

# フェーズドアレイアンテナの高感度化を実現する超伝導フィルタを用いた受信サブアレイユニット

Receiving Subarray Unit with Superconducting Filters to Improve Sensitivity of Phased-Array Antennas

塩川 教次

河口 民雄

篠永 充良

■SHIOKAWA Noritsugu

■KAWAGUCHI Tamio

■SHINONAGA Mitsuyoshi

通信やレーダなど様々な分野で利用されているマイクロ波帯のフェーズドアレイアンテナは、近年、通信容量の増大や省電力化あるいはレーダ探知距離の増大を目指して、いっそうの高感度化が求められている。

東芝は、超伝導フィルタと低雑音増幅器を $-200^{\circ}\text{C}$ 付近の極低温で動作させることで、損失及び熱雑音を低減し微弱な信号を検出できる極低温受信モジュールと、極低温状態を維持するために外部からの熱を遮断しつつ、同時にマイクロ波を低損失で伝達できる断熱マイクロ波インタフェースを開発した。これらで構成された受信サブアレイユニットの試作品により機能検証を行った結果、フェーズドアレイアンテナの高感度化が実現できることを確認した。

Microwave phased-array antennas, which are used in various fields including wireless communication and radar systems, have been required to provide higher sensitivity in recent years in order to enhance communication capabilities, reduce the power consumption of transmitters, and extend the detection range of radar systems.

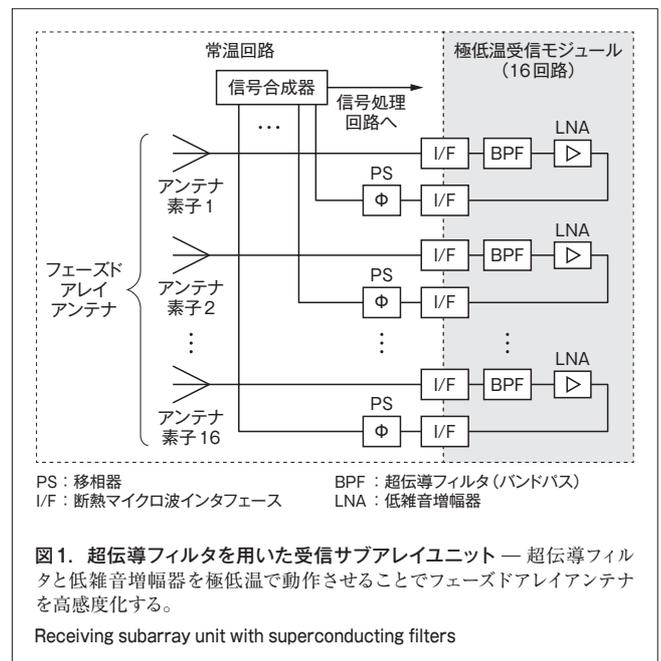
To fulfill these requirements, Toshiba has developed a receiver module capable of detecting a weak signal amidst thermal noise by means of superconducting filters and low-noise amplifiers operated at a cryogenic temperature of around  $-200^{\circ}\text{C}$ , as well as a contactless microwave interface with both thermal insulation and low-loss microwave propagation properties in order to maintain the cryogenic temperature. Experiments on a prototype receiving subarray unit have confirmed that it is possible to realize a phased-array antenna with higher sensitivity using this technology.

## 1 まえがき

フェーズドアレイアンテナは、小さなアンテナ素子を平面上に複数配列し、各アンテナ素子の位相を電子的に制御するアンテナである。指向性の高いマイクロ波ビームを高速で走査できることから、衛星通信や気象レーダなど広い分野に応用されつつある。このような応用で性能向上を図るにはより微弱なマイクロ波信号を検出することが必要であり、近年、アンテナからの信号を受信するマイクロ波受信機の高感度化がいっそう求められている。

