

Cバンド気象レーダ向け新リッジ構造の樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ

柿元生也*
中本成洋**
小柳智之*

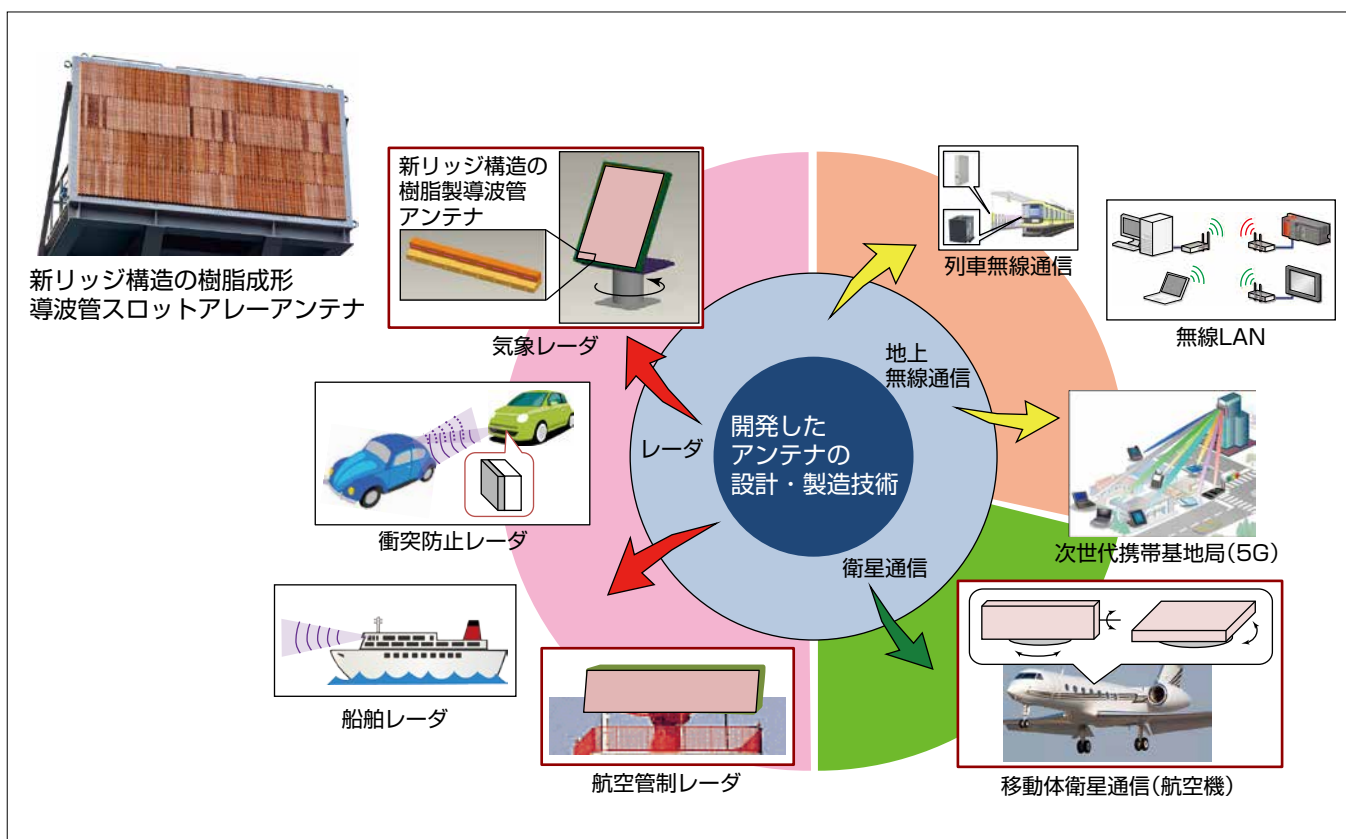
Injection-molded-resin Slotted Waveguide Array Antenna with Novel Ridge Structure for C-band Weather Radar
Ikuya Kakimoto, Narihiro Nakamoto, Tomoyuki Koyanagi

