

# 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

Superconducting Receiving Filter for 9 GHz-Band Weather Radars  
Contributing to Efficient Use of Frequency Resources

河口 民雄                      塩川 教次                      加屋野 博幸

■ KAWAGUCHI Tamio                      ■ SHIOKAWA Noritsugu                      ■ KAYANO Hiroyuki

近年、局地的集中豪雨などによる自然災害が増大しており、降雨状況を速やかに観測できる気象レーダの重要性が増している。この自然災害の観測ネットワークを全国に構築するため、気象レーダの設置局数は最近増加傾向にあるが、これに伴いレーダで使用する9 GHz帯の周波数資源は枯渇しつつある。

東芝は、9 GHz帯気象レーダの割当てチャンネル(CH)間隔を狭帯域化できる、高温超伝導体を用いた受信用フィルタを開発した。このフィルタを用いることで、従来に比べ多くのCHを割当て周波数に配置でき、周波数資源を有効に利用できる。

With the increase in natural disasters caused by local torrential downpours in recent years, weather radars have become essential for speedy and precise precipitation forecasts. The number of weather radar sites in Japan is increasing, reflecting the need for the introduction of a nationwide natural disaster network. However, the frequencies that can be assigned to 9 GHz-band weather radars are becoming depleted due to the increase in the number of installations.

Toshiba has developed a high-temperature superconducting (HTS) receiving filter with steep and narrow bandwidth characteristics for 9 GHz-band weather radars, which makes it possible to allocate more channels in the 9 GHz radar band compared with conventional products and contributes to the efficient use of limited frequency resources.

## 1 まえがき

近年、ゲリラ豪雨と呼ばれる突発的な局地的集中豪雨に伴う河川の急な増水などによる、気象災害が大きな問題となっている。そこで、これらの気象現象を迅速に観測するため、マルチパラメータレーダと呼ばれる高解像度気象レーダが増設され、全国に監視網が敷かれつつある<sup>(1), (2)</sup>。一方、高速大容量無線通信システムを用いた各種サービスの普及に伴い、周波数資源の枯渇が社会的な問題となっている。このため増設傾向にある気象レーダにおいても、周波数利用効率を向上させる技術や他の信号との干渉問題を回避する技術がますます重要になってきている。

9 GHz帯気象レーダにおけるチャンネル(CH)配置の模式図を図1(a)に示す。各CHは5 MHz間隔で配置され、送信スペクトル幅は1.2 MHzである。このCH配置において自CHだけを切り出し他CHからの干渉を避けるためには、図1(b)の実線で示す狭帯域なフィルタ特性が必要となる。しかし従来のフィルタは、一点鎖線で示すように損失の影響により狭帯域性を実現できず、使用するCH間隔を狭められない問題があった。

この問題を解決するため東芝は、高温超伝導体を持つ非常に低損失な高周波抵抗の特性を生かし、割当てCH間隔を狭帯域化できる9 GHz帯気象レーダ向け受信用超伝導フィルタを開発した。これにより使用するCH間隔を狭められるため周波数利用効率上がり、周波数資源の有効利用が期待できる。

