

# ガラス板を用いたアレーアンテナ設計法の研究

長江 眞平, 佐藤 弘康, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科)  
加賀谷 修, 佐山 稔貴 (AGC 株式会社)

**概要:** 本稿では, 5G 高速通信用アンテナとして, ガラス基板を用いたパッチアンテナアレーを設計した結果を報告する. 基板厚さを変更した場合の反射係数と指向性の変化について述べつつ単素子パッチアンテナを設計し, これを H 面に 8 素子配置することで  $8 \times 1$  の 8 素子のアンテナアレーを構成している. アレー間隔を変更したときのグレーティングローブとスキャンパターンを評価し,  $40 \text{ deg.}$  のスキャン角度を実現し, 正面利得で  $13.5 - 16.6 \text{ dBi}$  を達成した.

キーワード: 5G, パッチアンテナ, ガラス基板

## 1. まえがき

近年, 第 4 世代通信(4G)に代わる新たな通信システムとして第 5 世代高速通信(5G)の研究が盛んに行われている[1]. 5G 通信の候補バンドとしては高周波数帯(高 SHF 帯:6 GHz 以上, EHF 帯:30 GHz ~程度)が検討されており[2], 特に 28 GHz 帯は最も有力な候補として注目されている. 28 GHz 帯は数百 MHz の広帯域が使用できることから安定した高速通信の実現が期待される一方, 大きく 2 つの問題が考えられている. 一つは, 直進性や伝播損失の大きさという点で, アンテナの大規模なアレー化とビーム走査によりこれを補償することが求められている. もう一つは, 特に市街地においてアンテナの設置場所がひっ迫している点で, 景観を損ねずに中低階層に設置できるアンテナが求められている.

これら 2 つの課題を解決するアンテナとして本研究ではガラスアンテナを提案する. これによりビルなどの建物の窓ガラスに備え付けることで設置場所と景観の問題を解決[3]し, 合成石英ガラスを用いることで誘電損失を小さくすることができると考えられている.

ガラスアンテナは車載を目的としてフロントガラスのバックミラー裏側に張り付けるオンガラスアンテナ[4]や, ガラスに埋め込む線状アンテナ[5]といったものが注目されてきた. これらは UHF 帯以下の周波数での研究が主であるが, 他方でミリ波帯の通信を目的として, ガラスを誘電体基板と見なしたパッチアンテナ[6]やスロットアンテナ[7]といったものも提案されている. しかし, 大規模なアレー化の検討はなされてこなかった.

一方, 5G 通信用アンテナとしては直列給電アレーを用いた多素子のパッチアンテナアレーが提案されている[8-9]が, 一般的な樹脂製の基板を用いた検討が主であった.

そこで, 本稿ではガラス基板を用いた多素子パッチアンテナアレーの基礎データ (利得, ビームフォーミング, 帯域) を得るために, ガラス基板に実装した 8 素子パッチアンテナアレーを設計した結果について報告する.

## 2. 単素子ガラスアンテナの設計

本章ではガラス基板を用いた単素子パッチアンテナの設計について述べていく.

ガラス基板を用いる都合上, 基板に穴をあける必要のある背面給電は望ましくないことから, 今回はマイクロストリップ線路を用いた共平面給電方式を用いたアンテナを提案する.

設計は電磁界解析ソフト(SEMCAD-X, FDTD 法)を用いた数値シミュレーションにより行った.

### 2-1. 単素子ガラスアンテナの構造

単素子ガラスアンテナの構造を図 1 に示す.

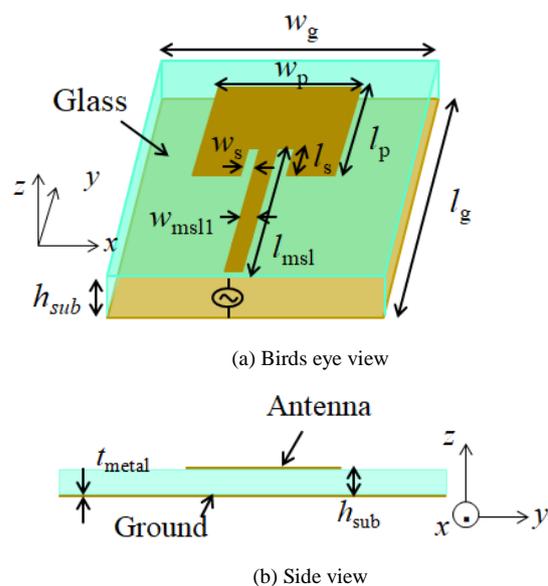


図 1: 単素子ガラスパッチアンテナの構造

所望の周波数帯で使用するため、図1のパラメータのうち特に給電マイクロストリップ線路の幅  $w_{msl}$ 、放射素子への差し込み長  $l_s$  を変化させることでインピーダンス整合を実現する。また基板厚さ  $h_{sub}$  によって実効波長が変化することから、重要なパラメータであると考えられるため、次節では基板厚さに注目した設計について述べる。

