

# 不要干渉波を抑圧できる電波望遠鏡向け 小型マルチバンドHTS受信機

Compact Multiband High-Temperature Superconducting Receiver for Radio Telescopes Capable of Reducing Radio-Frequency Interference

河口 民雄 KAWAGUCHI Tamio 坪崎 和広 TSUBOSAKI Kazuhiro  
上出 弘隆 KAMIDE Hiroataka 朝倉 太郎 ASAKURA Taro

電波天文学の分野では、天体から地上に届く微弱な電波を様々な周波数帯で観測し、宇宙で起こる様々な自然現象を解明している。しかし、スマートフォンをはじめとする、無線端末の急速な増加に伴って、限られた周波数資源の枯渇が問題化しており、電波望遠鏡を含む無線システム間での共存が求められている。

このような状況の中で、東芝グループは、電波望遠鏡向けに、天文の観測に用いられる複数の周波数帯を一度に受信してほかの無線システムからの干渉波は抑圧できる、高温超伝導体 (HTS) を用いた小型マルチバンド HTS 受信機を開発した。この受信機は、HTS の低損失な特性を用いたマルチバンドフィルタと、熱雑音を低減するため液体窒素温度まで冷却した低雑音増幅器 (LNA) から構成され、小型化したことで小口径から大口径までの電波望遠鏡に設置できる。試作機による評価の結果、干渉波の周波数帯を 40 dB 以上減衰させるとともに、雑音指数が 0.4 dB 以下と高感度な受信特性の実現を確認した。

The objective of radio astronomy is to elucidate astronomical phenomena through the utilization of radio telescopes that can detect very weak radio wave signals of various frequency bands emitted by celestial bodies. However, with frequency resources becoming depleted due to the rapid increase in wireless communication terminals including smartphones in recent years, it has become necessary to coexist with these wireless systems in utilizing the limited frequency bands available.

In response to this situation, the Toshiba Group has developed a compact multiband high-temperature superconductor (HTS) receiver for radio telescopes with diameters ranging from small to large that can simultaneously observe multiple frequency bands as well as suppress radio-frequency interference (RFI) caused by other wireless systems by applying a low-loss multiband HTS filter and a cryogenic low-noise amplifier (LNA) cooled to liquid nitrogen temperature. Experiments on a prototype quad-band HTS receiver have verified that it realizes high sensitivity, with a reduction in RFI of more than 40 dB and a noise figure (NF) of less than 0.4 dB.

## 1. まえがき

宇宙空間にある天体は、その温度に対応した電磁波や、天体を構成する分子・原子の種類に応じたスペクトル線電波を放出している。電波天文学では、これらの天体からの微弱な電波を電波望遠鏡で観測し、宇宙の性質や成り立ちについて解析している。このため、電波天文学の分野では、様々な周波数帯の電波を観測したいという要求がある。

一方、スマートフォンや携帯電話をはじめとする移動体通信端末の爆発的な増加に対し、一部の周波数資源は枯渇しつつあり、これらの周波数を用いる様々な無線システムは互いに共存していくことが求められる。

郊外に設置された電波望遠鏡の周囲で、500～3,000 MHz 帯の電波環境の測定結果を、図1に示す<sup>(1)</sup>。この帯域は、1,400 MHz 帯に水素原子スペクトル、1,600 MHz 帯に OH (水酸基) スペクトルが存在するため、電波天文学での重

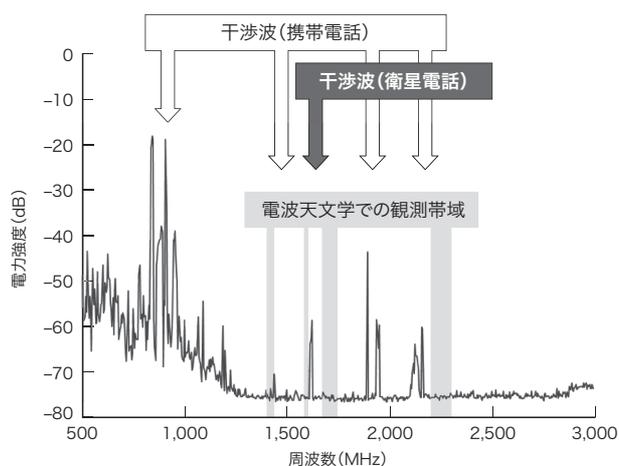


図1. 電波望遠鏡の観測帯域付近での電波環境  
500～2,500 MHz 付近は、電波天文学での観測帯域と携帯電話や衛星電波などの干渉波の帯域が、近接して存在している。  
Effects of RFI on radio telescope observation