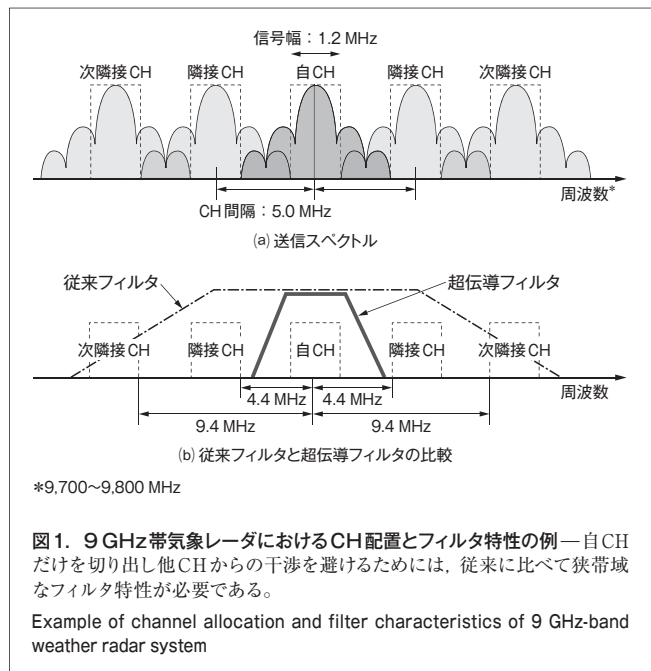
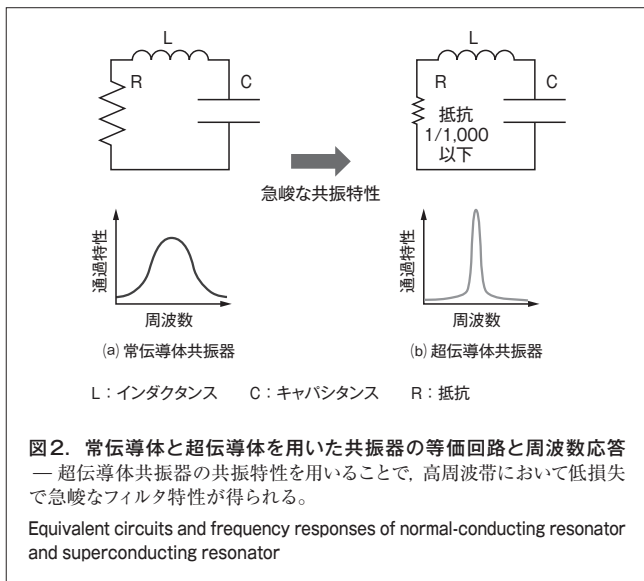


図1. 9 GHz帯気象レーダにおけるCH配置とフィルタ特性の例—自CHだけを切り出し他CHからの干渉を避けるためには、従来に比べて狭帯域なフィルタ特性が必要である。  
Example of channel allocation and filter characteristics of 9 GHz-band weather radar system

## 2 超伝導フィルタの特長

銅などに代表される常伝導体と超伝導体それぞれを用いた

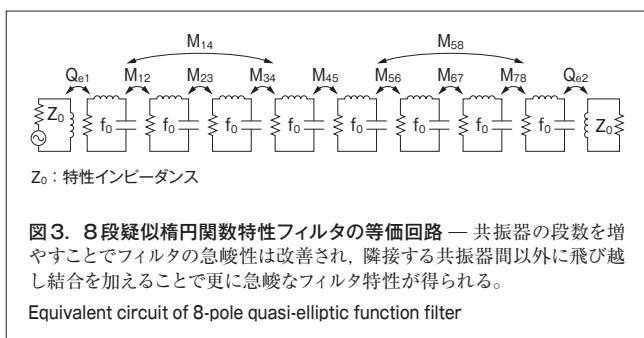


共振器の等価回路及び周波数応答を図2に示す。GHz帯における超伝導体共振器は、低損失常伝導体の代表である銅と比べても抵抗が1/1,000以下となる低損失特性を持っている。このとき共振器の周波数応答は図2に示すように急峻(しゅん)な共振特性となる。超伝導フィルタは、この共振器を組み合わせることで、従来は不可能であった高周波帯において低損失で急峻なフィルタ特性を実現できる。

