

高効率ミリ波平面アンテナ

Novel Millimeter-wave Planar Antennas with High Radiation Efficiencies

UDC 621.3.029.6 : 621.317.799

手代木 扶	Tasuku Teshirogi	技術本部 副技師長
関根 祐司	Yuji Sekine	インフォ ソリューションズ 開発本部 第二開発部
山本 綾	Aya Yamamoto	インフォ ソリューションズ 開発本部 第二開発部
川原 祐紀	Yuki Kawahara	インフォ ソリューションズ 開発本部 第二開発部
馬場 信行	Nobuyuki Baba	インフォ ソリューションズ 開発本部 技術部
小林 正直	Masanao Kobayashi	インフォ ソリューションズ 開発本部 技術部

1 はじめに

近年，衝突防止やACC（Adaptive Cruise Control）を目的とする，ミリ波帯電波を用いた自動車レーダの有効性に注目が集まり，日，米，欧の自動車メーカーや電機メーカーがその開発にしのぎを削るようになってきた。自動車レーダは，ITS（高度道路情報システム）実現の先陣を切るアプリケーションであるが，ミリ波の本格的利用にとってもその端緒となるものである。

通信分野においても，インターネット，マルチメディア，携帯電話等の急速な進展に対応して，高速無線アクセス，超高速無線LAN，ホームリンクなど高速・大容量無線通信のニーズが増大し，広大な周波数帯を有するミリ波開発への期待が高まっている。

これらのミリ波の需要に応え，さらにその利用を推進するために，わが国において，76GHz帯の自動車レーダへの割り当てに加えて，60GHz帯（59～66GHz）を免許不要の無線局として認可するための法整備がなされた¹⁾。このようにさまざまな条件が整ってきて，今まさに，本格的ミリ波の開発と利用の時代を迎えようとしている。

ミリ波帯の利用のためには，MMIC等デバイスの低コスト化，高信頼化とともに，使い勝手のよい平面アンテナの高効率化と低コスト化も大きな課題となる。もしアンテナ効率を大幅に高くすることができれば，自動車レーダでは，探知距離を大幅に延ばすことが可能であるばかりでなく，システム構成を簡易化することも可能となる。

従来，ミリ波平面アンテナとしては，マイクロストリップ

アンテナ²⁾，トリプレートアンテナ³⁾，平行平板スロットアレー⁴⁾，導波管スロットアレー⁵⁾，リフレクタアレー⁶⁾等が開発されているが，これらは金属を基本材料としているので，導体損が大きく，高効率化が難しい。そのため，60GHzや76GHz帯では，効率の高いものでも30～40%台というのが実状である。導波管スロットアレーは他に比べると内部損失は小さいが，量産性に問題がある。

当社では，量産に適する，新しい高効率ミリ波平面アンテナとして，内部損失の小さい誘電体スラブを伝送路とする誘電体漏れ波アンテナを提案し，高効率を実現する上で鍵となる技術の開発を行なった。その結果，76GHz帯で67.5%という現時点における世界最高効率のミリ波平面アンテナを実現することができた。

本稿では，誘電体漏れ波アンテナの原理，高効率を実現するための手法とアンテナの設計法，給電系の構成，および開発したアンテナの性能について紹介する。

2 誘電体漏れ波アンテナ

2.1 基礎原理

誘電体線路^{7,8)}の一種である誘電体イメージガイドを用いた漏れ波アンテナの構成を図1に示す。十分な大きさの金属地板導体上に誘電体を配置した誘電体イメージガイドの上表面に，幅 s の金属ストリップが周期 d で装荷されている。これが本来放射をしない誘電体線路に摂動を与え，空間に漏れ波を発生させる。このような周期構造では次式の伝搬定数を

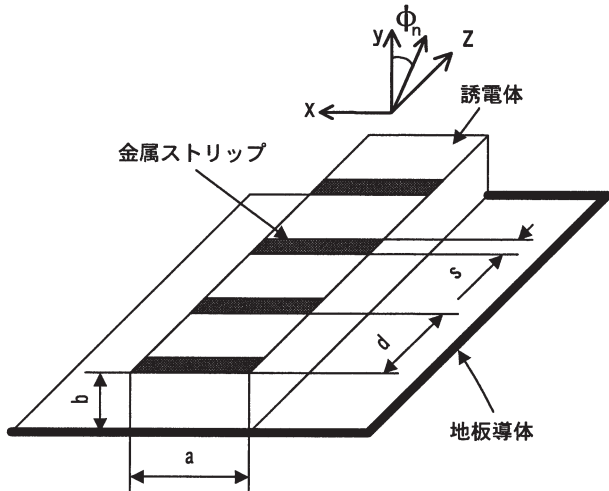


図1 イメージガイド漏れ波アンテナ
Image-guide leaky-wave antenna (LWA)

