

Millimeter-Wave Slotted Waveguide Array Antenna for Automotive Radar System

Kunio Sakakibara, Toshiaki Watanabe, Kazuo Sato, Kunitoshi Nishikawa

要 旨

生産性に優れた構造を有する自動車レーダ用のミリ波帯導波管スロットアレイアンテナを新たに開発した。スロット素子を導波管の狭壁に配置し、導波管内を流れる電流が小さくなる広壁の中央部分で2つの部品を分割し、接合する構造としているため、互いに密着する必要がない。さらにスロット素子の配列を制御し、スロット素子の周囲に円筒キャビティを配置することで、従来のように導波管内に誘電体材料を挿入することなく、グレーティングローブと呼ばれる不要放射を抑圧することを可能とした。設計したアンテナをマグネシウムの金属射出成型を用いて試作し、測定した結果、76GHzにおいて55%のアンテナ効率を達成できた。この値は従来のミリ波アンテナに比べ、最も高い。金属の切削加工により製作した同じ構造のアンテナと同一の高い効率が得られており、提案したアンテナの有効性を確認することができた。

キーワード スロットアンテナ, 導波管アンテナ, ミリ波アンテナ, 自動車レーダ, 金属射出成型

Abstract

A novel millimeter-wave slotted waveguide array antenna has been developed for automotive radar systems. An antenna structure suitable for mass-production is proposed in this paper. The waveguide is composed of two parts; an upper plate and a bottom plate. It is not necessary to contact closely them because they are divided at the center of the broad wall of the waveguide where the electric current is small. In addition, grating lobes are suppressed by using a cylindrical cavity around each slot and by controlling the slot arrangement without using dielectric material in the waveguide. We have fabricated the proposed antenna by metal injection molding. The measured antenna efficiency is 55 %, which is quite high in comparison with any other conventional low cost millimeter-wave antennas. This efficiency is almost the same as that of the antenna fabricated by precision metal machining. In this study, it is confirmed that the proposed antenna could be manufactured at a low cost.

Keywords Slot antenna, Waveguide antenna, Millimeter-wave antenna, Automotive radar, Metal injection molding

1. まえがき

近年、自動車レーダ用のミリ波帯電子走査アンテナの開発が進められている¹⁻⁴⁾。車両への搭載を考えると、平面構造を有し、小型でしかも高利得な特性、すなわち高いアンテナ効率を有するアンテナが必要となる。さらに、製造コストも重要な要素の一つである。しかしながら、従来報告されているアンテナ⁵⁻⁹⁾ではこれらの要求を十分に満たすものは報告されていない。誘電体レンズアンテナは高いアンテナ効率を実現できるが、平面構造にすることが困難である⁵⁾。

マイクロストリップアンテナは平面構造、低コストを実現できるが、高いアンテナ効率を実現できていない^{6,7)}。導波管スロットアレイアンテナはミリ波帯ではアンテナの寸法を小さくでき、給電線路の伝送損失をマイクロストリップアンテナに比べて低くできるため、平面構造でしかも高いアンテナ効率を実現できる⁸⁾。しかしながら、従来の切削加工などの手法では製造コストを低く抑えることができない問題がある⁹⁾。

当所ではFig. 1に示す導波管アレイアンテナを用いた自動車レーダシステムを提案し、開発を進めて

いる。各サブアレイアンテナで受信された信号をデジタル信号処理し、 xy 面、すなわち水平面で電子的に指向性を走査する。RF回路とビーム形成回路はFig. 1(b)に示すようにアンテナの背面に密着して配置し、平面構造を実現している。さらに、製造コストを低減するため、マグネシウムの金属射出成型技術¹⁰⁾を用いて導波管スロットアンテナとRF回路などのシールドケースとを一体で成型する構造としている。