### 3 超伝導フィルタの設計

#### 3.1 フィルタ回路の設計

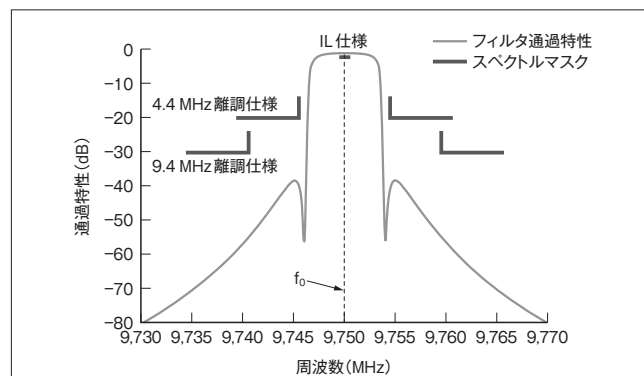
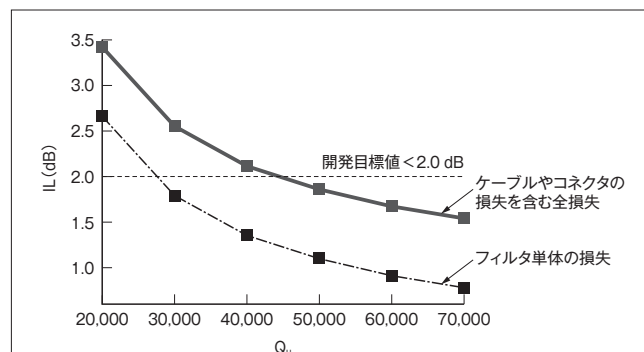
8個の共振器から成る疑似楕(だ)円関数系を用いたフィルタの等価回路を図3に示す。 $Q_e$ は外部回路との結合を、 $M$ は共振器間結合を表す。一般に、フィルタは共振周波数の等しい複数個の共振器を電磁界結合させることにより目標の特性を実現している。この共振器の段数を増やすことでフィルタの急峻性は改善され、疑似楕円関数特性を持たせ帯域外近傍に減衰極を実現することで急峻性を更に改善できる。この関数系は、図3の等価回路に示すように、隣接する共振器間以外に $M_{14}$ 、 $M_{58}$ の飛び越し結合を加えることで帯域端に減衰極を実



現できるため、少ない段数で急峻なフィルタ特性が得られる<sup>(3)</sup>。

次に、8段疑似楕円関数特性フィルタにおいて、共振器の損失を表すパラメータである無負荷Q値( $Q_u$ )とフィルタの挿入損失(IL)の関係を図4の一点鎖線で示す。実際の超伝導フィルタでは、冷凍機と内部に実装されたフィルタを接続するケーブルやコネクタの損失が0.76 dBであるため、損失仕様の2.0 dB以下のILを実現するには、図4の実線に示すように $Q_u=45,000$ 以上の共振器が必要となる。低損失特性のマージンを考慮し50,000程度の $Q_u$ を実現することができれば、仕様を満足するフィルタが実現できる。

これらの結果を用いて計算したフィルタの通過特性と、フィルタの仕様となるスペクトルマスクを図5に示す。ここで、 $Q_u=50,000$ の共振器として計算を行った。フィルタは帯域両端に1組の減衰極を持っており、これにより、帯域端で急峻な特性を実現している。また、中心周波数( $f_0$ )において1.2 MHz以



上の通過帯域を確保しつつ、レーダの隣接CH  $f_0 \pm 4.4$  MHzにおいて-20 dB以下、次隣接CH  $f_0 \pm 9.4$  MHzにおいて-30 dB以下という帯域外減衰量の仕様を満足した。更に、ILは1.1 dBであり、ケーブルやコネクタの損失0.76 dBを加えても損失仕様の2.0 dB以内に収まった。これらの結果を基に、図3に示した等価回路における各回路定数の設計値を決定した。

### 3.2 超伝導共振器の設計

3.1節で述べた回路設計の結果、 $Q_u=50,000$ 程度の共振器が必要になることがわかった。しかし、一般的に高い $Q_u$ が実現できる銅製の空洞共振器を用いたとしても9 GHz帯では $Q_u=20,000$ 程度であり、必要な $Q_u$ が得られないという問題がある。そこで、必要な $Q_u$ を実現するため超伝導共振器の設計を行った。