持つ無数の空間高調波が発生する。

$$n = \frac{2n}{d} \left(- \leq n \leq \right) \dots \dots \dots (1)$$

は非摂動時の位相定数であり、 n の絶対値が自由空間波数 k_0 より小さい場合には、漏れ波モードとなり放射がおきる。放射ビームの方向 θ_n は、

$$\theta_n = \sin^{-1} \left(k_0 + n \frac{2\pi}{d} \right) \dots \dots \dots (2)$$

で表わされる。通常は、 $n = -1$ のみが漏れ波モードとなるようにパラメータを選ぶ。式(2)から基本的にビーム方向は周期 d で決まる。また漏れ量は幅 s に大きく依存することが知られている。つまり、この d, s を制御することによって、開口分布の制御が可能となり、所望のアンテナ指向性が実現される。

2.2 アンテナの設計法

2.2.1 線路損失を考慮した漏れ波アンテナの設計法⁹⁾

アンテナ設計においては、開口分布を制御することによって、希望する指向性を実現する。漏れ波アンテナでは、線路からの電波の漏れ量を、線路の位置ごとに制御することが開口分布の制御となる。一般に漏れ波アンテナにおいては、所望の開口分布に対して漏れ量のみを考慮して設計しているが、より精密な開口分布制御を行い高効率アンテナを実現するために、線路の損失も考慮した設計法を開発した。

図2のような漏れ波アンテナを考える。観測点 z での伝送

電力 $P_T(z)$ は、入力電力 P_{in} からそこに到達するまでの間に放射した電力と線路損失によって消失した電力を差し引いたものである。 z における希望の開口電力分布は、 $P_T(z)$ に局所的漏れ係数 $\Gamma(z)$ を乗じたものであることを考慮して計算を進めると、最終的に次のような $\Gamma(z)$ の近似式が得られる。

$$\Gamma(z) = \frac{p_R(z)}{P_T(z)} = \frac{\Gamma_L(z)}{1 - \int_0^z \Gamma_L(z) dz - \int_0^z \Gamma_R(z) dz} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 Γ_R は放射効率、 $\Gamma_L(z)$ は所望の開口分布を全放射電力で割った正規化電力開口分布であり、 Γ_L は線路損失である。式(3)に、所望の開口分布、放射効率、線路損失を代入することにより、線路の漏れ係数を求めることができる。一例として、サイドローレベルが-20dBのテイラー分布を実現する漏れ係数を計算した結果を図3に示す。

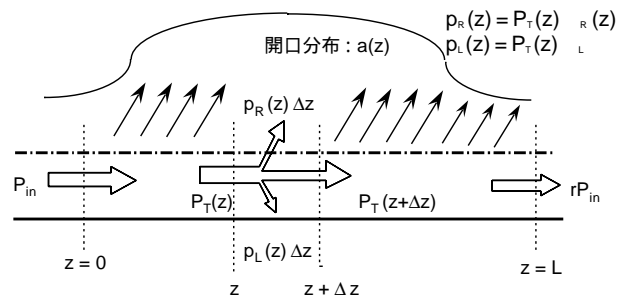


図2 漏れ波アンテナの伝送波・放射波・消失波
Transmitted, radiated, and dissipated waves in LWA

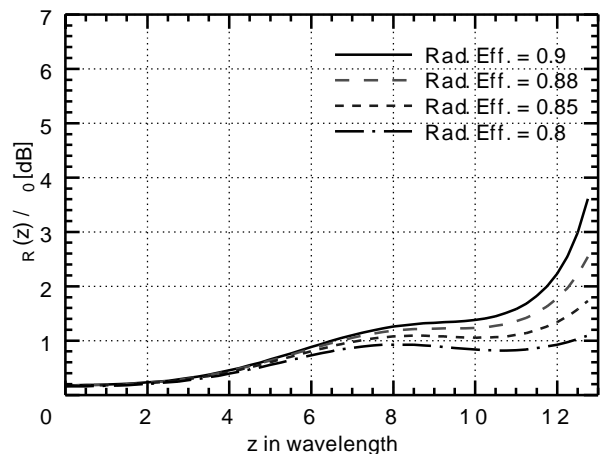


図3 漏れ係数の分布例(開口分布:テイラー分布)
Leakage distribution (Taylor distribution)

2.2.2 二次効果を考慮した設計

誘電体漏れ波アンテナのビーム方向は金属ストリップ周期 d で、漏れ量は幅 s で制御できることは前述したとおりであるが、詳しく調べると、漏れ量とビーム方向は、それぞれ d および s によってもわずかに変化することが分かった。さらにこの二次的影響を無視してアンテナを設計すると、所望の指向性から大きくずれてしまうこともわかった。そこで、精密に指向性を合成するために、この二次効果を設計に含めることとし、シミュレーションによって d と s に対する漏れ係数とビーム方向に関するデータベースを構築した。図4にその一例を示す。