要な観測周波数帯の一つとして知られている。図中の観測スペクトルのピークは、干渉波信号を示しており、携帯電話や衛星電話からの強い干渉波信号が周囲に存在していることが分かる。この干渉波は、電波天文学の観測帯域の間にも存在しているため、観測に影響を与えることがある。

そこで、干渉波の信号を除去して電波天文学の観測に必要な周波数帯だけを受信し、雑音をできるだけ小さくした状態で信号を増幅できる、小型マルチバンドHTS受信機を開発した。ここでは、その詳細について述べる。

## 2. 電波望遠鏡の受信系

電波望遠鏡の受信系について、ブロック図の一例を図2に示す。パラボラアンテナで集められた電波は、フィードアンテナを通して受信機に入力される。

アンテナには、天体からの信号以外に干渉波となる信号も入力される。そこで、受信機の前段部分に、必要な周波数帯だけを通過させ不要な周波数を遮断するマルチバンドHTSフィルターを搭載している。このフィルターは、HTSのYBCO（イットリウムバリウム銅酸化物）薄膜を用いて構成される。YBCO薄膜は、液体窒素温度（ $-196^{\circ}\text{C}$ ）程度に冷却することで、銅などの従来金属より3桁以上高周波損失が低い、非常に低損失な物性を示す<sup>2)</sup>。

次に、フィルター通過後の信号は、極低温の冷却LNAと2段目のLNAで、A/D（アナログ/デジタル）コンバーターに最適な入力電力まで増幅される。ここで、初段の冷却LNAは、液体窒素温度まで冷却して熱雑音の影響を低減させている。これにより、信号増幅の際に付加される雑音量を常温動作時よりも低減できるため、SN比（信号対雑音

比）の劣化を抑えた信号増幅ができる。これは、SN比が悪い微弱な信号を扱う際に重要な技術である。

増幅された信号は、A/Dコンバーターに入力されデジタル信号へと変換される。ここで、A/Dコンバーターは、水素メーザーを用いた原子時計からの信号も同時受信しており、観測データと正確な時刻データを記録装置やHDD（ハードディスクドライブ）に記録する。記録されたデータは、ほかの電波望遠鏡で同時刻に記録されたデータと一緒にスーパーコンピューターによる相関処理を行うことで、疑似的に望遠鏡間の距離に相当する大きな電波望遠鏡を構成し、微弱な電波を発する天体の画像などを合成できる。

### 2.1 マルチバンドHTSフィルターの仕様

フィルターのスペクトルマスクを図3に示す。受信機で受信する帯域は、2,500 MHz以下の周波数帯では、主に四つのバンドが観測に用いられる。このバンド間では、図1で示したように、携帯電話や衛星電話などの運用が行われており、それらの信号は干渉波として観測されるため、フィルターをマルチバンド化することで観測に必要な周波数帯だけを受信できるようにする。このフィルターの仕様は、損失0.2 dB以下（信号低減率5%以下）で、干渉波の入る周波数での減衰量は30 dB以上（干渉波低減量1/1000以下）である。また、2番目と3番目のバンド間には衛星電話からの干渉波信号が入るため、観測帯域端からの急峻（きゆうしゅん）な減衰特性が要求される。

