

Cバンド漏れ波ガラスアンテナの設計

加地 拓弥[†] 佐藤 弘康[†] 陳 強[†] 長江 眞平[‡] 熊谷 翔[‡] 森本 康夫[‡] 加賀谷 修[‡]

[†] 東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

[‡] AGC 株式会社

E-mail: [†] takuya.kaji.t2@dc.tohoku.ac.jp, sahiro@ecei.tohoku.ac.jp, qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

あらまし 一次放射器の前面に高誘電率の誘電体板を配置して高利得化を図る漏れ波アンテナが報告されている。簡単な構成で高利得化を図ることが可能であり、導体損を抑えた高効率ミリ波帯アンテナへの適用が期待される。本報告では、誘電体板としてガラス板を用い、漏れ波の実効波長の観点から有限のサイズを考慮した利得を最大化させる設計について、Cバンドにおいて実験的に評価した結果を述べる。

キーワード ガラスアンテナ, 漏れ波アンテナ

Design of Leaky Wave Glass Antenna at C-Band

Takuya KAJI[†] Hiroyasu SATO[†] Qiang CHEN[†] Simpei NAGAE[‡] Akira KUMAGAI[‡]
Yasuo MORIMOTO[‡] and Osamu KAGAYA[‡]

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579
Japan

[‡] AGC Inc.

E-mail: [†] takuya.kaji.t2@dc.tohoku.ac.jp, sahiro@ecei.tohoku.ac.jp, qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

Abstract A leaky wave antenna has been reported in which a dielectric plate with a high dielectric constant is placed in front of the primary feed antenna to increase the gain. It is possible to achieve high gain with a simple configuration, and it is expected to be applied to high efficiency millimeter-wave band antennas with suppressed conductor loss. In this report, we describe the results of experimental evaluation in the C-band of a design that uses a glass plate as the dielectric plate and maximizes the gain considering the finite size from the viewpoint of the effective wavelength of the leaky wave.

Keywords Glass antenna, Leaky wave antenna

1. まえがき

近年、第五世代移動通信システム(5G)の普及が進み、さらには次世代の第六世代移動通信システム(6G)を見据え、研究開発が進められている。5Gや6Gでは高速大容量通信を実現するため、ミリ波帯など高周波アンテナの利用が見込まれているが、このような高周波帯では電波の伝搬損失が大きく、また伝送線路として広く用いられるマイクロストリップ線路等における導体損も大きい[1]。そのため、高利得で損失が小さいアンテナが望まれる。

一次放射器の前面に高誘電率の誘電体板を配置して高利得化を図る漏れ波アンテナが報告されている[2-4]。この誘電体漏れ波アンテナでは、グラウンド板上のパッチアンテナ等のアンテナ素子の前面に誘電体板を配置することで高利得を実現している。簡単な構成で高利得化を図ることが可能であり、導体損を抑えた高効率ミリ波アンテナへの適用が期待される。

従来の設計法では、動作原理についてグラウンド板、誘電体板を無限大基板とした理論解析が行われてきたが[3, 4]、サイズが有限の場合についての議論はなされていない。アンテナを実装する際はグラウンド板、誘電体板共にサイズは有限であり、漏れ波伝送線路の終端が開放の状態となる。解析では水平アンテナ素子から円筒状に伝搬する進行波のみが考慮されているが、実際の構造では開放端部において反射が生じる。そのため、基板の大きさがアンテナの利得に及ぼす影響について明らかにする必要がある。

一方、ガラスはその強度や透過性から建物や乗り物の窓などに利用されている身近な材料であり、特に我々がよく目にするソーダガラスは安価かつ比較的高誘電率で低損失な材料である。近年では、アンテナをガラス窓に設置するなど、身近な窓ガラスが高密度な5Gネットワーク構築に活用・利用されている。

本報告では、漏れ波アンテナの誘電体板としてガラ

ス板を利用することで、既存のガラス窓にグラウンド板を含めたアンテナを貼り付ける高利得アンテナが実現できることを示す。特に、ガラス板およびグラウンド板サイズの効果を考慮した設計法を提案し、その有効性について実験的に検討を加える。さらに、漏れ波ガラスアンテナの高利得設計のための設計指針を得ることを目的とする。