さらに、他の問題として、斜め45度偏波のスロット素子を有する導波管スロットアンテナでは、素子は1自由空間波長の間隔に配置する必要がある。しかしながら、導波管スロットアンテナでは、管内波長が自由空間波長より長くなるため、グレーティングローブと呼ばれる不要放射が発生する。一般には、管内に誘電体を挿入し、グレーティングローブの発生を防いでいる。しかしながら、アンテナの製造コストが高くなることや、ミリ波帯では誘電体による損失が大きくなるため、アンテナの効率が低下する問題がある。ここではスロット素子に円筒キャビティを装荷することによりグレーティングを抑圧することを考えた。

以下、本文では2章において、自動車レーダ用に金属射出成型に適した構造のミリ波帯導波管スロットアレイアンテナを提案し、アレイアンテナの配列や円筒キャビティの設計について述べる。さらに、3章では試作したアンテナの76GHz帯におけるアンテナ特性について述べる。

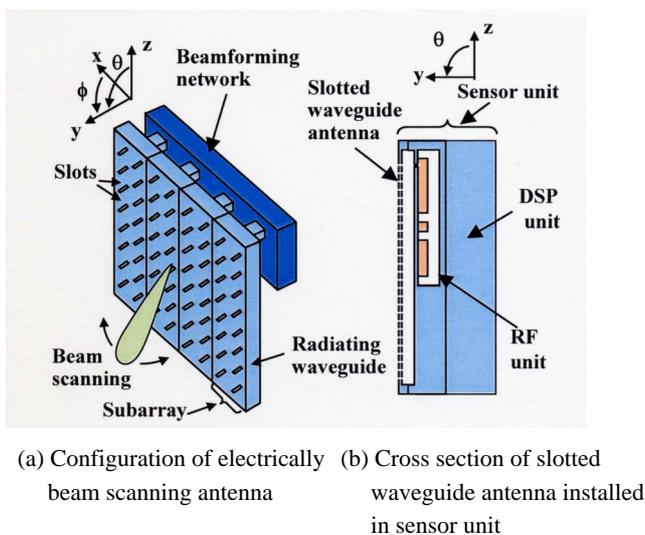


Fig. 1 Electrically beam scanning radar system using slotted waveguide array antenna.

2. アンテナの設計

2.1 アンテナの構造

提案する導波管スロットアレイアンテナの構造をFig. 2(a), (b) および(c)に示す。サブアレイアンテナは平行に配置された2本の放射導波管から構成され、小型の電力分配器によってアンテナの背面より給電されている。放射導波管の狭壁上に、管軸から45度傾いた角度でスロット素子が配置されており、アレイを構成している。ここでは、グレーティングローブを抑圧するため、スロット素子の周囲には円筒キャビティを配置している。円筒キャビティの設計については、2.2.2で詳細に述べる。また、放射導波管の端部には整合用のスロット素子を設けている。本アンテナは、射出成型に適した構造とするため、導波管構造を構成する2つの部品、すなわち上板および下板により構成し、それらを貼り合わせる構造としている。従来および提案する導波管スロットアンテナの分割の方法をFig. 3(a)および(b)に示す。従来の導波管スロットアンテナは導波管の広壁にスロット素子を配置していたため、Fig. 3(a)に示すように管内を流れる電流の強いところで導波管を分割しなければならなかった。この場合、2つの部品を密着して貼り合わせないとその隙間から電力が漏れるため、伝送損失が著しく増加し、アンテナの効率が低下する問題があった。そのため、接合部をろう付けや溶接などする必要があり、製造コストが高くなってしまふ。提案する導波管スロットアンテナは導

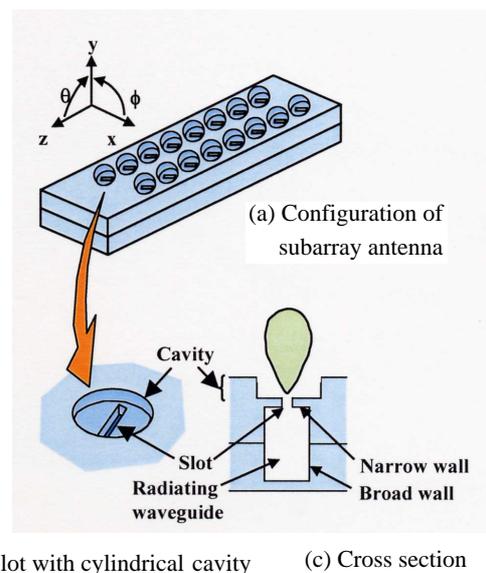


Fig. 2 Proposed slotted waveguide subarray antenna with cylindrical cavities.