東芝は、電気抵抗の極めて低い超伝導フィルタ<sup>(1)</sup>を用いた損失の低減、及び低雑音増幅器を極低温で動作させることによる熱雑音の低減という二つのアプローチによって、高感度な極低温受信モジュールを開発した。一方、この受信モジュールをフェーズドアレイアンテナに適用するには、常温環境に設置された複数のアンテナ素子からの熱流入を抑制して極低温状態を維持する必要がある。そこで当社は、熱流入の抑制と低損失なマイクロ波の伝送を両立させる断熱マイクロ波インタフェースも同時に開発した。

更に、フェーズドアレイアンテナの高感度化を実現するキ一部品として、図1に示す受信サブアレイユニットを試作し評価した。試作品は、アレイ配置された16個のアンテナ素子と極低温受信モジュールとを断熱マイクロ波インタフェースを介して



接続した、3 GHz帯の機能検証用ユニットである。この極低温受信モジュールを冷凍機で $-200^{\circ}\text{C}$ 付近まで冷却して特性測定を行い、高感度なフェーズドアレイアンテナとしての動作を実証することができた。

ここでは、極低温受信モジュールの特長、断熱マイクロ波

インタフェースの特長と、受信サブアレイユニットの試作と評価結果について述べる。

## 2 極低温受信モジュールの特長

マイクロ波受信機の感度は雑音温度と呼ばれる指標で表され、雑音温度が低いほど高感度な受信機である。受信機全体の雑音温度  $T_S$  (K) は、受動素子（フィルタや伝送路）の損失に起因する雑音温度  $T_R$  (K)、受動素子の損失  $L_R$  (dB)、及び低雑音増幅器の熱雑音に起因する雑音温度  $T_E$  (K) を用いて式(1)で表される。

$$T_S = T_R + 10^{L_R/10} \times T_E \quad (1)$$

超伝導体を転移温度以下に冷却することで直流抵抗がゼロになることが知られているが、マイクロ波領域においても、銅などの金属に比べて2~3桁低い抵抗値を示す。このために、従来のフィルタに替えて超伝導フィルタを極低温環境下で用いることで、 $T_R$  及び  $L_R$  を低減できる。また一般に、低雑音増幅器は環境温度が低いほど内部で発生する熱雑音を低減できることから、超伝導フィルタのために必要な極低温環境下に低雑音増幅器を置けば、 $T_R$ 、 $L_R$  に加えて  $T_E$  も低減でき、 $T_S$  のいっそうの低減が可能である。

一例として3 GHz帯を仮定し、超伝導フィルタを用いる極低温受信モジュールの各雑音温度を見積もった結果と従来設計の典型例との比較を表1に示す。超伝導フィルタによる損失低減と、低雑音増幅器の極低温動作による熱雑音低減により、 $T_S$  は従来設計の566 Kから44 Kまで低減され、これにより感度が飛躍的に向上することがわかる。

表1. 雑音温度の比較例

Comparison of noise temperatures of conventional and newly developed receiving subarray units

項目		極低温受信モジュールの一例	従来設計の典型例
$T_R$	(K)	6	139
$L_R$	(dB)	0.3	1.7
$T_E$	(K)	35	289
$T_S$	(K)	44	566

## 3 断熱マイクロ波インタフェースの特長

極低温受信モジュールは-200℃付近の温度で使用されるが、冷却には液体窒素などの冷却剤ではなく、家庭用冷蔵庫と同じように交流100Vで動作する冷凍機を用いる。また、極低温受信モジュールは真空容器内に配置され外部から断熱される一方で、アンテナ素子は真空容器外の常温環境に配置されるため、常温のアンテナ素子と極低温受信モジュールとを

つなぐマイクロ波インタフェースを介した熱流入が問題になる。このインタフェースから冷凍機の冷凍能力を超える熱流入があると十分な冷却ができなくなるため、フェーズドアレイアンテナのように多数のアンテナ素子を持つシステムでは特に深刻な問題である。

受信機の高感度化にとって伝送路は低損失である必要があるが、伝送損失と断熱性はトレードオフの関係にあり、伝送損失が低いほど断熱性も低い。一般的なマイクロ波インタフェースである同軸ケーブルや導波管では、今回のシステムに必要な伝送損失と断熱性を両立できなかった。