2. 漏れ波ガラスアンテナの設計

2.1 漏れ波ガラスアンテナの構造

図1に漏れ波ガラスアンテナの構造を示す。\$L_G\$角のグラウンド板上中央に方形パッチアンテナを配置し、その上方に \$L_D\$角のガラス板(比誘電率: \$\epsilon_r\$)を配置してアンテナを構成する。グラウンド板からのガラス板の高さを \$d\$, ガラス板の厚みを \$h\$ とすると, \$z\$ 方向にアンテナの利得を最大化させる高さ \$d\$ と厚み \$h\$ の最適値は次の(1)式, (2)式で与えられることが知られている[3].

$$d = \frac{m\lambda_0}{2} \tag{1}$$

$$h = \frac{(2n-1)\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2}$$

ここで, \$m, n\$ は正の整数, \$\lambda_0\$ は真空中の波長である。これらの式は無限大平板における数値解析により導出されているが, 有限のサイズであっても同様に適用できる[2].

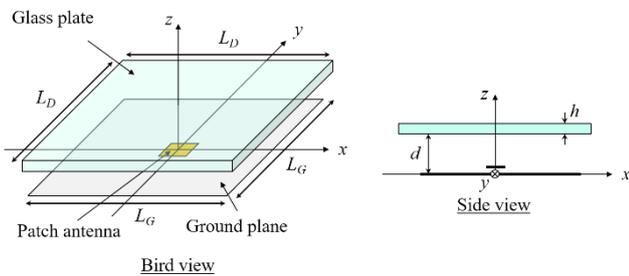


図1: 漏れ波ガラスアンテナの構造

2.2 漏れ波の実効波長を考慮した設計法

中央部のパッチアンテナから放射された電波は, グラウンド板とガラス板間で構成される漏れ波導波路を, 電波を徐々に漏らしながらアンテナ外縁部へと伝送される。ここで, ブロードサイド方向の利得を最大化させる最適条件下において, 漏れ波の減衰定数 \$\alpha\$ および位相定数 \$\beta\$ は次式で与えられる[4].

$$\alpha/k_0 \sim \beta/k_0 \sim 1/\sqrt{m\pi\epsilon_r} \tag{3}$$

ここで \$k_0\$ は真空中の波数であり \$k_0 = 2\pi/\lambda_0\$ で与えられる。モード番号 \$m\$ の漏れ波の実効波長を \$\lambda_\rho^{(m)}\$ と定義すると, \$\beta = 2\pi/\lambda_\rho^{(m)}\$ で表される。従って実効波長 \$\lambda_\rho^{(m)}\$ は次式で与えられる。

$$\lambda_\rho^{(m)} = \sqrt{m\pi\epsilon_r}\lambda_0 \tag{4}$$

(4)式より, 漏れ波の実効波長 \$\lambda_\rho^{(m)}\$ は高さ \$d\$ の条件式に係わる正の整数 \$m\$, 誘電体板の比誘電率 \$\epsilon_r\$, 真空中の波長 \$\lambda_0\$ の関数で表されることがわかる。また, 正の整数 \$m\$ は, (1)式より高さ \$d\$ のパラメータとなっているため, 正の整数 \$m\$ を大きく, すなわち高さ \$d\$ を大きくすることで漏れ波の減衰定数 \$\alpha\$ が小さくなり, より広い範囲に漏れ波が伝送され, 開口効率並びに利得の向上に繋がると考えられる。

しかし, 実際にはガラス板, グラウンド板ともに有限サイズであるため, 高さ \$d\$ を増加させて利得の向上を狙うには限界があり, 最適値が存在すると予想される。このとき, 開口電界分布について逆相となる領域を含まないようにサイズを選ぶことで利得は最大化するものと考えられる。そのため, グラウンド板の一边の長さ \$L_G\$ を漏れ波の実効波長の \$1/2\$, すなわち(1)式, (2)式, および次の(5)式を満たすように寸法を決定する。

$$L_G = \frac{\lambda_\rho^{(m)}}{2} = \frac{\sqrt{m\pi\epsilon_r}\lambda_0}{2} \tag{5}$$

