

はじめに

リンクサーキット株式会社は、高周波回路(高周波アナログ・高速デジタル)のプリント基板設計技術について、埼玉県産業技術総合センターと共同研究を行うことで技術やノウハウを蓄積して、お客様の要求にお応えできるよう日々努力を重ねています。

この「プリント基板材料とアンテナ特性について」はリンクサーキット株式会社が埼玉県産業技術総合センターの井沢研究員へ研究委託を行い、その研究成果物として報告されたものです。

プリント基板材料とアンテナ特性について

井沢昌行*

About an antenna characteristic by materials of a printed board

IZAWA Masayuki*

抄録

電子回路を構成するプリント基板は、汎用性や高周波特性など異なる特性を有する基板材料が、回路の目的や仕様に応じて使用されている。また近年は、無線通信周波数も高周波化し波長が短くなることで、アンテナも小さく、プリント基板上に他のプリント配線と同様に作製・配置出来るようになった。本研究では、異なる基板材料で試作したプリントダイポールアンテナの特性を実測した。あわせて、マイクロストリップアンテナの小形化と、プリント基板上で作る八木・宇田アンテナのアンテナ特性について実測し、その傾向を把握した。

キーワード：プリント基板，プリントダイポールアンテナ，マイクロストリップアンテナ，八木・宇田アンテナ

1 はじめに

電子回路を構成するプリント基板材料は、一般的に使用されているガラスエポキシ基板材料のほかに、高周波特性の優れたフッ素樹脂基板材料や、高周波回路が小型化できる高誘電率基板材料など様々なものが開発・販売されている。

また、近年は携帯電話や無線LAN、Bluetoothのように1GHzを超える周波数帯を利用した無線通信技術が一般的に使用されてきている。

一般に周波数が高くなると、その波長は短くなりアンテナのサイズは小さくなる¹⁾。その結果、プリント基板上にプリント配線と同一工程で作製、配置することが可能となった。

アンテナは、無線通信を行うためには必要不可欠なものであり、その種類は極めて多い²⁾。

本研究では、基本的なアンテナ形状であるダイポールアンテナを、プリント基板上に作製した

プリントダイポールアンテナ³⁾ や開放形平面回路共振器の放射損を積極的に利用したマイクロストリップアンテナ⁴⁾ (以下、MSAという。)、また、ダイポールアンテナに無給電素子の導波器および反射器を有する、いわゆる八木・宇田アンテナ⁵⁾を試作し、以下のような内容で試作および測定を行った。

① 誘電率、誘電正接の特性が異なるプリント基板材料でプリントダイポールアンテナを作製し、それぞれのアンテナ特性を調べた。

② フッ素樹脂基板材料を用いた MSA において、アンテナの小形化にともなうアンテナ特性の変化を調べた。

③ 一般的なプリント基板材料であるガラスエポキシ基板材料で、プリントダイポールアンテナを作製し、導波器を設けて八木・宇田アンテナとしたときのアンテナ特性を調べた。

* 埼玉県産業技術総合センター 電子情報技術部

2 実験方法

2.1 プリントダイポールアンテナ

2.1.1 プリントダイポールアンテナの設計

半波長ダイポールアンテナ素子の長さは、自由空間における波長の 1/2 に相当する長さであり、そのときの入力インピーダンスにはリアクタンス成分がある。入力インピーダンスを純抵抗とするためには、アンテナの全長を半波長より少し短くする必要があり⁶⁾、また、プリントダイポールアンテナでは基板材料の比誘電率による波長短縮効果で、その全長はより短くなる。

プリント回路上で伝送路に使用されるマイクロストリップライン（以下、MSLという。）や同軸ケーブルは不平衡伝送回路であり、ダイポールアンテナは平衡伝送回路である。直接接続するとアンテナが平衡励振されず本来の動作が阻害されてしまうため⁷⁾、平衡不平衡変換回路のバラン（Balun : Balance-unbalance）が必要となる。

バランには多くの種類がある⁸⁾⁹⁾が、今回は 1/4 波長の伝送線路長でバランとして動作する平行平板線路¹⁰⁾を用いた。1/4 波長平行平板線路の長さは、基板材料の比誘電率による波長短縮効果を考慮する必要がある。

アンテナの入力インピーダンスと回路のインピーダンスが整合していない場合は、定在波が立ち、伝送損も発生する。そのため整合回路が必要となる。インピーダンス整合回路には、コイルとコンデンサを用いる整合回路やスタブ整合回路、1/4 波長整合回路など¹¹⁾がある。