この問題を解決するために、熱伝導による熱の流入がない非接触型のマイクロ波インタフェースを開発した。具体的な構造としては、分割導波管型<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>と共振器結合型<sup>(4)</sup>の2方式を設計、試作し比較検討した。

### 3.1 分割導波管型

分割導波管型は、常温側と極低温側との間にギャップを設け、導波管を二つに分割したインタフェースである。その3次元構造と断面を図2に示す。導波管内部に誘電体を装荷して小型化することで、フェーズドアレイアンテナのアンテナ素子間隔に適合させた。また、ギャップによるマイクロ波の漏れを防ぐために、1/4波長の長さの銅壁を付加しチョーク構造を形成した。極低温側には、超伝導フィルタに信号を出力するため導波管からマイクロストリップ線路への変換構造を設けている。

この分割導波管型では、常温側から極低温側への熱伝導は非接触であることからゼロである。熱流入の支配的な要因は、ギャップを介して対向する誘電体間の熱輻射（ふくしゃ）によるものであり、計算では35 mWである。また、マイクロ波の伝送損失の測定結果は、3 GHzにおいて0.4 dBであった。熱流入量は同程度の伝送損失を持つ一般的な同軸ケーブルと比べ1/10程度であり、低い伝送損失と断熱性を両立させたマイクロ波インタフェースとなっている。

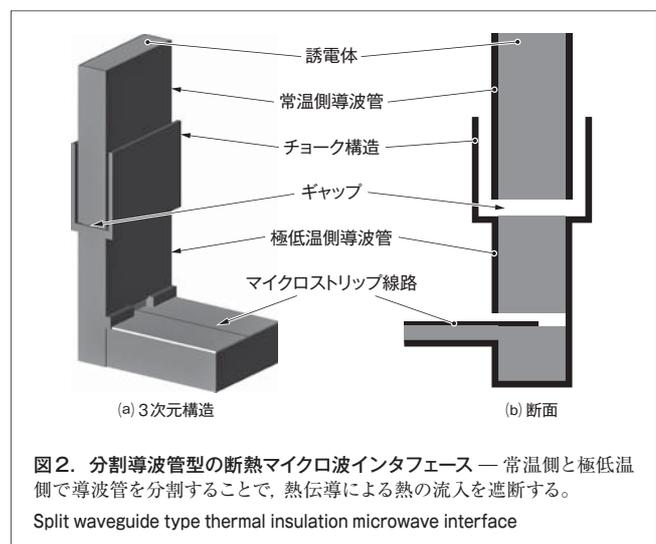


図2. 分割導波管型の断熱マイクロ波インタフェース — 常温側と極低温側で導波管を分割することで、熱伝導による熱の流入を遮断する。  
Split waveguide type thermal insulation microwave interface

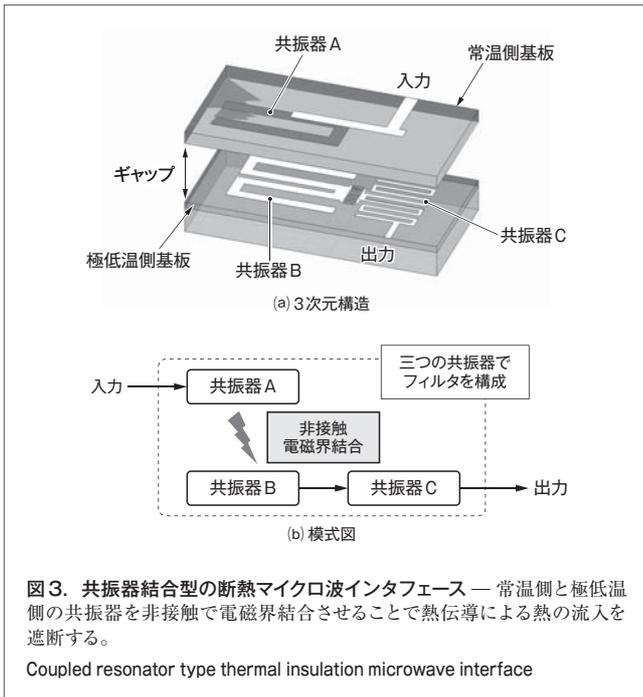


図3. 共振器結合型の断熱マイクロ波インタフェース — 常温側と極低温側の共振器を非接触で電磁界結合させることで熱伝導による熱の流入を遮断する。  
Coupled resonator type thermal insulation microwave interface