波管の狭壁面にスロット素子を設けており，広壁の中央部分で貼り合わせる構造とした。この場合，管内を流れる電流を横切らない面で導波管を分割することができ，密に接合しなくても伝送損失は小さくできる。その結果，高いアンテナ効率を実現できると考えられる。

2.2 円筒キャビティ付スロット素子とその配列の設計

2.2.1 スロット素子配列

グレーティングローブの方向はスロット素子の配列によって制御できる。サブアレイアンテナのスロット配列をFig. 4に示す。導波管の広壁および狭壁がそれぞれ $0.66\lambda_0$ および $0.41\lambda_0$ の場合，アレイのz方向のスロット素子間隔 SS_z は $1.25\lambda_0$ となる。ここで λ_0 は自由空間波長を示す。提案のアレイアンテナは，給電点における反射損特性を改善するため，ビーム

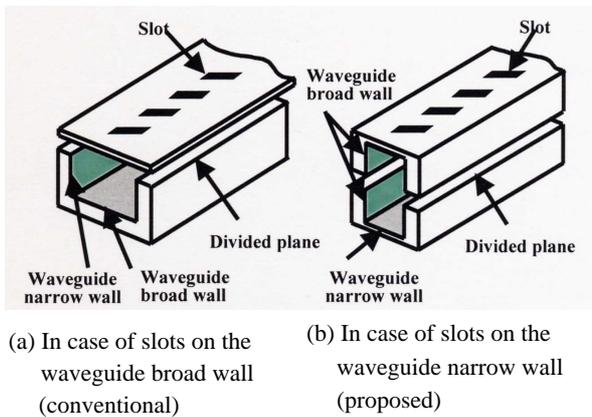


Fig. 3 Configuration of radiating waveguide.

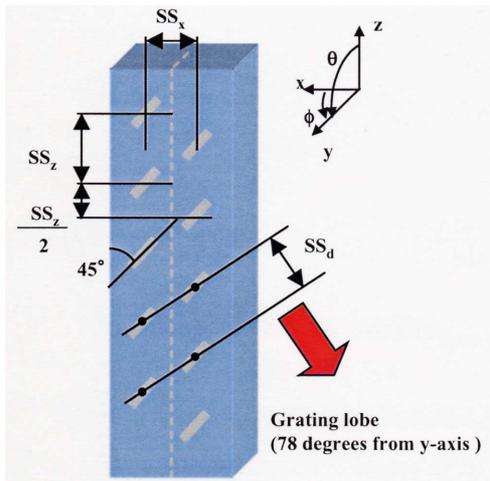


Fig. 4 Slot arrangement of subarray which consists of two lines of linear arrays ($SS_x = 0.87\lambda_0$, $SS_z = 1.25\lambda_0$, $SS_d = 1.01\lambda_0$, λ_0 : wavelength in free space).