ここで, ガラスの誘電率を \$\epsilon_r=6.8\$ とし, 例として \$5\$ GHz (\$\lambda_0=60\$ mm)における高さ \$d\$ に対する \$L_G\$ の最適サイズ (\$\lambda_\rho^{(m)}/2\$) を数値計算し, その結果について表1に示した。これより高さに対する最適サイズを図2に図示した。図2より例えば \$L_G=200\$ mm のとき, 高さ \$d\$ を増加させていくと \$m=2\$ (\$d=60\$ mm) で \$L_G\$ の値が最も \$\lambda_\rho^{(m)}/2\$ に近づくため, この高さで利得が最大化すると予測でき, \$d=60\$ mm が最適な設計と予想される。

表1: 数値計算による \$L_G\$ の最適値予測 (5 GHz, \$\epsilon_r=6.8\$ の場合)

\$\epsilon_r=\$	6.8	
\$f=\$	5 GHz	
\$\lambda_0=\$	60 mm	
\$d\$ [mm] \$= m\lambda_0/2\$	\$m\$	\$\lambda_\rho^{(m)}/2\$ [mm]
30	1	139
60	2	196
90	3	240
120	4	277
150	5	310
180	6	340

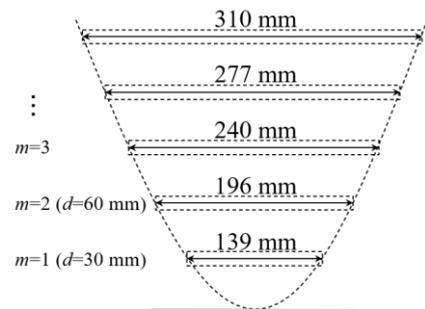


図2: 高さに対する最適サイズ予測 (5 GHz, \$\epsilon_r=6.8\$ の場合)

3. 実験結果

グラウンド板, ガラス板のサイズを $L_D=L_G$ として固定してガラス板の高さ d を変化させ利得を測定する実験を行い, 前章の(5)式を用いた提案設計手法の妥当性を検証した.

3.1 実験環境

電波暗室内に図3に示す実験系を構築し, 図4に示すような構造でZスキャナに木製治具のアームを取り付けガラス板の高さ d を変化させ, 利得を測定した.

実験では $L_D=L_G=200$ mm ($4\lambda_0@6$ GHz), および $L_D=L_G=300$ mm ($6\lambda_0@6$ GHz) の2つについて, どちらも6 GHz 付近で共振するパッチアンテナを用いた.

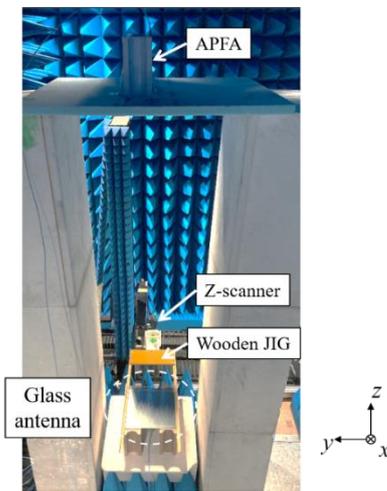


図3: 実験環境

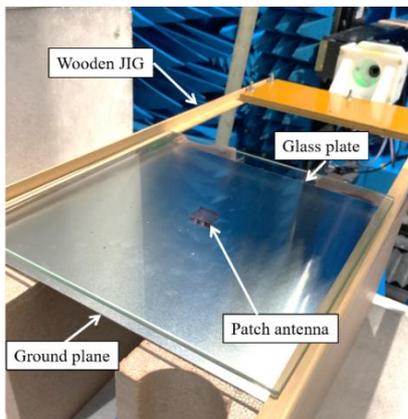


図4: 実際に構成したガラスアンテナ

3.2 指向性利得のガラス高・周波数特性

$L_D=L_G=200$ mm の場合の指向性利得の測定結果を図5に示す. 横軸はガラス板の高さ d , 縦軸は周波数から算出した真空中の波長 λ_0 であり, 濃淡で指向性利得を示している. 図5より, 利得は(1)式で表される直線に沿って上昇していることがわかる. 図中の利得が上昇している, 線状に赤くなっている部分は左側から順に

(1)式における $m=1, m=2, \dots$ に相当する直線である. 特に λ_0 が 45 mm から 65 mm 程度の範囲で利得が高く, これはガラス板の比誘電率を $\epsilon_r=6.8$ とすると, (2)式を $n=1$ としておおよそ満たしている部分であることがわかる.

