータの損失（実測値は15Kにおいて0.2dB）と断熱変換器の損失（20Kでの測定に基づき、室温側部分で0.03dB、低温側部分で0.08dBと推定）によるものであるが、それぞれの損失から推定される雑音温度の上昇分の和に大体合致している（後者は300Kと15Kとの間の断熱を行うもので、内部に大きな温度落差と温度勾配をもち、精度の高い推定は困難である）。

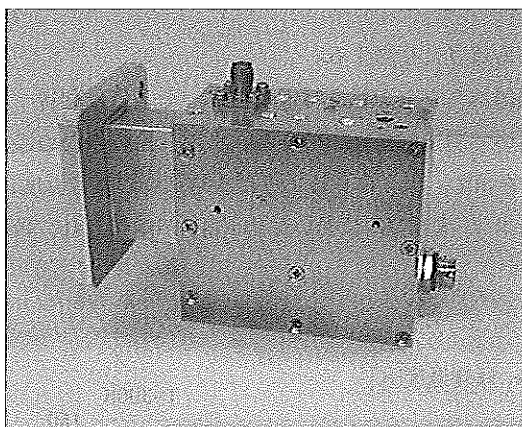


図11. 増幅器本体の外観写真

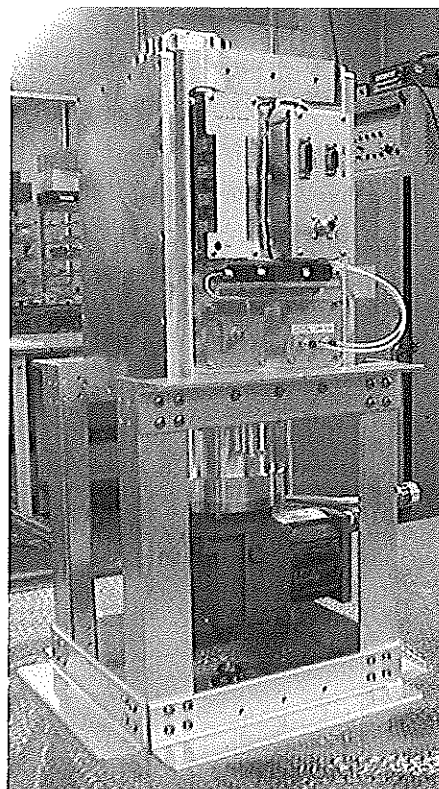


図12. 低雑音増幅器全システム

6. 臼田局への設置

1998年10月、低雑音増幅器を臼田64mアンテナの第4反射鏡出力 [4]、すなわちXバンド受信専用ホーン出力に取り付け、システム雑音温度の測定を行った。そこでの測定の結果を図13に示す。システム雑音温度の測定定義点は低雑音増幅器入力端である。測定は晴天時に行い、アンテナ高度角を10度から90度まで変えた。システム雑音温度は天頂方向で26K、高度角30度で29Kであった。天頂方向の26Kという値から前節に述べた増幅器システムの雑音温度10Kを差し引くと16Kとなるが、16Kという値は、天頂方向のアンテナ雑音温度、給電系損失の寄与、および方向性結合器の寄与などの和として妥当なものである。

低雑音増幅器はその後64mアンテナ第6反射鏡出力 [4] の給電ホーン出力端子に取り付けられ、1999年8月以来、「のぞみ」の運用に使用されている。図14は設置された状態を示す写真である。