方向を5度傾けている。サブアレイアンテナは2本の放射導波管で構成されており，互いに180度位相を反転して給電している。スロット素子はz軸方向において，半波長間隔で配置されることになるため，yz面においてグレーティングローブは現れない。x方向のスロット素子間隔 SS_x は，スロット素子を狭壁に配置できているので， $0.84\lambda_0$ と $1\lambda_0$ より狭くグレーティングローブは生じない。三角配列においては斜め方向の素子間隔が最も広くなり，この場合，最大の素子間隔 SS_d は $1.01\lambda_0$ になる。したがって，提案のアレイアンテナでは，従来のスロット素子を利用すると，グレーティングローブが生じてしまい，そのためメインローブの利得が低下する。

2.2.2 円筒キャビティ

スロット配列だけではグレーティングローブを抑圧することができない。そこで，このグレーティングローブを抑圧するため，スロット素子の周囲に円筒形のキャビティを配置することを考えた。スロット素子の垂直面内の素子パターンは無指向性であるが，円筒キャビティにより素子パターンのビーム幅を狭くすることができる。円筒キャビティはサブアレイの利得が最大になるようにその高さと直径を設計した。76.5GHzにおいて円筒キャビティの高さと直径に対する利得の変化を測定した結果をFig. 5(a)および(b)に示す。円筒キャビティがない場合の利得を0dBとしている。Fig. 5(a)よりキャビティの高さが0.25波長以下の領域において利得はキャビティの高

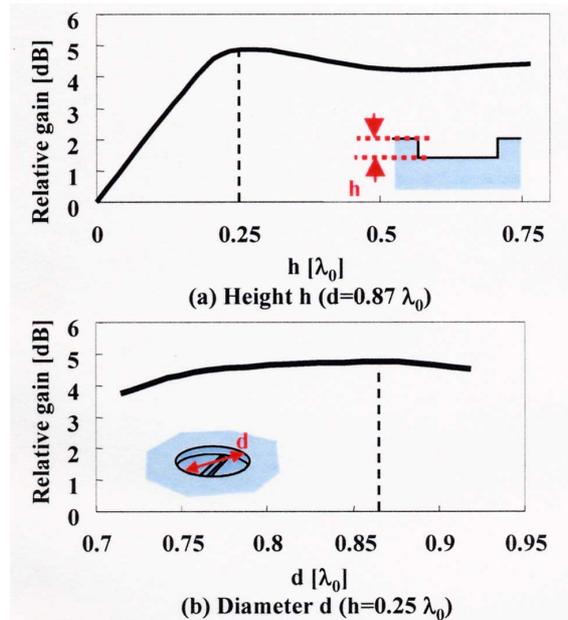


Fig. 5 Variation of gain versus height h and diameter d of cylindrical cavity.

さに大きく依存することがわかる。キャビティの高さを0.25波長、直径を0.87波長とした時に最大で4.9dBの利得の増加が得られる。

3. 導波管スロットサブアレイアンテナの特性

この章では試作した導波管スロットサブアレイアンテナの特性について述べる。提案したアンテナがミリ波帯において高いアンテナ効率を有することを検証するため、2種類のアンテナを試作し、アンテナ特性を測定した。一つはFig. 6の写真に示すマグネシウムの金属射出成型により試作したアンテナ、他の一つはアルミニウムの切削加工により試作した同一形状のアンテナである。以下、それぞれIMA (Injection Molded Antenna) およびMCA (MaChined Antenna) と呼ぶ。試作したサブアレイアンテナは26