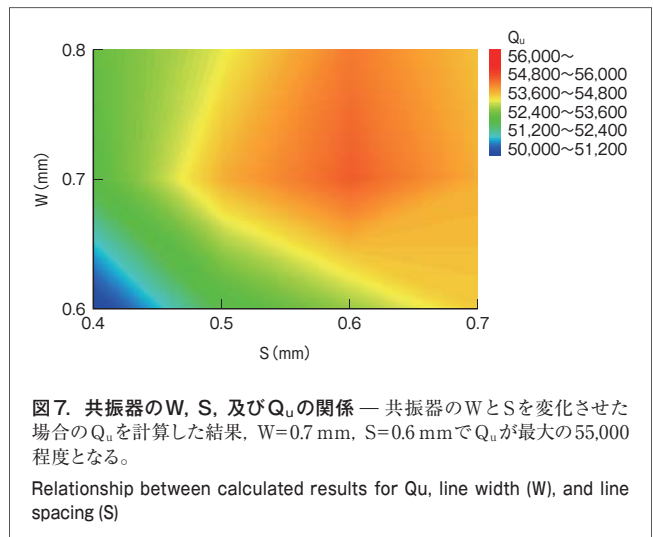
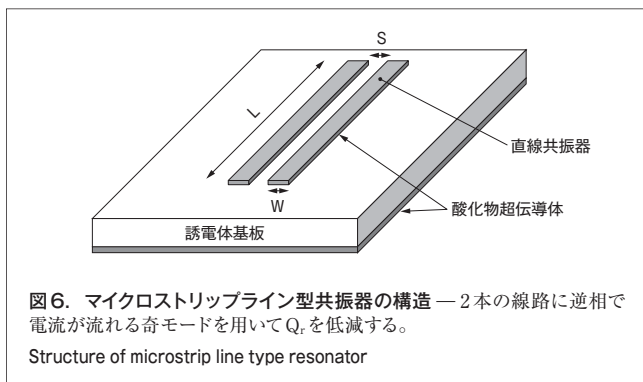
フィルタに用いる超伝導体は低損失特性の優れた薄膜材料が適しているため、誘電体基板上に製膜された超伝導薄膜を用いている。そのため、超伝導フィルタは平面回路で構成され、今回の設計では図6に示すようなマイクロストリップライン構造を用いた。この構造は、1枚の誘電体基板の両面に導体を設け、片面を信号線、もう一方の面を地導体とする。マイクロストリップラインを用いた共振器の主な損失要因は、以下の三つである。

- (1) 導体の抵抗分の損失に起因する導体損 ( $Q_c$ )
- (2) 誘電体基板内の損失に起因する誘電体損 ( $Q_d$ )
- (3) 空間に放出される放射損 ( $Q_r$ )

これらの損失項から、マイクロストリップライン型共振器の $Q_u$ は、式(1)により関係付けられる。

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \quad (1)$$

式(1)より、超伝導体を用いることで $Q_c$ を大きくし、導体損を低減できる。しかし他の損失項があるため、超伝導体を用いただけでは共振器の $Q_u$ を高くできず、全てのQ値を高くし、損失項を小さくすることが必要になる。そこで、電磁界シミュレータを用いて各損失の計算をし、 $Q_u$ が最大になるように共



振器の最適設計を行った。

共振器の線路導体及び地導体には高温超伝導体を用い、誘電体基板には高周波損失が小さい酸化マグネシウム (MgO) 基板 ( $\epsilon_r$  (誘電率)=9.6,  $\tan \delta$  (誘電正接)  $< 10^{-5}$ ) を用いた。この誘電体基板を用いることで $Q_d > 100,000$ となり、 $Q_d$ の影響は無視できる。 $Q_r$ の低減に関しては、図6に示すような2本の直線共振器 (線路長: L, 線路幅: W, 線路間隔: S) を並べ結合させた、結合共振器構造を開発した。この構造は、2本の線路に流れる電流が逆相となる奇モードを選んで用いることで、共振器からの放射を互いに打ち消し、 $Q_r$ を低減する特長を持っている。これまで述べたように、超伝導体による $Q_c$ 低減、低損失誘電体基板の採用、及び $Q_r$ 抑制構造の共振器による $Q_r$ の低減を行うことで、必要な $Q_u$ を実現した。