### 2.2 マルチバンドHTSフィルターの設計・評価

図4にマルチバンドフィルターの回路トポロジーを示す。ここで、図中の○は共振素子を、実線は電磁界結合を示している。二つのフィルターを組み合わせることで、マルチバン

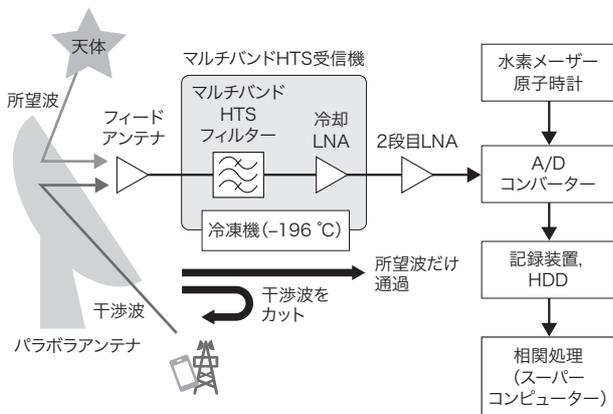


図2. 電波望遠鏡の受信系ブロック図

受信回路で付加される干渉波を低減するため、回路は極低温（ $-196^{\circ}\text{C}$ ）に冷却され、HTSを用いた低損失マルチバンドフィルターを用いる。

Block diagram of receiver for radio telescopes

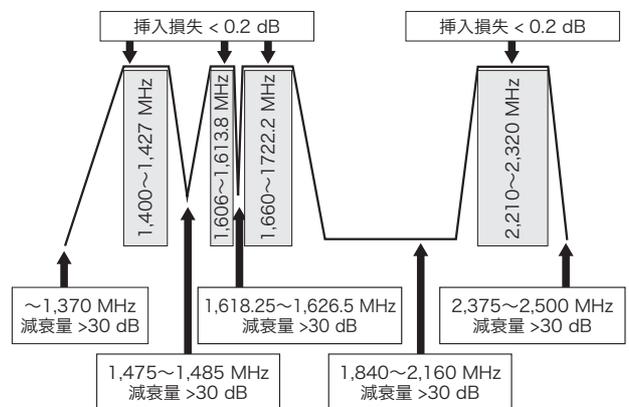


図3. マルチバンドフィルターに求められるスペクトルマスク

観測帯域は、今回ターゲットとする周波数帯で4帯域あるため、帯域間の干渉波を低減するフィルターのマルチバンド化が求められる。

Spectrum mask requirements for multiband filters

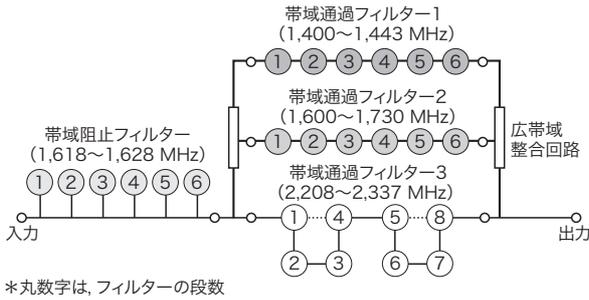


図4. マルチバンドフィルターの回路トポロジー

衛星電話などからの干渉波は、急峻な帯域阻止フィルターでカットし、三つの帯域通過フィルターを並列合成することで4帯域を形成する。

Circuit topology of multiband filters

ド化を行っている<sup>(3)</sup>。

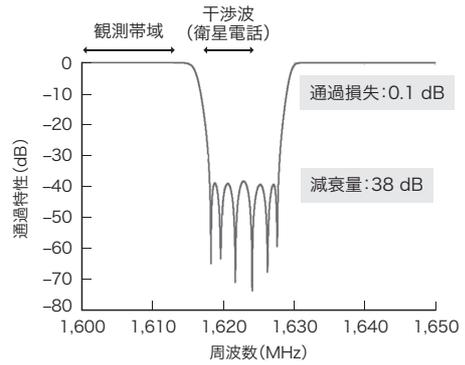
一つは、帯域阻止フィルターである。共振器を伝送路と結合させ、その共振周波数である信号だけを反射させることで、特定の周波数だけを反射させる特性が実現できる。今回は、衛星電話の周波数帯を急峻に減衰させるため、狭帯域な6段の帯域阻止フィルターを用いた。