$(d, \lambda_0)=(103, 50.5)$ [mm] (図中○印)において指向性利得は最大値 18.4 dBi (開口効率: 35%) をとり, $m=4$ 相当の部分で利得が最大となった.

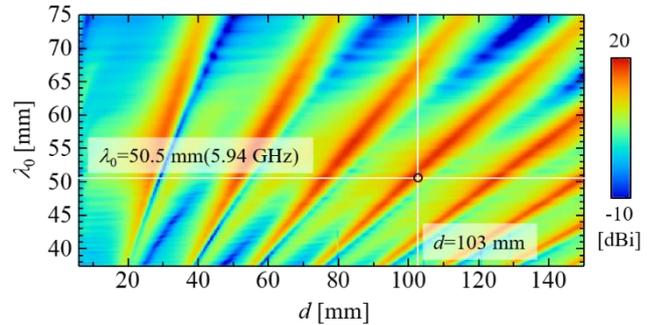


図5: 実験結果, 指向性利得 ($L_D=L_G=200$ mm)

$L_D=L_G=300$ mm の場合の指向性利得の測定結果を図6に示す. $(d, \lambda_0)=(198.5, 55.4)$ [mm] (図中○印)において指向性利得は最大値 19.3 dBi (開口効率: 23%) をとり, $m=7$ 相当の部分で利得が最大となった.

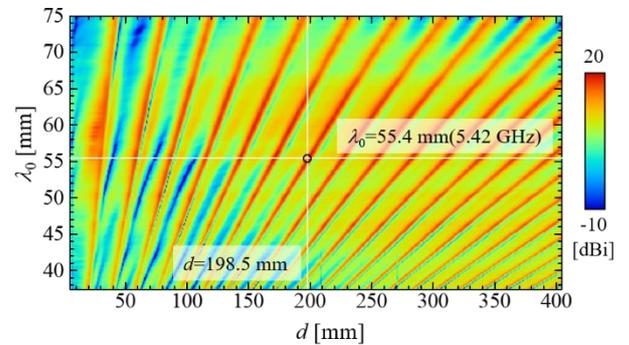


図6: 実験結果, 指向性利得 ($L_D=L_G=300$ mm)

3.3 指向性利得のガラス高特性

図7に $L_D=L_G=200$ mm で最大値をとった $\lambda_0=50.5$ mm, すなわち 5.94 GHz における指向性利得の d 特性を示す. 図5および図6において, $\lambda_0=50.5$ mm の横線で切ったグラフである. グラフの赤線が $L_D=L_G=200$ mm を表し, 黒線が $L_D=L_G=300$ mm を表す. 5.94 GHz では $L_D=L_G=200$ mm は $m=4$, $L_D=L_G=300$ mm は $m=8$ で利得が最大となっており, サイズによって利得が最大となる m の値が異なっていることがわかる.

ここで, 表2に5.94 GHzにおける数値計算による予測値を示す. $L_D=L_G=200$ mm では200 mmに最も近いのは $m=3$ における202 mmであり, これが予測値とな

るが、実験では m の値が 1 つ大きい $m=4$ で最大となっている。 $L_D=L_G=300$ mm の場合も最も近い $m=7$ における 309 mm であるが、1 つ大きい $m=8$ で最大となっていることがわかる。したがって、 $L_D=L_G=200$ mm, $L_D=L_G=300$ mm で利得が最大となる m が異なり、やや幅があるものの $\lambda_p^{(m)}/2$ となる m で利得が最大となっており、予測と一致していることがわかる。

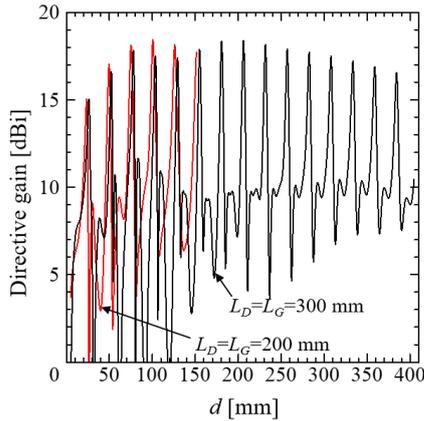


図 7: 実験結果, 指向性利得の特性($f=5.94$ GHz)

表 2: 数値計算による予測値($f=5.94$ GHz)