このデータベースと図3に示す漏れ係数分布を用いて、局所的に幅 s 、周期 d を決定することにより、所望の指向性を精密に実現することができる。

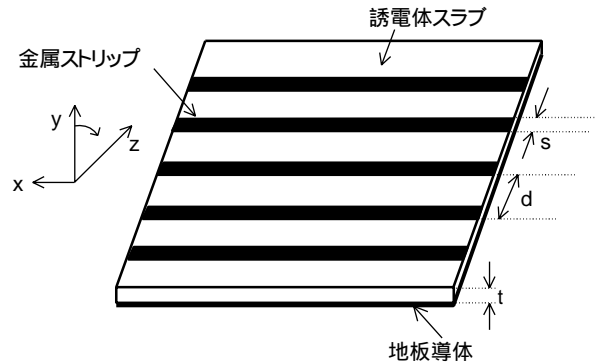


図5 誘電体スラブ線路漏れ波アンテナ
Dielectric slab-guide LWA

に指向性を精密に制御すると共に、アンテナに給電される電力を無駄なく放射させることが必要である。そのため、アンテナの各部で生じる損失をできるだけ減らさねばならない。

損失が生じる部分としては、誘電体線路の内部と、放射素子に給電する部分とがあり、前者については放射素子自身を持っている内部損失と、金属ストリップを装荷したことによって発生する反射波による損失がある。

以下では、これらの損失を低減するための手法について述べる。

3.2 低損失誘電体線路¹⁰⁾

前述のようにミリ波帯では金属の導体損が大きいので、特に平面アンテナのように広い面積を持つものでは、その支えとなる地板導体での損失が効率を下げる大きな要因となり得る。本アンテナでは、主たる伝送線路となる高誘電率な誘電体層(アルミナなど)と地板導体との間に低誘電率な誘電体層を設けている。このようにすると伝送するエネルギーのほとんどは高誘電率層に集中するため、地板導体に流れる電流を大きく減らすことが可能となる。実際、地板導体として有限の導電率を持つ金属(銀)を用いた場合、シミュレーションから導出した内部損失が、低誘電率層を設けない場合に比べてdB値で約四分の一となっていることを確認している(表1)。

表1 一層線路と二層線路の伝送損失の比較
Losses of various dielectric slab waveguides

	誘電体 + 完全導体	誘電体 + 銀
一層	6.36	22.7
二層	5.34	5.51

単位: dB/m@76.5GHz

一層: アルミナ(0.4mm厚)

二層: アルミナ(0.8mm厚)+空気(0.2mm厚)

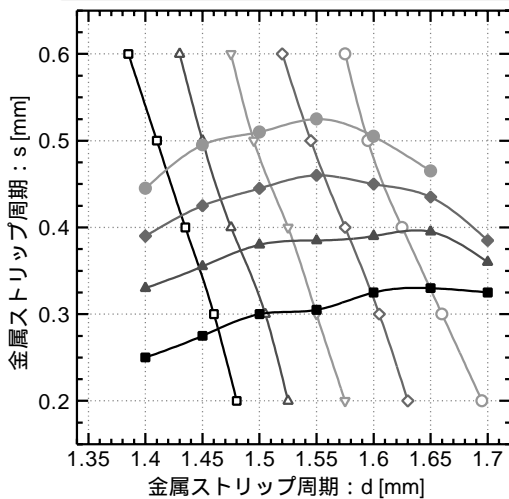
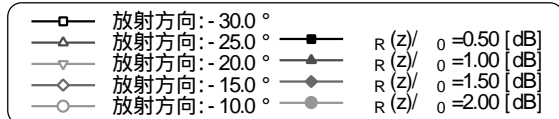


図4 誘電体漏れ波アンテナの設計データ
Design data for LWA

3 高効率、高性能化の手法

3.1 高効率、高性能のための課題

2章で基本原理を示した誘電体イメージガイド漏れ波アンテナ単体では、放射面積が小さいため高利得を実現することができない。これを解決する方法として、誘電体の横幅を板(Slab)状に広げることによって放射面積を増やし、高利得化を狙った誘電体スラブ漏れ波アンテナ(図5)を採用した。

また、アンテナ効率を高めるためには、2章で述べたよう

なお、導体損を減らすことができても、設けた低誘電率層によって損失が増えるようでは本末転倒である。よって、低誘電率層としてはやはりミリ波で損失の少ないPTFE等を用いることが考えられるが、誘電体層同士、あるいは誘電体層と地板導体との接触の一様性を保つために、本アンテナでは低誘電率層として空気を用いている。

3.3 線路内反射波の抑圧¹¹⁾

本アンテナは誘電体線路に金属ストリップを周期的に装荷するという構造を用いている。この時、金属ストリップの幅 s は電波の漏れ量とほぼ比例関係にあって、幅を広げるほど漏れ量も大きくなる。一方、幅を広げるとストリップの面積が増えるので、ストリップによる電波の散乱も多くなる。この散乱によって線路内に反射波が生じるとその分が損失となり、効率を低下させる原因となる。特に放射方向をブロードサイドに近づけようとするときストリップの周期が一波長に近づくため、各々のストリップからの反射波が同相で足し合わされて、ほぼ完全反射となってしまう。