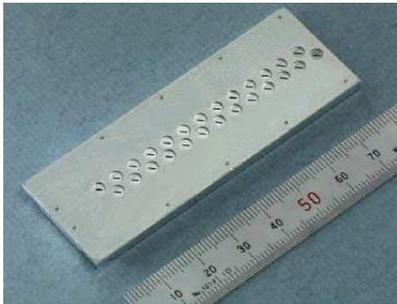


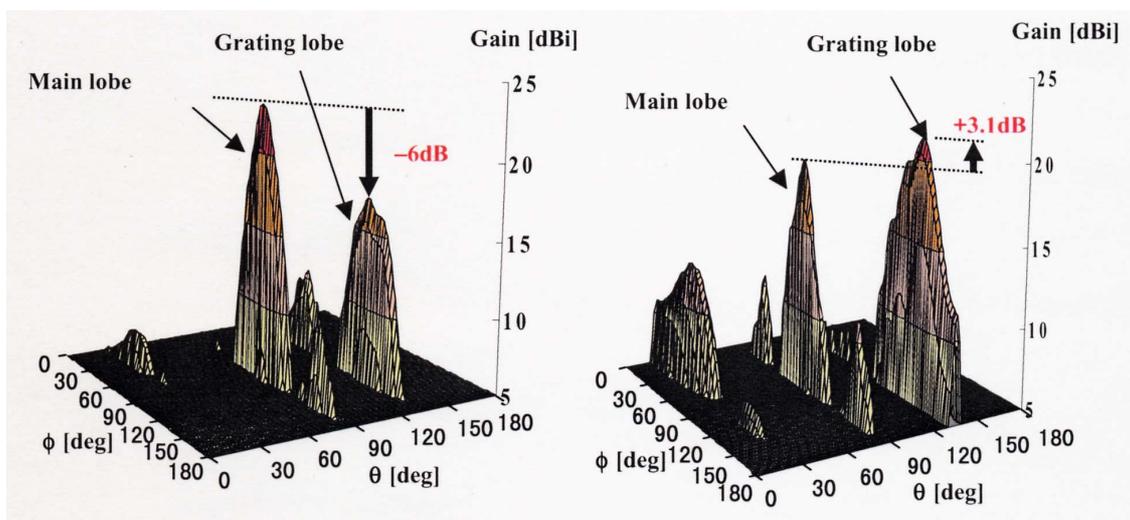
Fig. 6 Proposed slotted waveguide subarray antenna fabricated by metal injection molding of magnesium alloy.

のスロット素子を有する。なお、マグネシウムとアルミニウムの導電率の違いによる損失は無視できるほど小さい。

円筒キャビティがある場合とない場合のMCAの2次元指向性パターンをFig. 7(a)および(b)にそれぞれ示す。測定周波数は76.5GHzである。Fig. 7(b)より円筒キャビティがない場合、 $\theta = 135$ 度、 $\phi = 148$ 度方向にグレーティングローブが発生している。グレーティングローブのレベルは21.3dBiであり、メインローブより3.1dBも高い。一方、Fig. 7(b)に示す円筒キャビティがある場合、グレーティングローブのレベルはメインビームと比較して6dB低いことがわかる。この結果より、円筒キャビティによりグレーティングローブが抑圧され、メインビームの利得が向上することが確認できた。

次に、75.5GHzから77.5GHzの周波数帯において円筒キャビティを有するIMAおよびMCAの利得を測定した結果をFig. 8に示す。また、利得より換算したアンテナ効率を示す。実線はIMAの特性、点線はMCAの特性である。76.5GHzにおいてIMAの利得および効率は23.1dBiおよび54%、MCAの利得および効率は23.2dBiおよび55%となり特性にほとんど差はない。この結果より、ミリ波帯において55%という従来にない高い効率が達成できたこと、および射出成型でも従来の切削加工と同等なアンテナ特性が得られることが確認できた。

Fig. 9にIMAのyz面の指向性の測定および計算値を示す。メインビームはアンテナの給電点における



(a) With cylindrical cavity

(b) Without cylindrical cavity

Fig. 7 Measured two dimensional radiation patterns of machined antennas (MCAs).

反射損を改良するためy軸より5度ビーム方向を傾けている。電力半値幅は3.4度であり、サイドローレベルは-17dBと十分低い値を実現できている。測定値と計算値はよく一致しており、2章で述べた設計手法の有効性を確認できた。次に円筒キャビティがある場合とない場合のIMAの z 面における指向性パターンをFig. 10に示す。キャビティの効果によりサイドローレベルは-8dBから-13dBに5dB改善している。またメインローブの指向性の対称性も向上している。電力半値幅は23.2度である。一方、アンテナの給電点における反射損特性は76.5GHzにおいて