要 旨

近年増加する極端気象現象に伴う水害や土砂災害に対応するため、2010年頃から気象レーダの二重偏波化による観測精度向上と、これによる予報精度向上が進んできたが⁽¹⁾、その一方で観測時間を短縮してデータ更新レートを高頻度化し、警報発令までの時間を短縮するためのフェーズドアレー気象レーダの検討や開発評価が行われてきた。総務省や内閣府の予算による単偏波のXバンドフェーズドアレー気象レーダでは他社が先行し、DBF(Digital Beam Forming)技術の適用によって、観測周期を従来の1/10程度まで短縮できる⁽²⁾。一方で観測精度は、従来のパラボラアンテナを用いた二重偏波Cバンド気象レーダと同等以上の精度を必ずしも得られるわけではなく、装置が高価格である

こともあり、現業配備には至っていない。

三菱電機は現業のCバンド気象レーダのフェーズドアレー化を見据え、十分な観測精度が得られかつ低価格なフェーズドアレーレーダを実現するための、独自のリッジ構造を持った樹脂成形導波管アンテナを2016年度から2018年度にかけて開発した。樹脂化によってコストと質量を抑制するだけでなく、その成形の容易性を生かして、アンテナの効率、サイドローブレベル、交差偏波比といった気象観測に重要なアンテナ性能を確保した。また、樹脂成形技術の適用によって柔軟な内部構造設計や量産が容易になり、このアンテナの設計・製造技術は広くインフラ、通信分野のアンテナにも適用できる。



新リッジ構造の樹脂成形導波管スロットアレーアンテナの適用先

当社が開発した新リッジ構造の樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ(ハーフサイズアレーによる評価用アンテナ)の外観と適用先を示す。このアンテナの設計・製造技術は気象レーダのほか、様々な分野のレーダや通信に適用できる。

1. ま え が き

近年ゲリラ豪雨などの直前予測への対応として注目を集めるXバンドフェーズドアレー気象レーダは、DBF技術の適用によって観測周期を従来の1/10程度まで短縮できるが、現状の単偏波Xバンドフェーズドアレー気象レーダの観測精度は従来のパラボラアンテナを用いた二重偏波Cバンド気象レーダと同等以上の精度を必ずしも得られるわけではなく、装置が高価格であることもあり、現業配備には至っていない。

気象予報のために必要な高精度な気象レーダにフェーズドアレー方式を適用するには、二重偏波観測を高精度で行うためのアンテナのハードウェア性能が最も重要であり、当社は現業のCバンド気象レーダへのフェーズドアレー方式の適用を見据え、十分な観測精度が得られかつ低価格なフェーズドアレーレーダを実現するための、独自のリッジ構造を持った樹脂成形導波管スロットアレーアンテナを2016年度から2018年度にかけて開発した。この開発によって、樹脂成形によって導波管内部の複雑な構造でも設計どおりに容易に再現して製造できるようになったため、アンテナ効率、サイドロープレベル、交差偏波比といった気象観測に重要なアンテナ性能を得られるようになった。このアンテナの設計・製造技術はCバンドフェーズドアレー気象レーダに適用するほかに、インフラ、通信分野など他の分野のアンテナにも広く適用できる。