そこで、二層構造にしたことにより誘電体基板の両面が使えるという利点を利用して、ストリップから生じる反射波を抑えることを考えた。図6のように放射面の反対側の面にも同じストリップ列を設け、これらを（線路内波長の約四分の一）だけずらして配置すると、互いのストリップから生じる反射波が打ち消し合うので、全体として反射波を抑圧できることが予想される。一波長間隔に配置したストリップ列を用いて、片面のみに設けた場合と両面に設けた場合の内部電界の比較をシミュレーションで行なったが、図7のように線路内の定在波比を比べれば反射波抑圧の効果が一目瞭然である。

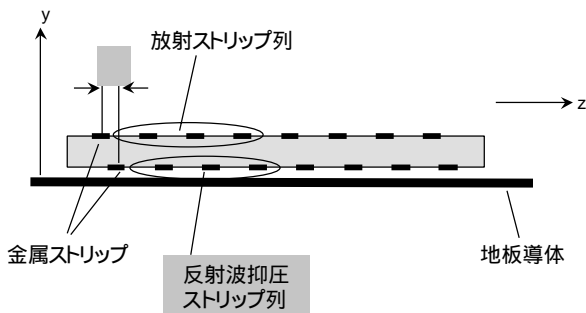


図6 反射波抑圧型アンテナの構造
Paired-array for canceling reflections due to metallic strips

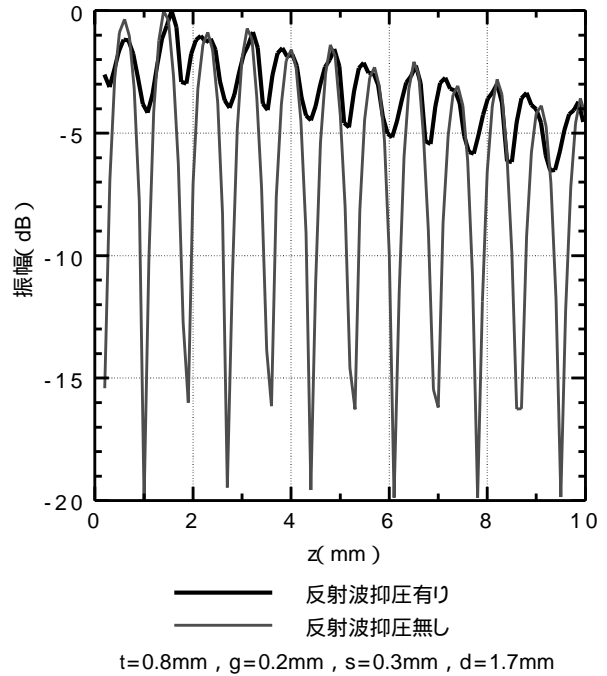


図7 反射波抑圧の効果
Effect of canceling array

3.4 高効率給電系

3.4.1 折り返し給電系¹²⁾

高効率なアンテナを実現するためには、放射素子が等位相で給電されなければならない。横方向（ x 方向）に一樣な構造を有する本アンテナ放射素子の給電には、誘電体スラブ線路の幅方向に一樣な位相分布を持つ波源が必要となる。誘電体スラブ線路への給電は平行平板線路から行うことを考えるが、導波管から給電して平行平板線路内でこのような波源を作るためには円筒波から平面波への変換が必要である。

ここでは、平面波への変換としてパラボラ反射鏡を用い、さらに3dB方向性結合器の理論を基とした折り返し導波管の反射板部分にこれを置くことで、誘電体線路に平面波を供給することを考える（図8）。設計には折り返し導波管構造の最適寸法設計とパラボラ鏡面の設計が必要であり、パラボラ