### 3.2 共振器結合型

共振器結合型は、常温側基板に設けた共振器と極低温側基板に設けた共振器とを、ギャップを介して電磁界結合させたインタフェースである。その3次元構造と模式図を図3に示す。(a)では、構造を見やすくするために共振器間のギャップを実際の比率よりも縦方向に拡大している。共振器Aは、常温側基板の裏面のグラウンドの一部をくり抜いたスロット共振器であり、金属皮膜面の割合を増やすことで熱放射による極低温側基板への熱流入を低減する効果がある。共振器B, Cは、超伝導薄膜により形成されたマイクロストリップ共振器であり、損失の低減に加えて超伝導フィルタとの一体化も実現した。また、共振器A, B, 及びCで3段のバンドパスフィルタを構成している。

この共振器結合型でも、常温側から極低温側への熱伝導は非接触であることからゼロである。支配的な熱流入である熱放射は、計算では10 mWと分割導波管型の1/3以下である。また、マイクロ波の伝送損失の測定結果は、3 GHzにおいて0.2 dBと分割導波管型の1/2である。分割導波管型よりも更に低い伝送損失と断熱性を両立させたインタフェースであるとともに、超伝導フィルタとの一体化による面積の縮小、及び導波管に替えて平面回路を用いたことによる低背化による受信モジュールの小型化も実現している。

### 3.3 従来のマイクロ波インタフェースとの性能比較

前述の分割導波管型と共振器結合型の伝送損失及び熱流入量を、従来のマイクロ波インタフェースである同軸ケーブルや導波管と比較した結果を図4に示す。ここで、横軸の熱流入量は直径2.2 mmの銅の同軸ケーブルを1としたときの相対

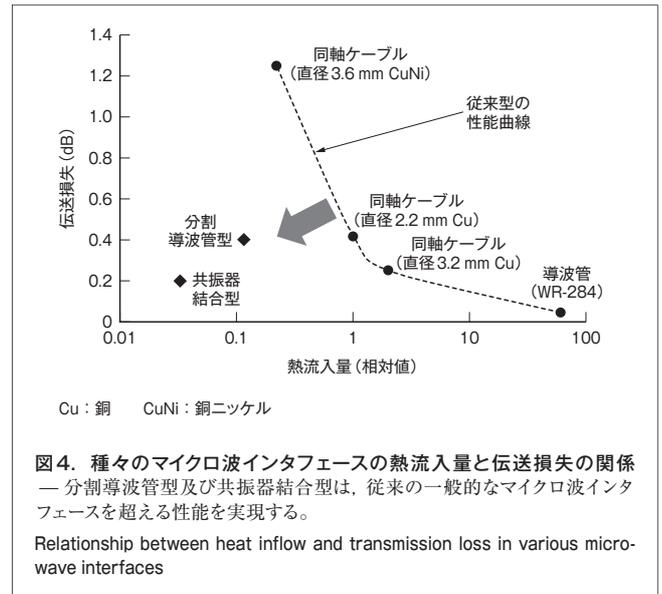


図4. 種々のマイクロ波インタフェースの熱流入量と伝送損失の関係 — 分割導波管型及び共振器結合型は、従来の一般的なマイクロ波インタフェースを超える性能を実現する。

Relationship between heat inflow and transmission loss in various microwave interfaces