2. Cバンド気象レーダに必要なアンテナ性能

2.1 観測周期とアンテナの形態

従来のパラボラアンテナのCバンド気象レーダでは、距離最大400km、仰角0°~30°程度の範囲を5分程度の時間をかけて、1本の幅1°程度のビームを三次元的に走査して観測している。急速に発達する積乱雲によるゲリラ豪雨などは30分程度で雲の形成から降水、消滅と変化するため、直前予測を行うためには5分の観測間隔では不十分で、1分程度の観測間隔が求められる。これを実現するのがフェーズドアレーレーダで、仰角方向10°程度の送信ビームを送信しながら1°程度の受信ビームを例えば10本同時に電子的に形成するようにすれば、ビーム走査に要する時間を1/10に短縮できる。DBF^③というこの技術は、数十年前から大規模な特定分野のレーダで用いられてきたが、計算機リソースの進歩によって気象レーダでも実用化できるようになってきた。フェーズドアレーレーダでは、素子を二次元に配置してビームを方位方向と仰角方向の両方に電子走査できるように構成することもできるが、従来のパラボラアンテナに比べて装置の価格があまりにも高額になるため、方位方向は機械回転とし、仰角方向だけ電子走査する方式を想定している。図1にフェーズドアレー

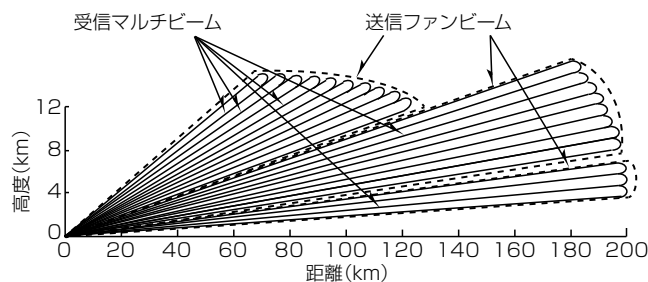


図1. フェーズドアレーレーダのビーム配置例

表1. 試作アンテナの要求性能

項目	仕様・性能
周波数	C帯(5.25~5.37GHz)
偏波	二重偏波(水平偏波, 垂直偏波)
交差偏波比	-35dB以下(アンテナ正面)
サイドロープレベル	-30dB以下
ビーム幅	1.2°以下(方位方向, 仰角方向共)
コスト(導波管アンテナ)	金属切削加工時の1/10以下の製品費
耐用年数	15年以上

レーダのビーム配置例を示す。

2.2 Cバンド気象レーダに必要な性能要件

航空機などのハードターゲットを対象とするレーダと異なり、雲や雨といったボリュームターゲットを観測対象とする二重偏波気象レーダでは、電力効率のほかにサイドロープレベルと交差偏波比が特に重要である。また、既存のパラボラ型の気象レーダの後継機として既設のタワー上に実装できるようにするため、軽量化、低コスト化を実現する必要がある。この開発では、高いアンテナ性能が期待できる導波管スロットアレーを採用し、アンテナの素材を樹脂に金属めっきを施したものにすることで、軽量化、低コスト化を図った。表1に試作アンテナの要求性能を示す。

3. 開発したアンテナの特徴

3.1 アレーの配置

概略のシステム設計の結果から、アンテナ開口の構成を図2のように定めた。開口面全体を方位方向16、仰角方向74段のサブアレーに分割し、そのうち24段を送受信モジュールに接続、50段を受信モジュールに接続する。図2(b)は側面図で、仰角15°に法線方向を固定し、覆域を0°~30°とした場合の図である。

表1に示したように、気象レーダでは、地面や建物からの不要な散乱を抑圧するため、-30dB以下の低サイドローブ特性が求められている。開発アンテナでは、方位方向には、アンテナ開口にテイラー分布と呼ばれる励振分布を設け、仰角方向にはDBFによるビーム形状制御によってこれを実現する。1段の方位方向の励振分布の制御方法を図3に示す。送受信モジュールからサブアレーへの分配回路で大まかな分布を形成し、各サブアレー内部の構造によって各スロットからの放射量を精密に制御することで、アレー全体で滑らかな励振分布を得るようにした。

3.2 樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ

今回開発した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナは、新たに開発した次の二つの独自の技術を使用している。