### 2-2. 基板厚さを変化した設計

一般に、マイクロストリップ線路の実効波長  $\lambda_g$  は周波数  $f$ 、基板の比誘電率  $\epsilon_r$ 、線路の幅  $w$ 、導体の厚さ  $t$ 、そして基板の厚さ  $h$  によって算出されることが知られており、次の式(1)から(4)によって表せる。

$$\lambda_g(f) = \frac{v_p(f)}{f} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_{r,eff}(f)}} \quad (1)$$

$$\text{但し} \begin{cases} \epsilon_{r,eff}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{r,eff}(0)}{1 + \frac{\epsilon_{r,eff}(0)}{\epsilon_r} \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} & (2) \\ \epsilon_{r,eff}(0) = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w_{eff}(0)}\right) : \frac{w_{eff}(0)}{h} > 1 & (3) \\ \frac{w_{eff}(0)}{h} = \frac{w}{h} + \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{2h}{t}\right) : \frac{w}{h} \geq \frac{1}{2\pi} & (4) \end{cases}$$

(1)式がある周波数における実効波長を表す式であり、(2)-(4)式はそれぞれある周波数での実効誘電率、0 Hz の時の実効誘電率、線路の実効幅を表す式となっている。(3)、(4)式は条件付きであるため以降は必ずこれを満たす場合について述べていく。

上式を基に実効波長と基板厚さの関係を図2に示す。今回のような高周波数帯では基板厚さが 0.1 mm 単位で変化することで実効波長が 0.01 mm 単位で変化することが分かる。

この結果から、基板厚さを 0.3 - 0.5 mm まで変化した場合のアンテナのインピーダンスと放射パターンを解析した結果を図3、4にそれぞれ示す。

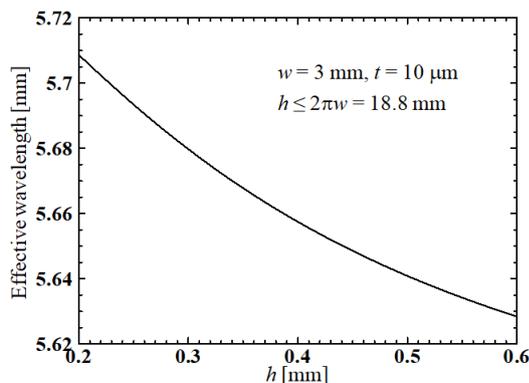


図2: 基板厚さ  $h$  と実効波長  $\lambda_g$  の関係

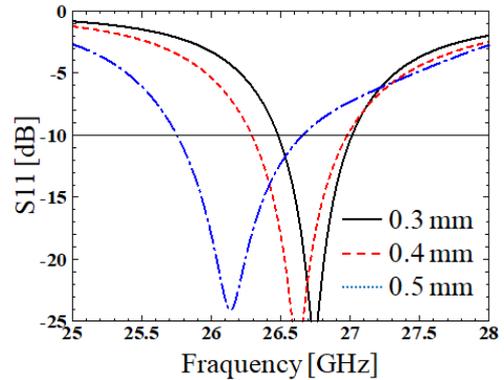


図3: 基板厚さに対する反射係数の周波数特性

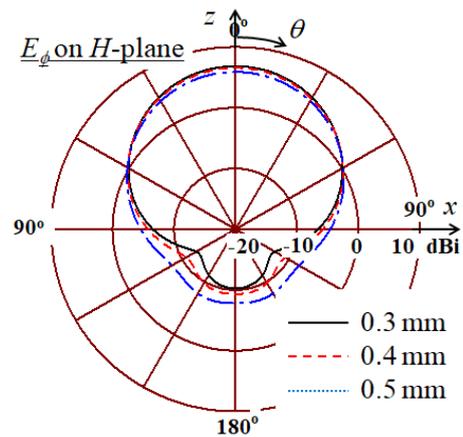


図4: 基板厚さに対する H 面放射パターン

反射係数はここでは数百 MHz 単位で変化していることが分かる。この変化は給電線路が長くなるほど顕著に表れるため、実際の設計では整合回路を使うなどの工夫が望まれる。放射パターンは基板が厚くなるほど、つまり実効波長が短くなるほどバックローブが大きくなると分かる。5G 通信向けの指向性が強いアンテナを考えた時、FB 比をなるべく良くすることは重要であるため、厚さごとに放射素子長を適切に定める必要があるといえる。