的な計算値で、縦軸の伝送損失は測定値である。分割導波管型及び共振器結合型ともに、従来のマイクロ波インタフェースに比べ優れた性能を持つことがわかる。

## 4 受信サブアレイユニットの試作と評価

開発した極低温受信モジュールと断熱マイクロ波インタフェースを用いて、フェーズドアレイアンテナとして高感度化の機能検証を行うため、3 GHz帯の受信サブアレイユニットを試作した(図5)。ここでは、より優れた性能を持つ共振器結合型の断熱マイクロ波インタフェースを用いた場合について述べる。

受信サブアレイユニットの最上面には4×4素子のアレイ配置で16個のアンテナが配置されている。その直下にそれぞれ極低温受信モジュールが真空容器内で断熱されて配置されており、これらを真空容器下部の冷凍機によって-200℃付近まで冷却して動作させる。

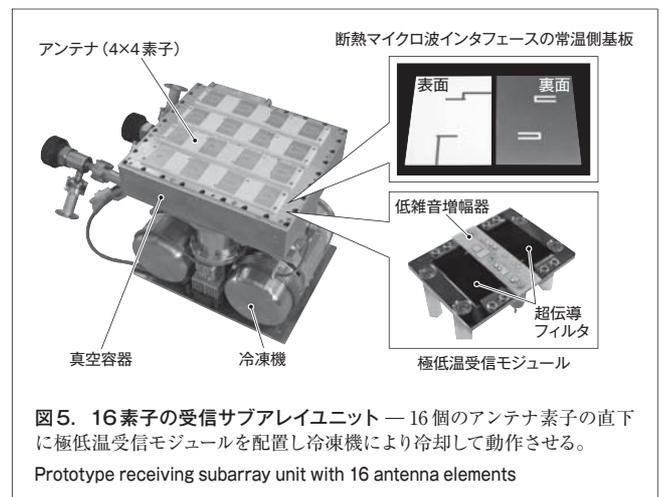


図5. 16素子の受信サブアレイユニット — 16個のアンテナ素子の直下に極低温受信モジュールを配置し冷凍機により冷却して動作させる。  
Prototype receiving subarray unit with 16 antenna elements

極低温受信モジュールは、中央の低雑音増幅器とその両側に配置された超伝導フィルタから成る。超伝導フィルタは断熱マイクロ波インタフェースの極低温側基板も兼ねており、真空容器の上面に配置した常温側基板と対を成して断熱マイクロ波インタフェースを構成する。この構成では、各受信モジュールの入力側だけでなく出力側にも断熱インタフェースを設けることで、冷凍機の負荷を極力下げている。

受信サブアレイユニットを構成し、16個のアンテナ後段にある入力側断熱マイクロ波インタフェース、低雑音増幅器、及び出力側マイクロ波インタフェースから成る受信部の通過特性及び雑音温度の代表的な測定結果を図6に示す。雑音温度は、超伝導フィルタの通過帯域内で40 K以下に抑えられており、表1で見積もった雑音温度の低減効果が実機により確認できた。

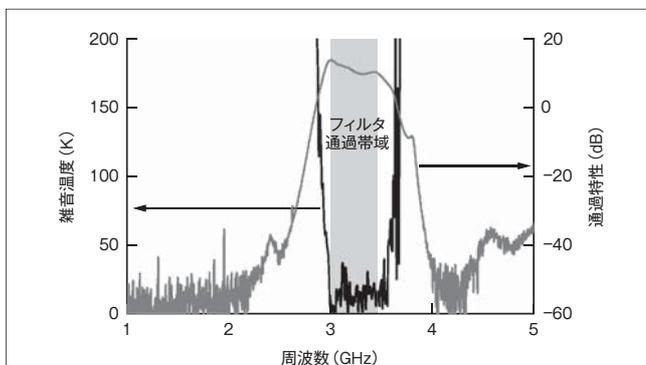


図6. 受信サブアレイユニットの雑音温度と通過特性 — 超伝導フィルタの通過帯域内において雑音温度が40 K以下に抑えられている。

Noise temperature and transmission characteristics of prototype receiving subarray unit