$\epsilon_r =$	6.8	
$f =$	5.94	GHz
$\lambda_0 =$	50.5	mm
d [mm]	m	$\lambda_p^{(m)}/2$ [mm]
25	1	117
51	2	165
76	3	202
101	4	233
126	5	261
152	6	286
177	7	309
202	8	330
227	9	350

また、図 8 に $L_D=L_G=300$ mm で最大値をとった $\lambda_0=55.4$ mm, すなわち 5.42 GHz における指向性利得の d 特性を、表 3 に 5.42 GHz における数値計算による予測値を示す。5.42 GHz では $L_D=L_G=200$ mm は $m=3$, $L_D=L_G=300$ mm は $m=7$ で利得が最大となっており、サイズによって利得が最大となる m の値が異なっている。また、表 3 から最も予測値に近い m の値より 1 つ大きい m でそれぞれ利得が最大となっており、同様におおよそ予測と一致していることがわかる。

以上の結果より、利得が最大となる m の値はおおよそ予測と一致することが確認できた。しかし、最も近い予測値の m より 1 つ大きい m の値で利得が最大と

なり、若干ではあるが予測にずれが生じていた。中央部で励振されたパッチアンテナから円筒状に漏れ波が伝搬していくのに対して、実験では方形状のガラス板およびグランド板を用いている。そのため、例えば方形板の頂点まで初めに到達した時点で辺の部分では既に反射が発生してしまっている。したがって、漏れ波の実効波長が正しく定義できないということがずれの主な原因として考えられる。

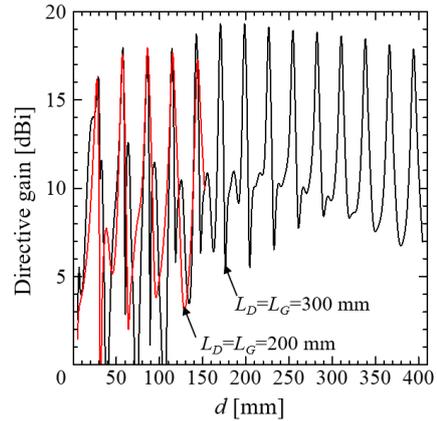


図 8: 実験結果, 指向性利得の d 特性($f=5.42$ GHz)

表 3: 数値計算による予測値($f=5.42$ GHz)

$\epsilon_r =$	6.8	
$f =$	5.42	GHz
$\lambda_0 =$	55.4	mm
d [mm]	m	$\lambda_p^{(m)}/2$ [mm]
28	1	128
55	2	181
83	3	222
111	4	256
138	5	286
166	6	313
194	7	338
221	8	362
249	9	384

4. まとめ

本報告では、ミリ波帯への適用が期待される誘電体漏れ波アンテナについて、誘電体板にガラス板を適用し、有限サイズの効果を考慮した利得最大化の設計法について提案し、その有効性について実験的に検討を行った。高さ d の正の整数パラメータ m を増加させることで漏れ波の伝搬定数が変化する。このときの最大値は正方形グランド板の一辺の長さ L_G が数値計算により得られた漏れ波の実効波長 $\lambda_p^{(m)}$ の 1/2 となると予測されるという指針を得た。C バンド帯において 2 つのグランド板およびガラス板のサイズの組み合わせについて、ガラス板の高さ d を変化させ利得を測定

する実験を行い，結果，利得が最大化する高さ d は数値計算による予測とおおよそ一致し，有意な結果が得られた．また，実験的に 20 dBi に迫る高い指向性利得を実現することができた．

文 献

- [1] Y. She, J. Hirokawa and M. Ando, “Millimeter-wave transmission-loss evaluation of microstrip lines and post-wall waveguides and effects on efficiency of post-wall waveguide slot arrays,” 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Charleston, SC, pp. 1-4, 2009.
- [2] 西村貞彦，仲西秀基，杉尾嘉彦，牧本利夫，“利得増加用誘電体板付平面アンテナ,” 信学技報, A・P80-111, pp.1-6, 1981.
- [3] 杉尾嘉彦，牧本利夫，西村貞彦，仲西秀基，“誘電体板付加反射板付線状アンテナの利得増加に関する解析,” 信学技報, A・P80-112, pp.7-12, 1981.
- [4] D. R. Jackson and A. A. Oliner, “A Leaky-Wave Analysis of the High-Gain Printed Antenna Configuration,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 36, no. 7, pp. 905-910, 1988.