### 3. 8 素子アレーの設計

本章では2章で設計したアンテナを H 面 8 素子アレーに拡張した場合に得られるアレー利得及びビーム走査角度について述べていく。ここでは前章で FB 比が最もよかった基板厚さ 0.3 mm モデルのアレー化を考え、その構造を次項表1及び図5に示す。

表1の通り、アレー間隔  $d_x$  を  $0.5 \lambda_0$  から  $1.0 \lambda_0$  まで変化した場合の H 面スキャンパターンについて考える。

表：8素子アレーのパラメータ (抜粋)

$d_x$	$0.5 \lambda_0$	$0.7 \lambda_0$	$1.0 \lambda_0$
$W$	$4.7 \lambda_0$	$5.6 \lambda_0$	$7.5 \lambda_0$

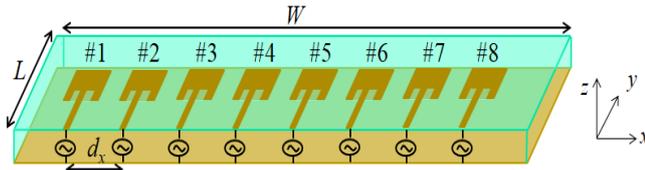


図5：H面8素子アンテナアレーの構造

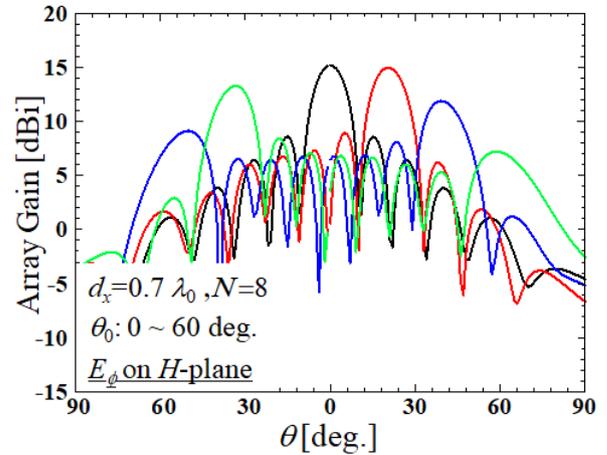
スキャンパターンはアレーファクタと各素子のアレー素子パターン $g_n(\theta, \phi)$ を用いて次式(5)で表される.

$$E(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} g_n(\theta, \phi) I_n e^{j(n-1)kd_x \sin \theta_0} e^{j(n-1)kd_x \sin \theta} \quad (5)$$

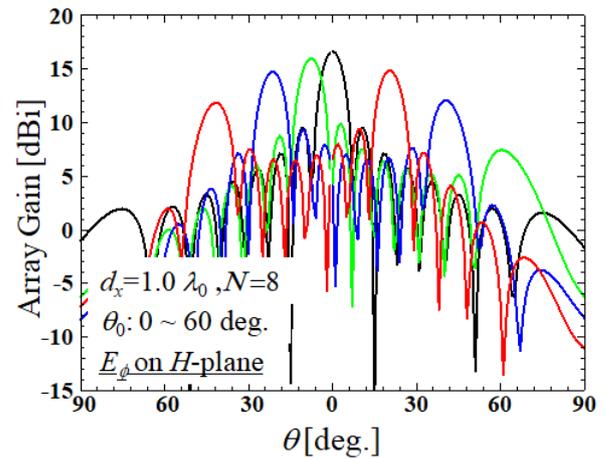
ここで $N$ は素子数、 $n$ は素子番号、 $k$ は真空中の波数、 $\theta_0$ は所望のスキャン角度、 $I_n$ は励振電流の振幅である.

この式では励振電流を同振幅と仮定して考えるので、 $I_n e^{j(n-1)kd_x \sin \theta_0}$ の部分では各素子に与える給電位相差のみを考慮している. しかし、この式は素子間結合の影響を考慮していないため、[10]にて示されている手法により相互結合を考慮した励振電流を求めることでより正確な計算を行っている.