(1) ボス・アイリス構造

樹脂は金属に比べて熱などで変形しやすく、樹脂成形で導波管を製造する場合、複数の成形品を多数のねじで固定するなどの形状を保持する構造が必要になり、アンテナの性能を劣化させる要因になる。今回、成形品を固定するためのねじ取付け部や、形状を保つために内部に施した凹凸のリブ構造に、電気特性を補償する機能を一体化させた独自のボス・アイリス構造を新たに開発した。ボスとはねじ止め穴を作るために必要な小さな円筒形の突起構造、アイリスとは導波管内部に絞りを入れ、電気特性を調整する構造のことである。この構造では一部のボスや内部に施した凹凸のリブ構造が、アイリスの役割を兼ねている。この構造によって実現した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナでは、当社製の金属スロットアレーアンテナと比べ、40%の質量削減と90%のコスト低減を実現した。

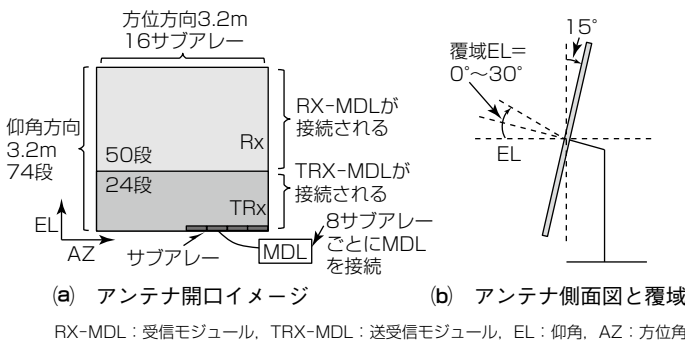


図2. アンテナ開口の構成

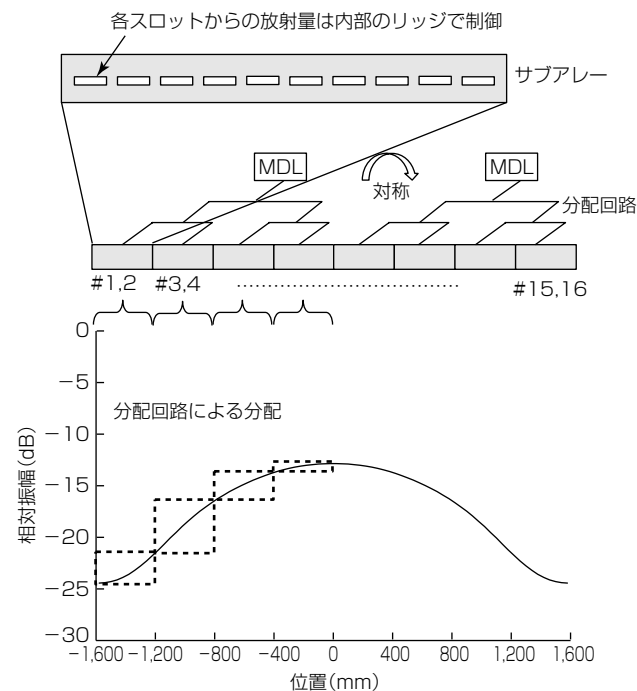


図3. 方位方向の励振分布

(2) 新リッジ構造

従来、二重偏波共用の導波管スロットアレーアンテナでは、導波管の小型化のため、その内部にリッジと呼ばれる障壁構造を設けることが多く⁽⁴⁾、通常、内部のリッジ構造は工作性の事情から単純な直線状としている。このとき、スロットからの電力放射量はスロットとリッジ間の距離によって決まるため、スロットの配置を直線状からずらして並べ、電力放射量を調整していた⁽⁵⁾。しかし、この方法では、細かな電力放射量の調整が困難で、結果としてサイドローブ特性が悪化するため、広島工業大学と共同で図4に示す新リッジ構造を開発し、サイドローブを抑制した。新リッジ構造は、アンテナ内部に設けるリッジを蛇行させた構造で、これによって各スロットからの電力放射量を調整でき、最適なビーム形成が可能になる。その結果、従来比で60%のサイドローブ低減、90%の交差偏波低減、10%の電力効率の向上を実現した。