今回は、バランで使用する平行平板線路が 1/4 波長の長さであるため、1/4 波長インピーダンス変換器とし整合回路に使用した。1/4 波長インピーダンス変換器の入出力インピーダンスと伝送線路の特性インピーダンスは次の関係がある¹²⁾。

$$Z_{in} \cdot Z_{out} = Z_0^2$$

Z_{in} : 入力インピーダンス
 Z_{out} : 出力インピーダンス
 Z_0 : 伝送線路の特性インピーダンス

よって、伝送線路長が 1/4 波長である平行平板線路の特性インピーダンスを調整することで、イ

ンピーダンス整合が可能となる。以上、各部の役割について図 1 に示す。

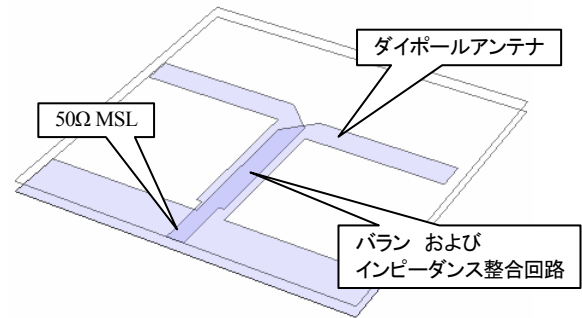


図 1 プリントダイポールアンテナ

2.1.2 プリント基板材料

使用した 3 種類の基板材料の特性を表 1 に示す。なお、基板厚を 1.6mm 程度に揃えるため、高誘電率 PPO 基板については、3 枚重ねて 1.5mm 程度の厚みとし、試作に用いた。

表 1 使用基板材料 (1MHz、カタログ値)

基板材料	基板厚	比誘電率	誘電正接	銅箔厚
ガラスエポキシ	1.6mm	4.5 ~ 4.9	0.013 ~0.020	35μm
フッ素樹脂	1.6mm	2.62	0.0005	35μm
高誘電率 PPO	0.5mm	10.2 ~ 10.6	0.0050 ~0.0070	18μm

2.1.3 プリントダイポールの外観および寸法

試作したプリントダイポールアンテナの中心周波数は、無線 LAN などで利用されている 2.4GHz とした。図 2 にプリントダイポールアンテナの外観、図 3 にそれぞれの寸法を示す。

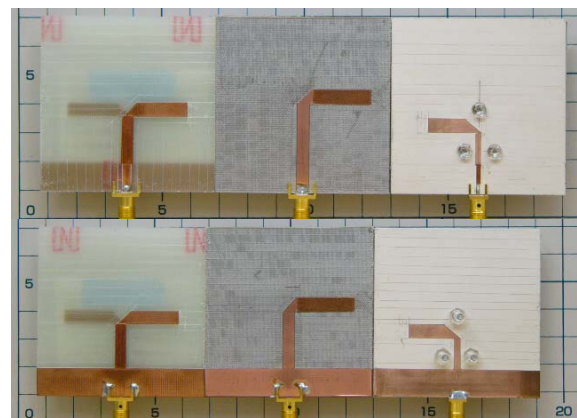


図 2 プリントダイポールアンテナ外観

上段：表面、下段：接地導体面
 左から、ガラスエポキシ、フッ素樹脂、高誘電率 PPO

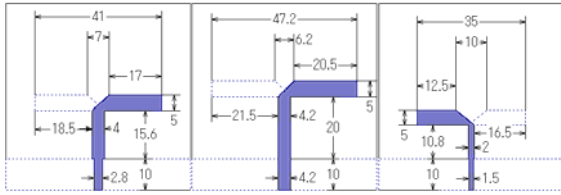


図3 プリントダイポールアンテナ寸法
左から、ガラスエポキシ、フッ素樹脂、高誘電率PP0
基板サイズは、全て60×60 (単位:mm)

2.2 MSAの小形化

2.2.1 MSAの設計

通常の両端開放型の方形MSAの放射素子サイズは 1/2 波長かそれ以下である¹³⁾。また、方形MSAの放射素子サイズは次式を用いて求めることができる¹⁴⁾。

$$f_r = \frac{v_0}{2a\sqrt{\epsilon_r}}$$

f_r : 共振周波数
 v_0 : 光 速
 a : 素子 辺長
 ϵ_r : 比 誘 電 率

MSAの小形化は、放射素子の零電位面を短絡し 1/4 波長系方形MSAとすることができ、また、放射素子の幅を狭めることで、より小形化が可能になることが知られている¹⁵⁾。

MSAへの給電方法は、代表的なものに背面給電方式、共平面給電方式、電磁結合給電方式がある¹⁶⁾。今回はMSLを用いた共平面給電方式とした。また、基板サイズを放射素子端部から 10mm 程度の大きさとしたため、1/4 波長インピーダンス変換器を設けることができないので、切り込みによるインピーダンス整合を行った。以上までを 図4 に示す。

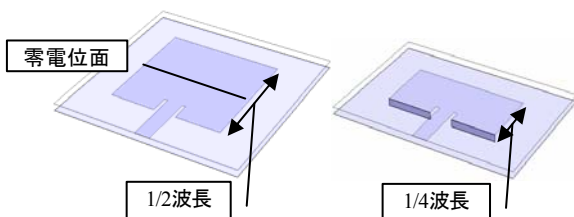


図4 MSA

左:両端開放型 1/2 波長 MSA、右:片側短絡型 1/4 波長 MSA
零電位面を接地導体に短絡することで、1/4 波長系の MSA となる。

2.2.2 プリント基板材料

高周波特性に優れたフッ素樹脂基板材料を使用した。表2に使用した基板材料の特性を示す。

表2 使用基板材料(1MHz、カタログ値)