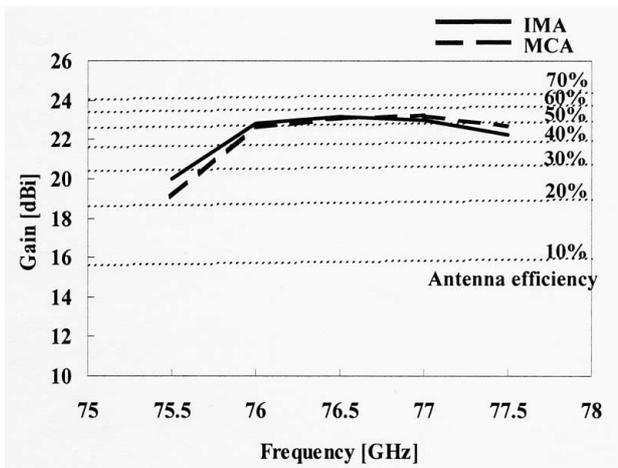


Fig. 8 Measured gain and antenna efficiency of machined antenna (MCA) and injection molded antenna (IMA).

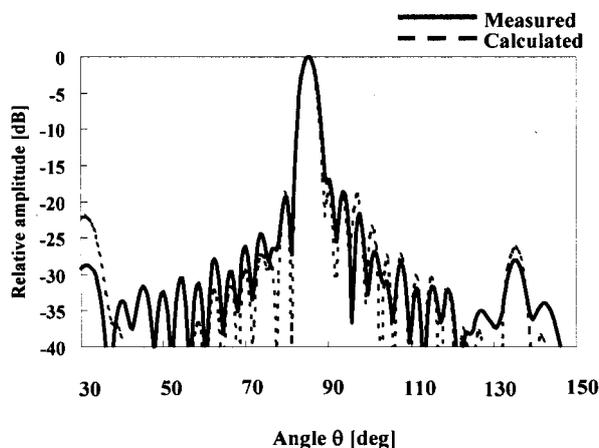


Fig. 9 Measured and calculated radiation patterns of injection molded antenna (IMA) with cylindrical cavities in yz -plane ($\phi = 90$).

-21dBであり、反射損によるアンテナ効率の低下はほとんどない。自動車レーダで利用される周波数帯76~77GHzにおいても-16dBと十分小さいことが確認できた。

4. まとめ

生産性に優れた構造を有する自動車レーダ用のミリ波帯導波管スロットアレイアンテナを新たに提案した。スロット素子を導波管の狭壁に配置し、導波管内を流れる電流が小さくなる広壁の中央部分で2つの部品を分割し、接合する構造としているため、互いに密着する必要がない。さらに、スロット素子の周囲に円筒キャビティを配置することで、従来のように導波管内に誘電体材料を挿入することなく、グレーティングローブを抑圧することを可能とした。

マグネシウムの金属射出成型を用いて提案したアンテナを試作し、測定した結果、76GHzにおいて55%のアンテナ効率を達成できた。この値は従来の低コスト構造のミリ波アンテナに比べ、最も高い。金属の切削加工により製作した同じ構造のアンテナと同等の高い効率が得られており、提案したアンテナの有効性を確認することができた。

参考文献

- 1) Meinel, H. H. : "Commercial Applications of Millimeterwaves History, Present Status, and Future Trends", IEEE Trans. on MTT, 43-7(1995), 1639-1653
- 2) Russell, M. E., Crain, A., Curran, A., Campbell, R. A., Drubin, C. A. and Miccioli, W. F. : "Millimeter-wave Radar Sensor for Automotive Intelligent Cruise

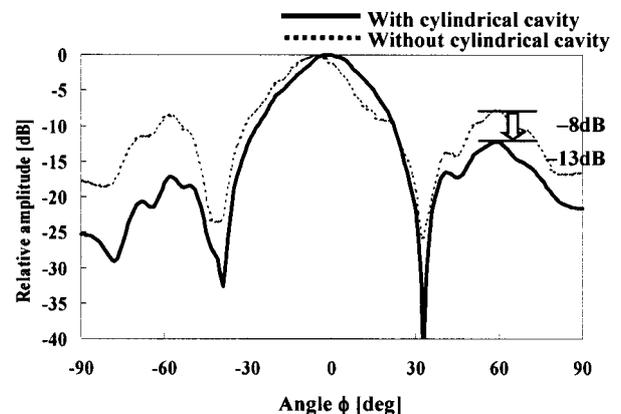


Fig. 10 Measured radiation patterns of injection molded antennas (IMAs) with and without cylindrical cavities in xy -plane ($\theta = 90$).