3.3 試作評価結果

図5に開発した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナのアンテナ素子を示す。アンテナ素子は垂直偏波及び水平偏波各々の四つのスロットアンテナから成るサブアレーを横に二つつなげた構造になっている(サブアレーは、アンテナ全体でビーム形成を行う際の位相制御、給電、受信の最小単位)。

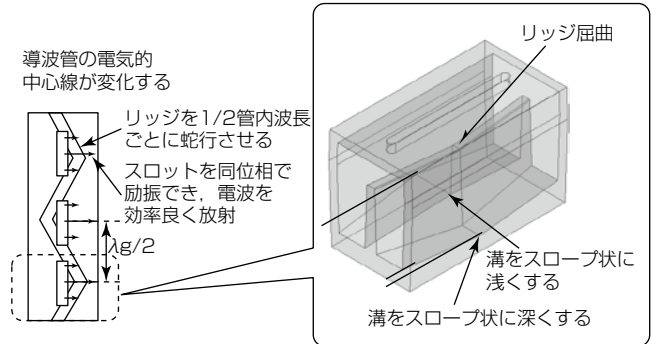


図4. 新リッジ構造

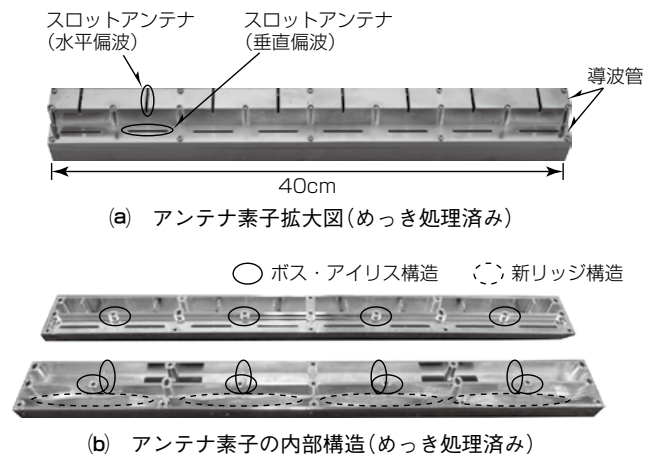


図5. 開発した樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ

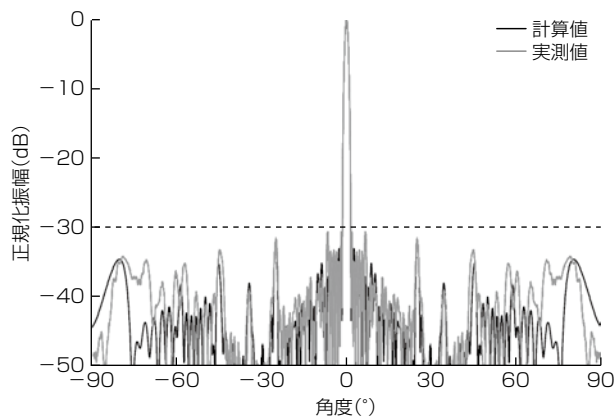


図6. 水平偏波のアレーパターン(主偏波, 水平方向)

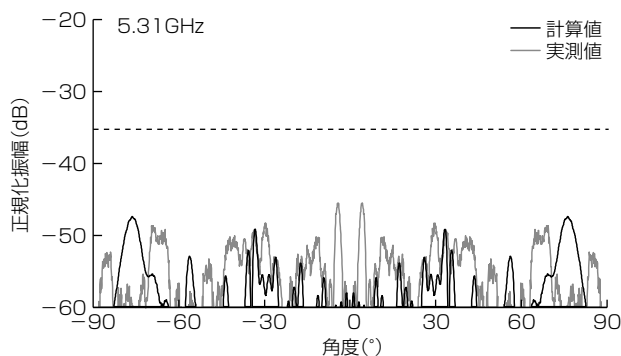


図7. 水平偏波のアレーパターン(交差偏波, 水平方向)