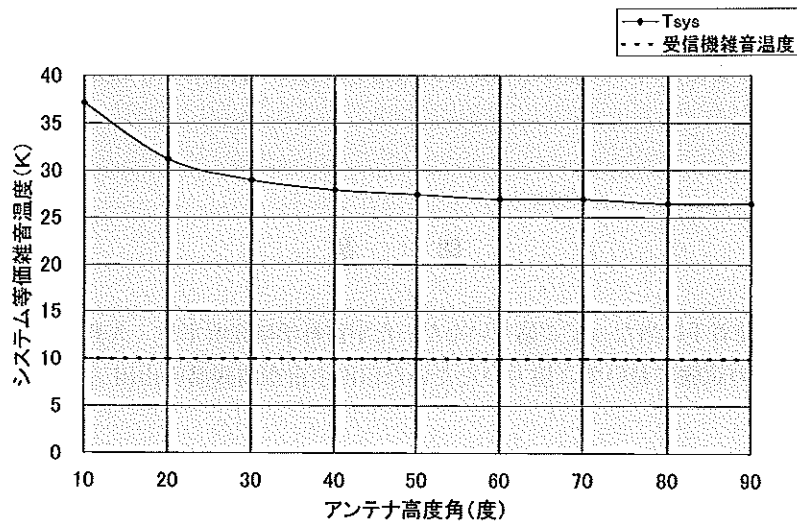


図13. システム雑音温度測定結果、64mアンテナ第4反射鏡出力Xバンド受信専用ホーン出力に接続、天気晴れ。測定日1998年10月30日。

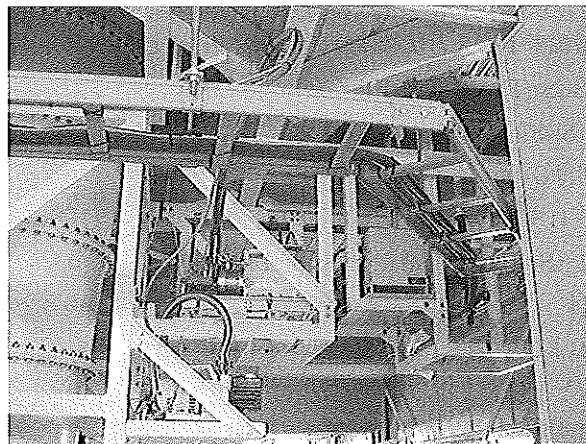


図14. 64mアンテナに取り付けられたXバンド低雑音増幅器 (中央)、右端に給電ホーンの下端部が見える。中央右手の箱は既設のXバンド電子冷却増幅器。

7. むすび

白田宇宙空間観測所における深宇宙探査機の追跡用に開発したXバンドの低雑音増幅器について述べた。本装置は固体増幅素子HEMTを極低温に冷却して動作させるもので、単体で雑音温度6~7K、システムとして10Kという、開発に当たって目標とした性能を満たすものを実現できた。開発に当たっては、まず候補となりうる増幅素子複数個に関して低温（動作温度付近）において雑音特性と安定性を調べ、そこから最適なものを選択、その上で、増幅器を、常温のパラメータを用いて設計し、製作した装置に関して、液体窒素温度の環境で雑音特性と利得が最適になるように調整を行う、という方法を取った。結果は、採用した手法が適切であったことを示したものである。また、雑音温度の測定結果を詳細に見ると、使用帯域から外れたところで更に1.5K低い雑音温度が得られており、このことは、設計・調整手法に更なる工夫を加えることによって一層の低雑音化が期待できることを示している。増幅素子のSパラメータを低温で測定する方法を開拓することも、増幅器の一層の低雑音化を図る上で有効であり、今後の課題として挙げられる。

開発した低雑音増幅器は64mアンテナに組み込まれ、1999年8月以来、火星探査機「のぞみ」の運用において、有効に使用されている。また、同一仕様の増幅器を白田局用に更に一台製作し、現用・予備の交換が可能であるようにしている。

謝 辞

本低雑音増幅器の開発着手に当たってご協力いただいた宇宙科学研究所平林 久教授、増幅器の白田64m局への設置ならびに設置後の試験においてご協力いただいた白田宇宙空間観測所山田三男氏に厚くお礼を申し上げます。

付録. 増幅器の利得

増幅器1段は本文図1に示したように、Sパラメータ $[S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}]$ をもつ増幅素子と入力整合回路、出力整合回路からなる。入力整合回路を負荷側からみた反射係数を Γ_s 、出力整合回路を入力側からみた反射係数を Γ_l とする。この状態での増幅素子の入力反射係数 Γ_{in} および出力反射係数 Γ_{out} は

$$\Gamma_{in} = S_{11} + S_{12}S_{21}\Gamma_l / (1 - S_{22}\Gamma_l)$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + S_{12}S_{21}\Gamma_s / (1 - S_{11}\Gamma_s)$$

で表される。増幅器1段の利得 G_t は

$$G_t = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_s|^2)(1 - |\Gamma_l|^2)}{|(1 - S_{11}\Gamma_s)(1 - S_{22}\Gamma_l) - S_{21}S_{12}\Gamma_s\Gamma_l|^2} \quad (S1)$$

で与えられ [17]、この利得は

$$\Gamma_s = \Gamma_{in}^* \quad \text{および} \quad \Gamma_l = \Gamma_{out}^* \quad (S2)$$

の共役整合条件が満たされるとき最大となる。

式 (S1) の分母において

$$|S_{21}S_{12}\Gamma_s\Gamma_l| \ll 1 \quad (S3)$$

が成り立つ ($|S_{12}| \neq 0$ である) とき、利得は

$$G_t = [(1 - |\Gamma_s|^2) / |1 - S_{11}\Gamma_s|^2] \times |S_{21}|^2 \times [(1 - |\Gamma_l|^2) / |1 - S_{22}\Gamma_l|^2] \quad (S4)$$