もう一つのフィルターは、3帯域の帯域通過フィルターである。三つの異なる帯域を持つ帯域通過フィルターを、広帯域に整合させる整合素子で並列合成する構造となっており、1,400 MHz帯、1,600 MHz帯、2,200 MHz帯の三つの帯域通過フィルターを合成して3帯域を実現している。ここで、1,400 MHz帯と1,600 MHz帯は、6段チェビシェフ型フィルターを用い、2,200 MHz帯は、低域側に携帯電話の周波数が近接しているため、帯域両端に減衰極を持たせることで急峻性を備えた8段疑似楕円(だえん)関数型フィルターを用いた。

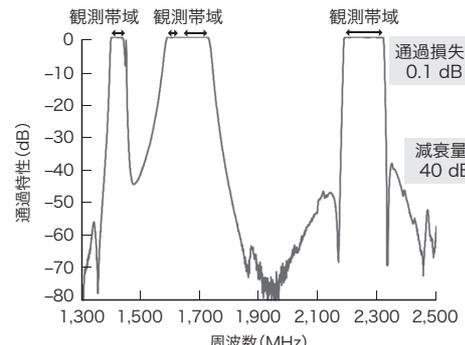
次に、YBCO薄膜を用いたHTSフィルターを試作し、 $-196^{\circ}\text{C}$ に冷却してその特性を評価した。図5(a), (b)に帯域阻止フィルターと3帯域通過フィルターの通過特性の測定結果を示す。帯域阻止フィルターは、挿入損失が0.1 dB以下で、阻止域の減衰量が38 dB以上となり、隣接する観測周波数は低損失で通過させ、衛星電話の周波数だけを急峻に減衰させる特性を実現した。3帯域通過フィルターは、観測に必要な3帯域の信号を挿入損失0.1 dB以下の低損失で通過させ、携帯電話などそのほかの周波数帯域の干渉波を40 dB以上減衰させる特性を実現した。これにより、いずれも目標とする仕様を満たす特性が実現できることを確認した<sup>(4)</sup>。

### 3. マルチバンドHTS受信機

2章で試作した二つのHTSフィルターと冷却LNAを冷凍機に実装したマルチバンドHTS受信機の外観を図6に示す。



(a) 帯域阻止フィルターの特性



(b) 3帯域通過フィルターの特性

図5. 各フィルターの $-196^{\circ}\text{C}$ における測定結果

試作した帯域阻止フィルターと3帯域通過フィルターを、 $-196^{\circ}\text{C}$ に冷却して評価した。

Results of frequency response measurements of prototype band-rejection and bandpass filters at  $-196^{\circ}\text{C}$

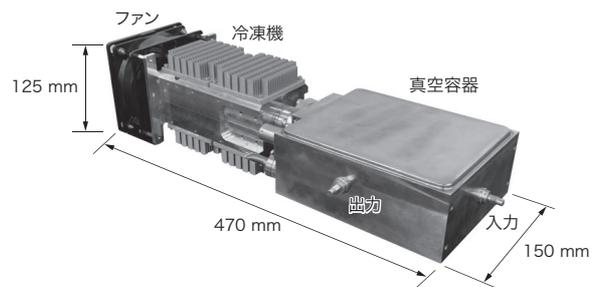


図6. マルチバンドHTS受信機

試作したマルチバンドHTS受信機は、二つのHTSフィルター、冷却LNA、冷凍機、温調器、電源装置、及び廃熱系で構成される。

Newly developed multiband HTS receiver

外形寸法が150 (幅) × 470 (奥行き) × 125 (高さ) mmで、質量15 kg、容量8.8 Lの小型な形状で冷却受信機を実現している。冷凍にはスターリング冷凍機を用いており、最大負荷時の消費電力は約100 Wである。また、回路部は、真空容器内に収められて外部から真空断熱されており、各回路を $-196^{\circ}\text{C}$ に冷却したまま長期間動作ができる構成と

なっている。

図7に、この受信機の特徴を示す。実線がフィルターの通過特性、破線が雑音指数の測定結果である。この結果、各干渉波の信号を40 dB以上減衰させ、観測に必要な四つの帯域だけを受信するマルチバンド特性を示した。また、受信機の感度を示す雑音指数は、観測に必要な帯域で0.4 dB程度であり、非常に低雑音かつ高感度な受信機特性を実現した。更に、この受信機は小型・軽量なので、電波望遠鏡のフィードアンテナに直接取り付けられ、従来では難しかった小型電波望遠鏡の高感度化が実現できる。