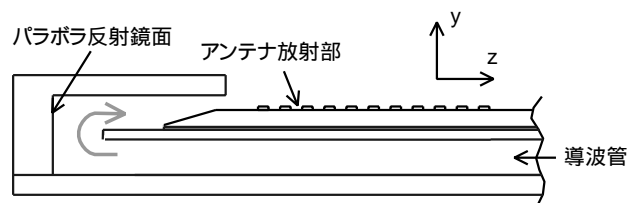


図8 折り返し給電系の構造
Folded feed system for LWA

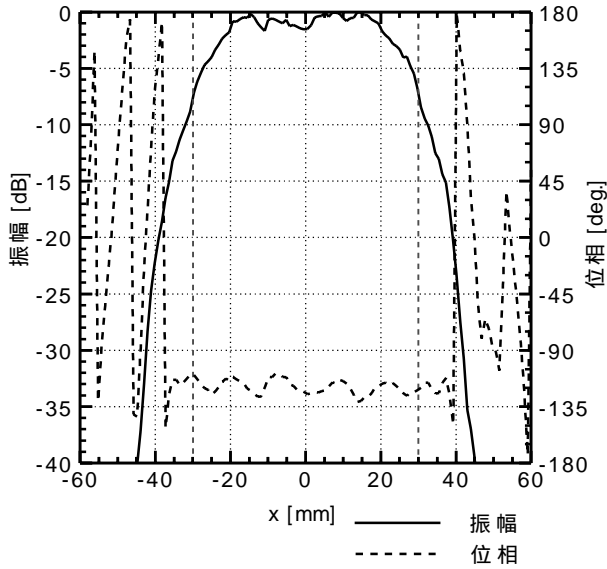


図9 折り返し給電系の開口における振幅・位相分布
Measured aperture distribution of folded feed system

鏡面については幾何光学理論から求め、折り返し構造についてはシミュレーションから最適構造を求めた。

位相分布が線路幅内で一様、振幅が線路の中心から幅±30mmの位置で約8～9dB低下という性能を目標に、給電部を試作した。本給電部の開口上の振幅・位相分布を測定した結果を図9に示す。

3.4.2 誘電体線路励振法

平行平板線路から誘電体スラブ線路に給電する際には、これら二つの線路の間で整合を取る必要がある。整合を取るには、誘電体線路にテーパを設ける方法がある。実際、この方法で給電しても反射は小さく、かつ広帯域に有効であるという良好な給電が実現できた。しかし、アルミナ等の誘電体線路にテーパをつけるという加工上の問題や、テーパの部分だけ線路が長くなり、放射に寄与しない部分の面積が増えるという難点がある。

そこで、テーパを設けなくても給電ができるように、平行平板線路と誘電体線路の間にインピーダンス整合部を設けることを考案した。具体的な方法としては、平行平板線路の開口部分に突起を形成し、この部分のインピーダンスを平行平板線路と誘電体線路の中間程度に設定することで変成器の役割を持たせるという方法を採用（図10）。シミュレーションによりリターンロス、透過損を導出したところ、中心周波数においてリターンロス20dB以上、透過損0.1dB以下という実用上十分な結果が得られた（図11）。これにより、小

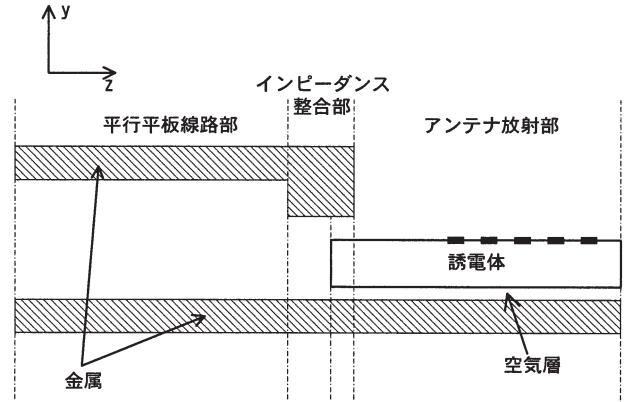


図10 インピーダンス整合部
Structure of impedance matching feed

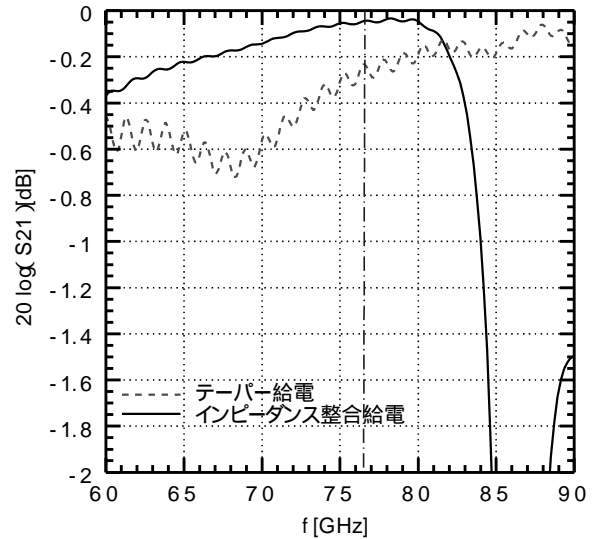


図11 テーパー給電とインピーダンス整合給電の透過損の比較
(シミュレーション)
Simulated transmission (S21) with tapered feed and impedance matching feed

型・簡易な構成で、かつ電気的特性にも優れた給電系を実現することができた。

4 開発したアンテナ

4.1 目標の設定

開発にあたって、今後出現と思われる多様な要求の中で最も代表的である2種類のアンテナについて目標性能を設定した。

高効率アンテナ

通信用アンテナは、サイドローブレベルが低いという条件よりも高効率であるアンテナが要求される。そのため、中心

周波数76.5GHzにおいて、効率65%以上、VSWR 1.5以下である垂直偏波アンテナを設計目標とした。

低サイドローブアンテナ

自動車レーダのアンテナは、偽像を防ぐために、ペンシルビーム、かつ低サイドローブである必要がある。そのため、中心周波数76.5GHzにおいて、サイドローブレベルが20dB以下、VSWRが1.5以下である垂直偏波アンテナを設計目標とした。