のように三つの項の積の形に書ける。式 (S3) の条件は通常は十分には満たされないが、式 (S1) は複雑であるため、設計の見通しを立てるに当たっては、式 (S4) がよく用いられる。式 (S4) を $G_t = G_1 \times G_0 \times G_2$ と置くと、 G_1 、 G_0 、 G_2 は、それぞれ、入力整合回路、増幅素子、出力整合回路の利得であると見なすことができる。 $G_0 (= |S_{21}|^2)$ は増幅素子自体の特性とバイアス条件のみに関係する量である。 G_1 と G_2 は、それぞれ、整合回路と素子の関係によって変わる。これらは $\Gamma_s = S_{11}^*$ 、 $\Gamma_l = S_{22}^*$ の時に最大で、整合からはずれるにつれて低下する(厳密には式 (S2) の共役整合が成り立っているときに利得は最大である)。

参考文献

- [1] T. Nomura, T. Hayashi, T. Nishimura, H. Hirosawa and M. Ichikawa: "Usuda Deep Space Station with 64-Meter-Diameter Antenna," *Acta Astronautica*, Vol. 14, pp. 97-103, 1986.
- [2] 広沢春任、市川 満、秋永和寿、半田和典、本間一夫: 「深宇宙探査地上局用 Sバンド低雑音増幅装置」、NEC技報、Vol. 38, No. 13, pp. 50-53, 1985.
- [3] 廣澤春任: 「臼田の低雑音増幅器、役目を終える」、ISA Sニュース、No. 230, p. 5, 2000年 5月.
- [4] T. Hayashi, T. Nishimura, H. Hirosawa, M. Ichikawa and Z. Yamamoto: "X-band Capability of Usuda DSN Station and its Application to Future Missions," *The 42nd Congress of International Astronautical Federation, IAF-91-451*, Montreal, Oct. 1991.
- [5] J. S. Shell, R. C. Clauss, S. M. Petty, G. W. Glass, M. S. Fiore, J. J. Kovatch, J. R. Loreman, D. E. Neff, R. B. Quinn, and D. L. Trowbridge: "Ruby Masers for Maximum G/Top," *Proc. IEEE*, Vol. 82, No. 5, pp. 796-810, May 1994.
- [6] D. L. Trowbridge: "Block IIA Traveling-Wave Maser," *The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-87*, Jet Propulsion Laboratory, pp. 158-164, Nov. 15, 1986.
- [7] M. Britcliffe, T. Hanson, and F. Fernandez: "An Improved X-Band Maser System for Deep Space Network Applications," *The Telecommunications and Mission Operations Progress Report 42-141*, Jet Propulsion Laboratory, 10 p., May 15, 2000.
- [8] M. W. Pospieszalski, S. Weinreb, R. D. Norrod and R. Harris: "FET's and HEMT's at Cryogenic Temperatures - Their Properties and Use in Low-Noise Amplifiers," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. MTT-36, No. 3, pp. 552-560, March 1988.
- [9] R. D. Norrod, G. H. Behrens, F. D. Ghigo, and B. J. Levin: "Design and Implementation of a Low-Noise Prime-Focus S/X Receiver System for Radio Astronomy," *Proc. IEEE*, Vol. 82, No. 5, pp. 768-775, May 1994.
- [10] 武井健寿、仰木一孝、阿部安宏、小平真次、宮澤敬輔、稲谷順司: 「冷却超低雑音HEMT増幅器」、電子情報通信学会信学技報、MW91-49, 1991年7月.
- [11] J. Lange: "Noise characterization of linear two-ports in terms of invariant parameters," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. SC-2, pp. 37-40, June 1967.
- [12] M. W. Pospieszalski: "On the Measurement of Noise Parameters of Microwave Two-Ports," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. MTT-34, No. 4, pp. 456-458, April 1986.

- [13] J. M. Rollett: "Stability and Power-Gain Invariants of Linear Twoports," IRE Trans. Circuit Theory, Vol. 9, pp. 29-32, 1962.
- [14] M. D. Deshpande, B. N. Das and G. S. Sanyal: "Analysis of an End Launcher for an X-Band Rectangular Waveguide," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. Vol. MTT-27, No. 8, pp. 731-735, August 1979.
- [15] J. D. Kraus: Radio Astronomy, 2nd ed., Cygnus-Quasar Books, 1986.
- [16] J. D. Gallego and M. W. Pospieszalski: "Accuracy of Noise Temperature Measurement of Cryogenic Amplifiers," National Radio Astronomy Observatory Electronics Division Internal Report, No. 285, April 1990.
- [17] K. Kurokawa: "Power Waves and the Scattering Matrix," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-13, pp. 194-202, March 1965.

既 刊 行 物

- 第 91 号 (1997年 2月) S-520-19号機搭載 Helium Emission Monitor によるプラズマ圏
ヘリウムイオンの光学観測に関する研究
- 第 92 号 (1997年 3月) X線天文衛星「あすか」による活動銀河核におけるソフトX線
エクセス
- 第 93 号 (1997年 3月) 「さきがけ」で観測された磁場データの一次処理法：惑星間空間
磁場と磁気バイアス・磁気オフセットの分離
- 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 3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 3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

宇宙科学研究所報告

第 111 号

2000年10月

発行者 宇宙科学研究所
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台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

AS