上述のことを踏まえたスキャンパターンの計算結果は図6に示す通りである.

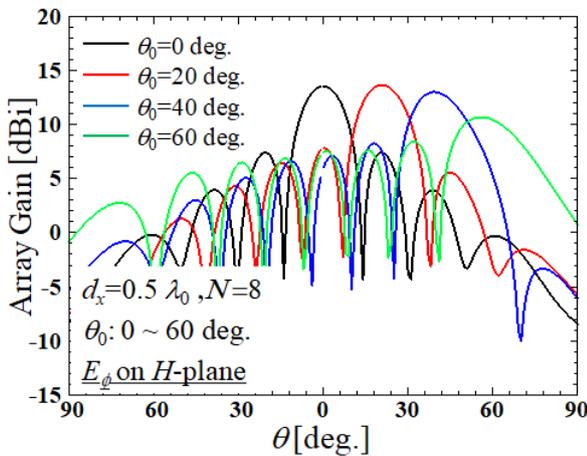


(b)  $d_x = 0.7 \lambda_0$



(c)  $d_x = 1.0 \lambda_0$

図6：アレー間隔ごとのスキャンパターン



(a)  $d_x = 0.5 \lambda_0$

正面利得は(a)から(c)の場合でそれぞれ 13.5 dBi, 15.2 dBi, 16.6 dBiであった. スキャン角度は 40 deg. 程度までは所望通りにビーム走査が可能であることが分かった.

アレー間隔が広がるほどアンテナの開口面積が広がるため、利得が上昇している一方、グレーティングローブが現れてしまうことが分かる. 利得はアレーの素子数を増やせば補うことができるが、グレーティングローブによる意図しない方向への放射はなるべく抑圧すべきであるため、グレーティングローブが出ない程度のアレー間隔で設計を行うか、一般的なアレーアンテナと同様励振分布を工夫するなどの措置が必要になると考えられる.

本稿では 1 次元アレーのみを考えているが、将来的な大規模アレー化を目指す場合には 2 次元アレー化が必須となる. その際には給電線路の配置や位相器をどう実装するかなどの問題も考えられる. 特に前者は高周波帯での高誘電・導体損失が大きく影響

してくることが予想されるため、線路長をなるべく短くするなど構造面で損失を小さくする工夫が今後重要になってくるといえるだろう。

#### 4. まとめ

本稿では 5G 通信向けのガラスアンテナアレーを実現するための基礎データを得た。基板の厚さの僅かな変化により、インピーダンス及び FB 比が変化することを示し、また 8 素子アレー化した場合に正面利得 13.5 - 16.6 dBi を達成し、40 deg.程度のビーム走査が可能であることを示した。

#### 参考文献

- [1] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?" IEEE J. Sel. Areas Commun. vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- [2] 総務省, "第 5 世代移動通信システムの検討状況について," 情報通信審議会 新世代モバイルシステム委員会, 2017 年 1 月 31 日
- [3] [http://www.agc.com/news/detail/1198104\\_2148.html](http://www.agc.com/news/detail/1198104_2148.html)
- [4] M. Cerretelli, P. Facchini and A. Notari, "Automotive glass antenna for worldwide cellular phone coverage," Proc. of the 5<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propag., pp. 249-252, 2011
- [5] H. Tazi and T. H. Eibert, "Approaches based on the method of moment of glass automotive antennas," Asia-Pacific Microwave Conference Proc., pp.1941-1944, 2011
- [6] Ching Kuan Lee *et al.*, "Antennas on Glass for 60 GHz WiGig application," ICEP-IAAC 2018 Proceedings, pp. 176-179, 2018
- [7] R. Hosono *et al.*, "70 GHz Band Corporate-Feed Array Antenna with Multi-Layered Glass Substrate," IEEE APSURSI, pp. 799-800, 2016
- [8] M. K. Ishfaq *et al.*, "8x8 Phased Series Fed Patch Antenna Array at 28 GHz for 5G Mobile Base Station Antennas," IEEE-APS APWC, pp. 160-162, 2017
- [9] T. Varum *et al.*, "Planar microstrip series-fed array for 5G applications with beamforming capabilities," IEEE MTT-S IMWS-5G, pp. 1-3, 2018
- [10] I. J. Gupta and A. A. Ksienski, "Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Arrays," IEEE Trans. Antenna Prog. Vol. AP-31, no. 5, Sep. 1983