なお、自動車レーダでは45°偏波が使用されるが、これを実現するには、垂直または水平偏波のアンテナの上に偏波変換板を設ける方法と、アンテナ自体で直接45°偏波を放射させる方法とがある。本開発では、第一段階として、偏波変換板を想定し垂直偏波アンテナを対象とした。

4.2 性能

4.2.1 アンテナの構成

小型化を実現するための背面折返し給電と放射素子へのテーパー給電方法を採用することで、幅90mm、高さ110mm、奥行き12mm、質量200gを実現した。

さらに、自動車のバンパー付近への実装を考慮すると、アンテナの幅方向よりも高さ方向を小形化する必要がある。このため、放射に寄与しない部分の面積を削減できるインピーダンス整合給電を採用することで、給電部の高さ寸法を35mmから22mmとし、部品レベルで約40%の面積削減を実現した。この結果、幅90mm、高さ95mm、奥行き10mmになることを確認できた。

今回試作したアンテナを図12に示す。基盤となるベース上に、WR-12導波管、および、広角分布を実現するためのH面セクトラルホーン、誘電体漏れ波アンテナとしての地板導体の機能を持たせたセクター板を配置し、給電側の反対側に、H面セクトラルホーンにて作成された円筒波を、アンテナビーム放射面側に導き、かつ平面波に変換するパラボラ反射鏡を設け折返し給電構造を実現するとともに、セクター板上面にスペーサを設けることで誘電体二層構造を実現している。また、放射素子として金属ストリップを装荷したアルミ基板を使用し、誘電体漏れ波アンテナを構成した。

4.2.2 放射特性

指向性の測定には、当社で独自に開発した近傍界測定(NFM)システムを用いた。これはアンテナの放射面に近い領域を測定して電界分布を取得し、これを基にして遠方界指向性を算出するもので、指向性を測定するだけでなくアンテナの診断も行えるので、アンテナ開発の強力なツールである。また、近傍界測定で導出が難しいアンテナ利得に関しては、遠方界に被測定アンテナを設置し、標準ホーンアンテナと利得を比較するという方法で測定した。図13に高効率設計、および図14に低サイドローブ設計のアンテナの遠方界指向性を示す。また、低サイドローブ設計の場合のアンテナ利得と効率の周波数特性を図15に、76.5GHzにおける両アンテナの特性を表2に示す。