- Control (ICC) ", IEEE Trans. on MTT, 45-12(1997), 2444-2453
- 3) Siweris, H. J., Werthof, A., Tischer, H., Schaper, U., Schafer, A., Verweyen, L., Grave, T., Bock, G., Schlechtweg, M. and Kellner, W. : "Low-Cost GaAs pHEMT MMIC's for Millimeter-Wave Sensor Applications", IEEE Trans. on MTT, 46-12(1998), 2560-2567
- 4) Chang, K. W., Wang, H., Shreve, G., Harrison, J., G., Core M., Paxton A., Yu M., Chen C. H. and Dow G. S. : "Forward-Looking Automotive Radar using a W-Band Single-Chip Transceiver", IEEE Trans. on MTT, 43-7(1995), 1659-1668
- 5) Kitamori, N., Nakamura, F., Hiratsuka, T., Sakamoto, K. and Ishikawa, Y. : "High-ε Ceramic Lens Antenna with Novel Beam Scanning Mechanism", Proc. of ISAP 2000, Fukuoka Japan, (2000), 983-986
- 6) Huang, J. : "A Ka-Band Circularly Polarized High-Gain Microstrip Array Antenna", IEEE Trans. on AP, 43-1(1995), 113-116
- 7) Weiss, M. A. : "Microstrip antennas for Millimeter Waves", IEEE Trans. on AP, 29-1(1981), 171-174
- 8) Sakakibara, K., Watanabe, T., Sato, K., and Nishikawa, K. : "Center-Fed Slotted Waveguide Linear Array Antenna", 1998 Korea-Japan AP/EMC/EMT Joint Conf. Proc., Pusan, Korea, (1998), 38-40
- 9) Sakakibara K., Hirokawa, J., Ando, M. and Goto, N. : "Single-layer Slotted Waveguide Arrays for Millimeter Wave Application", IEICE Trans. Commun., E79-B-12(1996), 1765-1772
- 10) Yamaguchi, T., Tsukeda, T., and Saito, K. : "Thixomolding of Magnesium Alloys", 6th Jpn. Int. SAMPE Symp. & Exhibition, Tokyo, Japan, (1999)
- 11) Baggen, L., Goebel, U., Simon, W. and Heberling, D. : "FDTD-Based Design of Innovative Slotted Waveguide Antennas", AP2000 Millennium Conf. on Antennas & Propagation Digest, Davos, Switzerland (2000)
- 12) Johnson, R. C. and Jasik, H. : Antenna Engineering Handbook,(1984), Chap. 9, McGraw-Hill, New York
(2001年4月12日原稿受付)

著者紹介



榊原久二男 Kunio Sakakibara

生年：1968年。

所属：情報通信研究室。

分野：移動体アンテナの研究。

学会等：電子情報通信学会, IEEE 会員
工学博士。

渡辺俊明 Toshiaki Watanabe

生年：1963年。

所属：情報通信研究室。

分野：移動体アンテナの研究。

学会等：電子情報通信学会会員。



佐藤和夫 Kazuo Sato

生年：1962年。

所属：情報通信研究室。

分野：移動体アンテナの研究。

学会等：電子情報通信学会会員。
工学博士。

西川訓利 Kunitoshi Nishikawa

生年：1953年。

所属：システム2部。

分野：移動体通信システム, 自動車セン
シングシステム, ナビゲーション
システムの研究。

学会等：電子情報通信学会会員。

1984年IEEE VTS論文賞受賞。

工学博士。