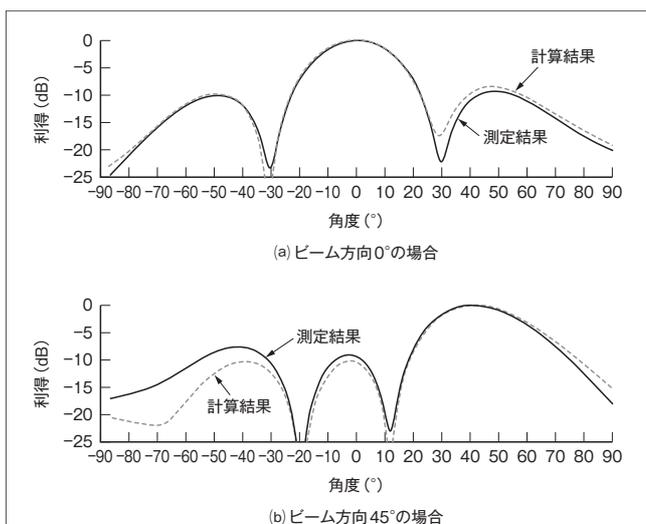


図7. アンテナパターン測定結果 — ビーム方向が0°及び45°のどちらの場合も計算結果とよく一致する測定結果が得られた。

Results of antenna pattern measurements

次に、各アンテナ素子の位相を電子的に制御することで、受信サブアレイユニットのアンテナパターンを測定した結果を図7に示す。ここでは代表的な例としてビーム方向が0°と45°の二つの場合を示したが、どちらの場合も計算結果とよく一致する測定結果が得られている。これにより、極低温受信モジュールにより高感度化された受信サブアレイユニットが、フェーズドアレイアンテナの特徴である位相制御によるビーム走査を問題なく実現できることを確認した。

## 5 あとがき

マイクロ波受信機の高感度化を実現するため、超伝導フィルタによる損失の低減と、低雑音増幅器の極低温環境での動作による熱雑音の低減により、高感度な極低温受信モジュールを開発した。この技術をフェーズドアレイアンテナに適用する際に問題となる熱流入を抑制するために、新たに開発した断熱マイクロ波インタフェースを用いて受信サブアレイユニットを試作し、フェーズドアレイアンテナとしての動作を実証した。

今後は通信やレーダなどの分野への適用を目指して、より大規模なシステムに対応できるよう更なる技術開発を進めていく。

## 文献

- (1) 河口民雄 他. 周波数資源を有効に利用できる9 GHz帯気象レーダ向け受信用超伝導フィルタ. 東芝レビュー. 66, 12, 2011, p.44 - 47.
- (2) Kawaguchi, T. et al. "High-sensitivity HTS Receiver Module with Hermetic Thermal Insulation Waveguides". Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. Nuremberg, Germany, 2013-10, European Microwave Association, IEEE, 2013, p.955 - 958.
- (3) Kumamoto, T. et al. "High-Sensitivity Receiving Sub-array Module with HTS Filters for an Active Phased Array Antenna". 2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham, MA, USA, 2013-10, IEEE, 2013, p. 341 - 345.
- (4) Kayano, H. et al. "Low-Profile High-Sensitivity Sub-array Module with HTS Filters for an Active Phased Array Antenna". 2014 IEEE Radar Conference. Cincinnati, OH, USA, 2014-05, IEEE, 2014, p.118 - 121.



塩川 教次 SHIOKAWA Noritsugu

研究開発センター 機能材料ラボラトリー主任研究員。  
超伝導フィルタに関する研究・開発に従事。  
Functional Materials Lab.



河口 民雄 KAWAGUCHI Tamio

研究開発センター 機能材料ラボラトリー研究主務。  
超伝導フィルタに関する研究・開発に従事。  
Functional Materials Lab.



篠永 充良 SHINONAGA Mitsuyoshi, D.Eng.

社会インフラシステム社 電波システム事業部技監, 博士 (情報理工学)。レーダシステム及びレーダ信号処理の開発に従事。  
電子情報通信学会会員。  
Defense & Electronic Systems Div.