このマルチバンドHTS受信機は、図8に示すように、タイに設置されている4.5 m電波望遠鏡に搭載して試験観測を

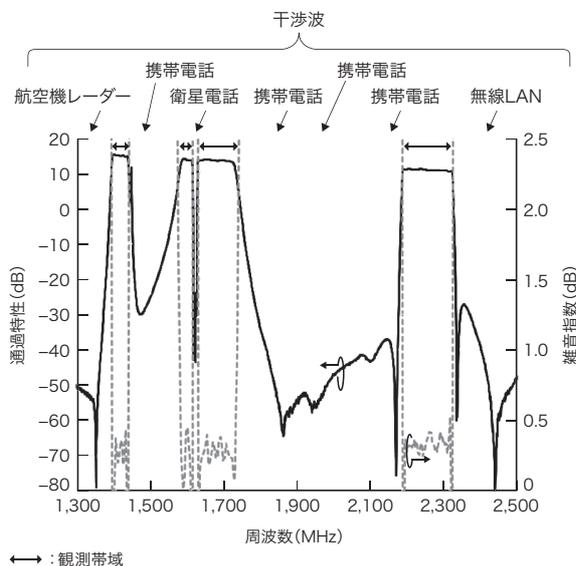


図7. マルチバンドHTS受信機の特徴

受信機の利得は10～15 dBで、雑音指数は0.4 dB以下を実現している。

Frequency responses of multiband HTS receiver



図8. 4.5 m電波望遠鏡に設置したマルチバンドHTS受信機

屋外で使えるように耐候性を考慮した容器に収められ、タイの4.5 m電波望遠鏡に設置して観測試験を実施している。

Multiband HTS receiver installed on 4.5 m radio telescope in Thailand

実施し、周囲に携帯電話などの干渉源が存在する状況でも有効な観測ができることを実証した。

#### 4. あとがき

電波天文学分野での用途向けに、干渉波除去用マルチバンドHTSフィルターを開発し、各帯域で挿入損失が0.1 dB以下で、阻止域減衰量が40 dB以上となる低損失なマルチバンドフィルター特性を実現した。また、このフィルターを用いたマルチバンドHTS受信機を開発し、小型電波望遠鏡に搭載可能な大ききで、雑音指数0.4 dB以下の高感度な受信特性を実現し、受信感度の低下を最小限に抑えた干渉波除去ができることを確認した。

今後、今回開発した技術の電波天文学以外の分野への応用も図っていく。

#### 文献

- (1) Kayano, H. "Cryogenic Receiver with Superconducting Filter". 2018 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT 2018). Melbourne, Australia, 2018-08, IEEE. 2018, p.100-102.
- (2) Hashimoto, T.; Kobayashi, Y. Frequency Dependence Measurements of Surface Resistance of Superconductors Using Four Modes in a Sapphire Rod Resonator. IEICE Trans. Electron. 2003, **E86-C**, 8, p.1721-1728.
- (3) Cameron, R. J. et al. Microwave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design, and Applications. John Wiley & Sons, 2007, 804p.
- (4) Kawaguchi, T. et al. "HTS Quad-band High-sensitivity Receiver for a 4.5-m Radio Telescope". 49th European Microwave Conference (EuMC 2019). Paris, France, 2019-10, IEEE. 2019, p.248-251.



河川 民雄 KAWAGUCHI Tamio

研究開発本部 研究開発センター  
ワイヤレスシステムラボラトリー  
電子情報通信学会会員  
Wireless System Lab.



坪崎 和広 TSUBOSAKI Kazuhiro

東芝ホクト電子(株)  
新事業推進部  
Toshiba Hokuto Electronics Corp.



上出 弘隆 KAMIDE Hiroataka

東芝ホクト電子(株)  
新事業推進部  
Toshiba Hokuto Electronics Corp.



朝倉 太郎 ASAKURA Taro

東芝ホクト電子(株)  
新事業推進部  
エレクトロニクス実装学会会員  
Toshiba Hokuto Electronics Corp.