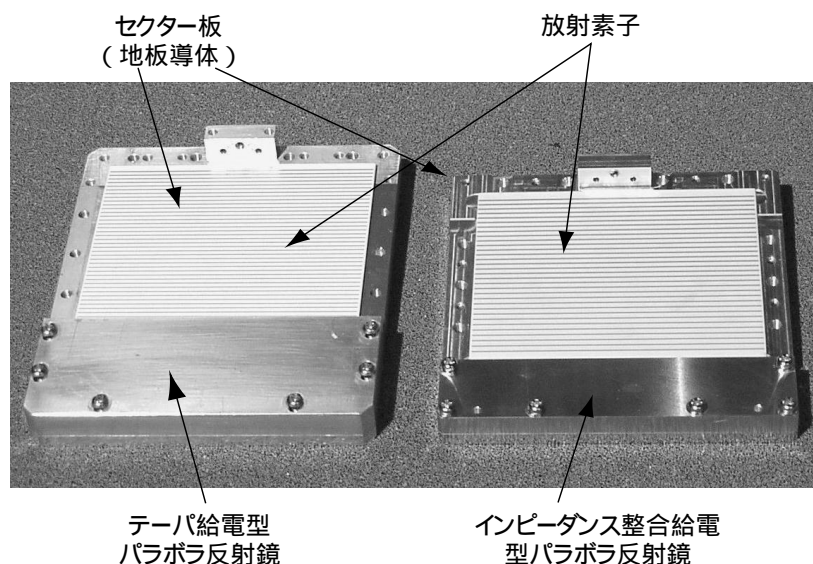


図12 アンテナ外観

Photograph of the slab-guide LWA

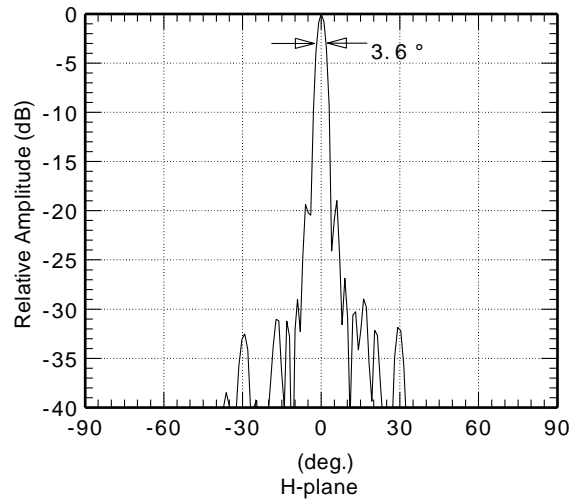
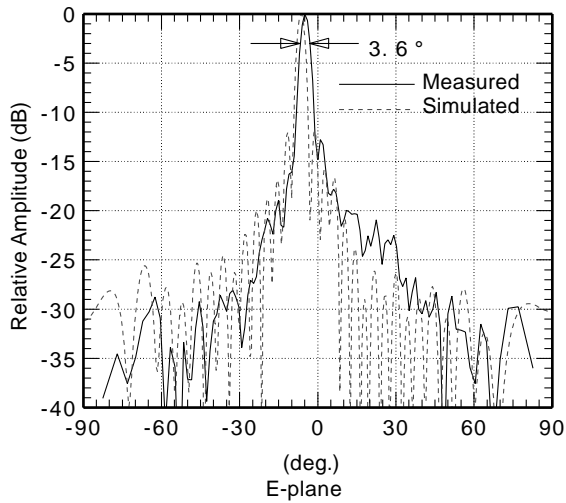


図13 高効率設計アンテナの遠方界指向性
Radiation patterns of LWA designed for high efficiency

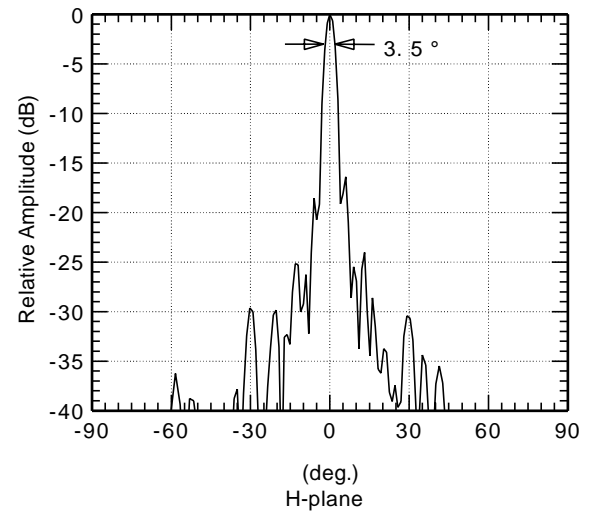
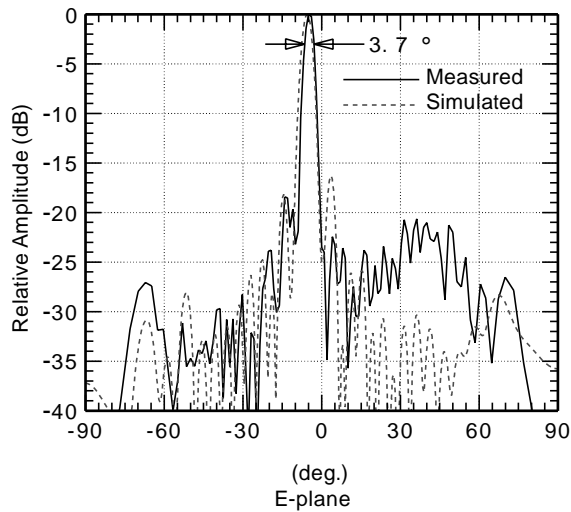


図14 低サイドローブ設計アンテナの遠方界指向性
Radiation patterns of LWA designed for low sidelobe level

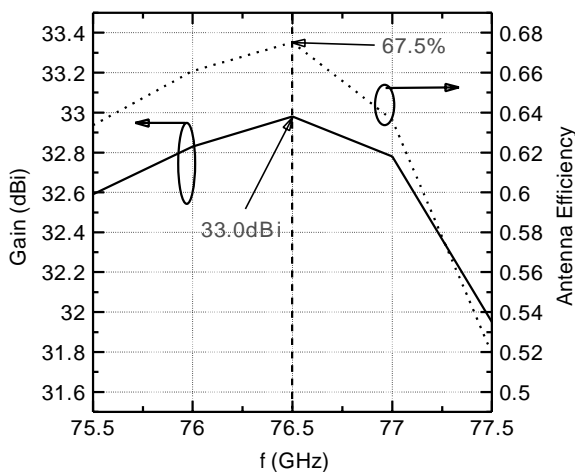


図15 低サイドローブ設計アンテナの利得・効率の周波数特性
Measured gain and efficiency of LWA designed for low sidelobe level

表2 アンテナ特性
Characteristics of slab-guide LWA

	高効率アンテナ (注1)	低サイドローブ アンテナ(注2)
アンテナ開口	60mm × 60mm	60mm × 60mm
利 得	32.8dBi	33.0dBi
効 率	66.0 %	67.5 %
サイドローブ レベル	- 13dB	- 18dB
VSWR	1.5以下	1.5以下