共振器のW及びSを変化させた場合の $Q_u$ の変化を計算した結果を図7に示す。W=0.7 mm, S=0.6 mmで最大の $Q_u=55,000$ 程度となる結果を得た。これにより、仕様で要求される $Q_u=50,000$ 以上が達成できる見込みを得たので、この共振器構造を用いてフィルタを試作し評価した。

## 4 超伝導フィルタの評価結果

外形寸法50×56 mmのMgO基板上に製膜したイトリウム (Y) 系高温超伝導薄膜をパターンニングし、 $f_0=9.750$  MHzの気象レーダ向け受信用超伝導フィルタを試作した。試作した超伝導フィルタは金属パッケージに収められ、超伝導フィルタユニット内の冷凍機に実装される。超伝導フィルタユニットは、超伝導フィルタ、冷凍機、温調器、電源装置、及び廃熱系で構成され、外形寸法273 (幅) × 304 (高さ) × 126 (奥行き) mm、質量12 kg、及び容量約10 Lの世界最小サイズ<sup>(注1)</sup>を実現して

(注1) 2011年10月現在、超伝導フィルタユニットにおいて、当社調べ。

いる(図8)。冷凍機には2.5 W級スターリング型パルス管冷凍機を用いており、最大負荷時の消費電力が150 W程度で動作する。前面パネルには信号入出力用の二つの高周波(RF)コネクタを備えている。

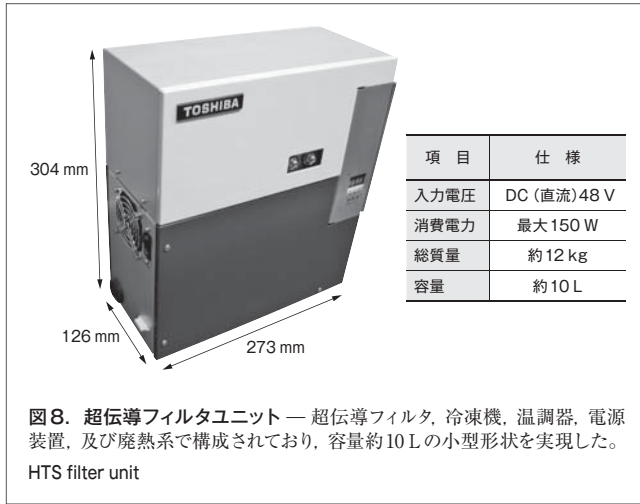


図8. 超伝導フィルタユニット—超伝導フィルタ, 冷凍機, 温調器, 電源装置, 及び廃熱系で構成されており, 容量約10 Lの小型形状を実現した。  
HTS filter unit