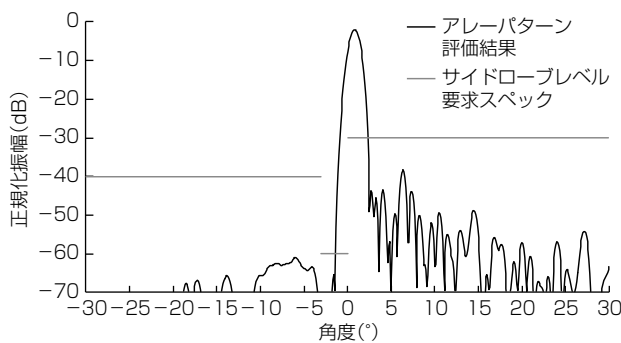


図8. 仰角方向の送受積アレーパターン

設計では、特に、隣接するスロット間の電磁結合、成形品を固定するためのボスによる散乱、及び樹脂成形品の変形の影響を正確に計算に含めることがポイントになり、アレーパターンの計算値と実測値の差異分析や、評価方法を含め様々な新たな知見を蓄積できた。図6に水平偏波の主偏波のアレーパターン、図7にその交差偏波のアレーパターンの評価結果の一例を示す。主偏波については45°内で設計値と実測値が良く一致しており、目標の-30dBもクリアできている。交差偏波についても全方位で目標の-35dBをクリアしている。

想定しているCバンド気象用フェーズドアレーレーダでは仰角方向はDBFによって地面からの不要信号を抑圧するために仰角-1°方向にはヌルを形成する。図8に実測

を基に計算した仰角方向の送受積アレーパターンを示す。細部は今後調整の必要があるが、ほぼ想定どおりのパターンが得られることが確認できた。

4. む す び

従来の1/10の観測周期を実現するCバンドフェーズドアレー気象レーダ用に、“樹脂成形導波管スロットアレーアンテナ”の開発を行った。樹脂成形とめっきを組み合わせた製造法の採用と独自の構造によって、高性能でありながら、軽量化・低コスト化を実現した。具体的には、業界トップクラスになる、従来比で60%のサイドローブ低減、90%の交差偏波低減、10%の電力効率の向上を実現した^(注1)。また、現業機への実装を想定し、当社製の金属スロットアレーアンテナと比べ、40%の質量削減、90%のコスト低減を実現した。

今後、現業用気象レーダへの適用に向けてシステム開発を行っていく予定であるが、このアンテナは航空管制レーダ、地表観測用レーダ、衛星通信用アンテナなどの幅広い分野に向けた実用化に適用可能である。

なお、この開発は国立研究開発法人科学技術振興機構の研究成果最適展開プログラムシーズ育成タイプ“卓越した電波干渉低減能力を持つ新リッジ構造の樹脂製導波管アンテナの開発”によって行ったものである。

(注1) 2019年1月25日現在、当社調べ。一般のパッチアレーアンテナと比較で

参 考 文 献

- (1) 柿元生也, ほか: 高精度に降雨量を推定するマルチパラメータレーダ, 電気学会誌, **133**, No.3, 150~152 (2013)
- (2) 水谷文彦, ほか: 豪雨など極端気象の兆候を捉えるフェーズドアレイ気象レーダ, 東芝レビュー, **69**, No.12, 15~18 (2014)
- (3) 唐沢好男, ほか: 通信用デジタルビームフォーミングアンテナー見えてきたインテリジェントアンテナの将来一, 電子情報通信学会誌, **78**, No.9, 899~906 (1995)
- (4) Wang, W., et al.: Waveguide slotted antenna array with broadband, dual-polarization and low cross-polarization for X-band SAR applications, IEEE International Radar Conference, 653~656 (2005)
- (5) Kim, D.Y., et al.: A design procedure for slot arrays fed by single-ridge waveguide, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **36**, No.11, 1531~1536 (1988)