(注1) 暫定的な誘電率の値を用いて設計したアンテナ

(注2) 測定で得た誘電率の値を用いて設計したアンテナ

なお、本アンテナの設計には、所要の周波数における誘電体基板の定数を正確に把握することが重要であるが、一般にこれがわからない場合が多い。そのため、初めに試作した高効率アンテナの設計には暫定値を用いた。その試作アンテナのビーム方向の測定結果から、より正確な誘電率が推定できる。低サイドローブアンテナは、これを利用して設計したもので、その結果、低サイドローブ特性を実現すると同時に、高効率アンテナの効率を上回るアンテナを得ることができた。

4.2.3 インピーダンス特性

アンテナ放射素子と放射素子への給電系両方を含めたアンテナ全体のインピーダンス特性を、VNA（ベクトルネットワークアナライザ）にて測定した。結果を図16に示す。

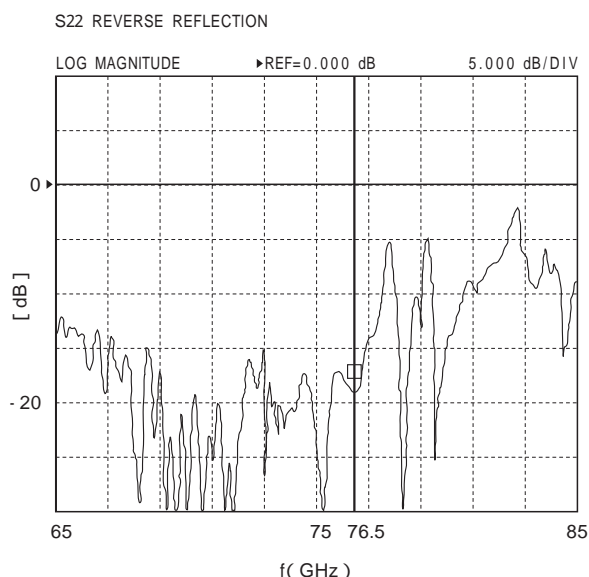


図16 インピーダンス特性
Measured input impedance of LWA designed for low sidelobe level

5 むすび

低損失・高効率を期待できる新しいミリ波アンテナとして、誘電体線路を用いた漏れ波アンテナを提案し、その原理、アンテナの設計法、高効率を実現するための幾つかの技法、試作したアンテナの特性などについて述べた。76GHz帯で試作した60mm×60mm開口のアンテナで、利得33.0dBi、効率67.5%を実現することができた。本アンテナは主要部分を印刷技術で製作できるため、量産に適したアンテナである。

今回の試作は76GHz帯で行なったが、本アンテナは無線LANや各種の無線通信システム、あるいはITS関連では車々間通信、路車間通信など、ミリ波帯や準ミリ波帯を用いる他システムに対しても適用できる。

現在、アンテナの更なる高性能化と小型化をめざし、給電系の改良を進めると共に、アンテナ単独で45°偏波を放射できるアンテナの開発を進めている。また、MMIC回路とアンテナの接続についても検討を行なっている。

今後の大きな課題としては電子ビーム走査が挙げられる。

参考文献

- 1) 郵政省電技審答申：“60GHz帯を使用する無線システムの導入” (2000.2)
- 2) David D.Li, et al.: “Millimeter-Wave FMCW/Monopulse Radar Front-End for Automotive Application”, MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1999
- 3) 太田雅彦, 石坂裕宣, 涌嶋重遠, 上里良英, 羽石 操：“60GHz帯トリプレート給電パッチアンテナの放射特性”, 1993年信学秋季大会B-114, (1999.9)
- 4) 宮森 猛, 広川二郎, 安藤 真：“ポスト壁導波路給電ミリ波帯平行平板スロットアレーの効率の導波路高依存性”, 2000年信学総大B-131, (2000.3)
- 5) 松浦幹浩, 若生伊市, 八木建巳, 木村雄一, 広川二郎, 安藤 真：“76GHz帯一層構造導波管スロット平面アンテナ”, 2000年信学ソ大B-1-81, (1998.9)
- 6) D.M.Pozer, D.targonski, H.D.Syrigos: “Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays”, IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.45, No.2, pp.287-296 (1997.2)
- 7) 手代木扶/米山務 編著：“新ミリ波技術”, オーム社 (1999)
- 8) 安達三郎/米山務 共著：“電波伝送工学”, コロナ社 (1981)
- 9) 手代木扶 他：“誘電体イメージ線路を用いたミリ波帯漏れ波アンテナ”, 信学技報, AP99-115 (1999.10)
- 10) 川原祐紀 他：“複層誘電体スラブガイドを用いたミリ波漏れ波アンテナ”, 1999年信学会総合大会論文集, B-1-117 (2000.3)
- 11) Tasuku Teshirogi et al.: “A Millimeter-Wave Dielectric Leaky-Wave Antenna with Low-Profile and High Efficiency”, ISAP2000, RE-0273 (2000.8)
- 12) 山本綾 他：“イメージガイド漏れ波アンテナアレーの試作特性”, 1999年信学会総合大会論文集, B-1-116 (2000.3)