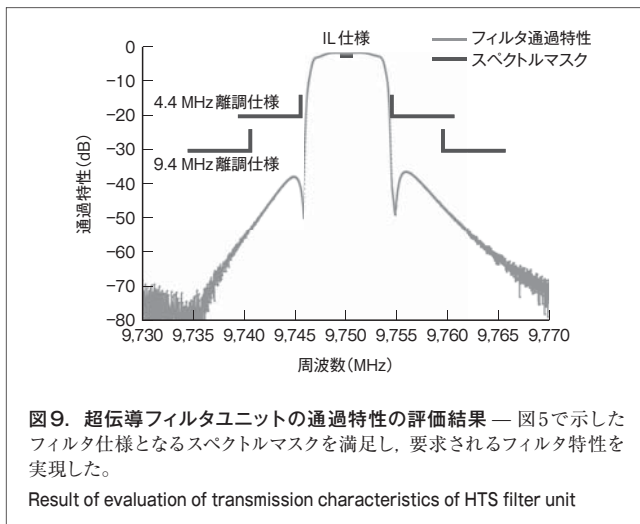


図9. 超伝導フィルタユニットの通過特性の評価結果—図5で示したフィルタ仕様となるスペクトルマスクを満足し, 要求されるフィルタ特性を実現した。

Result of evaluation of transmission characteristics of HTS filter unit

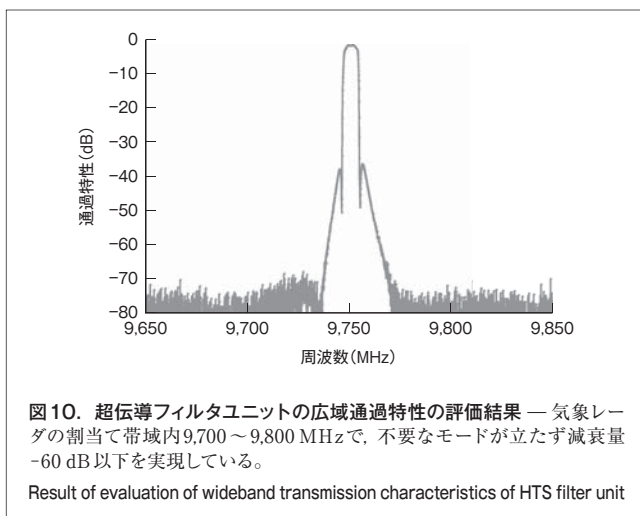


図10. 超伝導フィルタユニットの広域通過特性の評価結果—気象レーダの割当て帯域内9,700~9,800 MHzで, 不要なモードが立たず減衰量-60 dB以下を実現している。

Result of evaluation of wideband transmission characteristics of HTS filter unit

試作した超伝導フィルタが超伝導状態になる70 Kまで冷却して評価を行った。フィルタの通過特性の評価結果を図9に示す。 $f_0=9,750$  MHzにおいて,  $IL=1.8$  dB, 3 dB帯域幅=6.9 MHz,  $f_0-4.4$  MHzの減衰量=43.4 dB,  $f_0+4.4$  MHzの減衰量=31.2 dB,  $f_0-9.4$  MHzの減衰量=53.4 dB,  $f_0+9.4$  MHzの減衰量=46.3 dBとなり, 図5に示したスペクトルマスクの仕様を満たす結果が得られた。また, 広域通過特性を図10に示す。9,700~9,800 MHzの気象レーダの帯域内では, 不要なモードが立たず-60 dB以下の減衰量を実現している。

## 5 あとがき

高温超伝導体の低損失性を生かして, 高い $Q_u$ が実現できる共振器の開発を行い, 容量約10 Lの世界最小サイズの9 GHz帯気象レーダ向け受信用超伝導フィルタユニットを実現した。このフィルタを用いることで, 従来技術では実現できなかった隣接CHからの干渉を除去でき, 周波数資源の有効利用が期待できる。

今後は, 実用化に向けて詳細な検討を行うとともに, 他のアプリケーションへも展開できるように技術開発を進めていく。

なお, この研究の一部は, 総務省の「平成22年度 周波数ひっ迫対策のための技術試験事務」で実施したものである。

## 文献

- 1) 和田将一 他. 電波資源を有効に利用する5 GHz帯固体化気象レーダ. 東芝レビュー. 63, 7, 2008, p.48-51.
- 2) 水谷文彦 他. 局地的豪雨や突風を監視する9GHz帯固体化MPレーダ. 東芝レビュー. 64, 10, 2009, p.62-65.
- 3) 加屋野博幸 他. 地上デジタル放送中継局用 超伝導フィルタ. 東芝レビュー. 61, 4, 2006, p.64-67.



河口 民雄 KAWAGUCHI Tamio

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



塩川 教次 SHIOKAWA Noritsugu

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.



加屋野 博幸 KAYANO Hiroyuki

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.