基板材料	基板厚	比誘電率	誘電正接	銅箔厚
フッ素樹脂	1.6mm	2.62	0.0005	35μm

2.2.3 MSAの外観および寸法

MSAの中心周波数は、無線LANなどで利用されている 2.4GHz とした。試作した MSA は表3に示す4形状である。

以降は、簡略のため形状ごとに A~D のタイプで表記する。

図5にMSAの外観、図6に寸法を示す。

表3 MSAの形状

タイプ	形 状	面積比(A=1)
A	両端開放型 1/2 波長	1
B	片側短絡型 1/4 波長	A の 1/2
C	片側短絡型 1/4 波長	B の 1/2
D	短絡面制御型 1/4 波長	B の 1/2

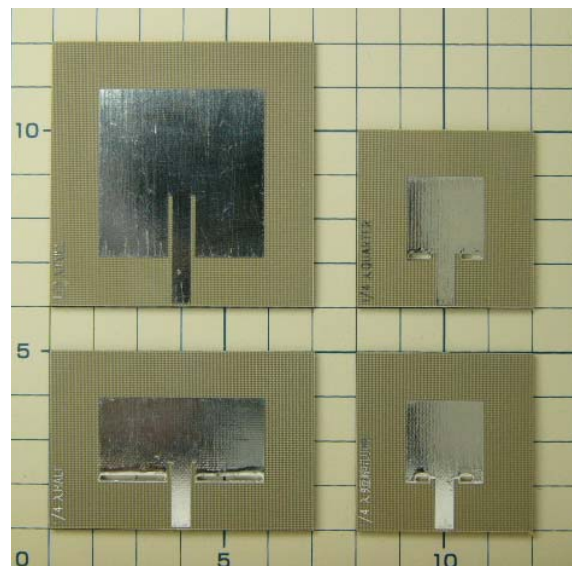


図5 MSA 外観
(左上: A、左下: B、右上: C、右下: D)

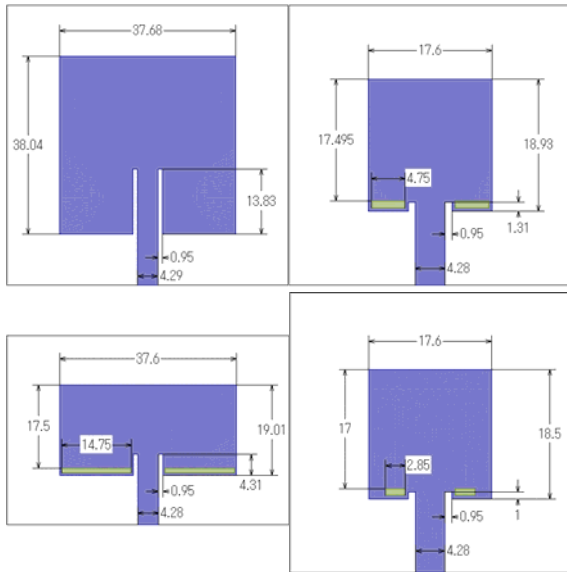


図 6 MSA 寸法

基板サイズは、左上:A=60×60、左下:B=60×40、右上:C=40×40、右下:D=40×40 (単位:mm)

放射素子端部の四角はスルーホール(短長:1mm)メッキで短絡面とし接地導体につながっている。

2.3 プリントダイポール八木・宇田アンテナ

2.3.1 プリントダイポール八木・宇田アンテナの設計

八木・宇田アンテナは放射器と無給電素子の反射器および導波器の組み合わせで単一指向性をもつアンテナとなる¹⁷⁾。利得をあげるには導波器の数を増やせばよいことが知られている¹⁸⁾。プリントダイポールアンテナのMSL部分の接地導体を八木・宇田アンテナの反射器とし、導波器を追加し高利得化を行った。導波器は片面のみに配置した。導波器を追加することによりプリントダイポールアンテナの入力インピーダンスが変化するが、入力インピーダンスを純抵抗とするには放射素子の長さを調整し¹⁹⁾、バランの1/4波長インピーダンス変換器の特性インピーダンスを調整してインピーダンス整合を行った。

2.3.2 プリント基板材料

一般的なプリント基板材料であるガラスエポキシ基板材料を使用した。表4に使用した基板材料の特性を示す。

表 4 使用基板材料(1MHz、カタログ値)

基板材料	基板厚	比誘電率	誘電正接	銅箔厚
ガラスエポキシ	1.6mm	4.5 ~ 4.9	0.013 ~0.020	35μm

2.3.3 プリントダイポール八木・宇田アンテナの外観および寸法

プリントダイポール八木・宇田アンテナの中心周波数は、無線ICタグ(RFID: Radio Frequency IDentification)などで利用される950MHzとした。図7にプリントダイポール八木・宇田アンテナの外観、図8にそれぞれの寸法を示す。



図 7 プリントダイポール八木・宇田アンテナ外観
(左より2素子、3素子、4素子、5素子)

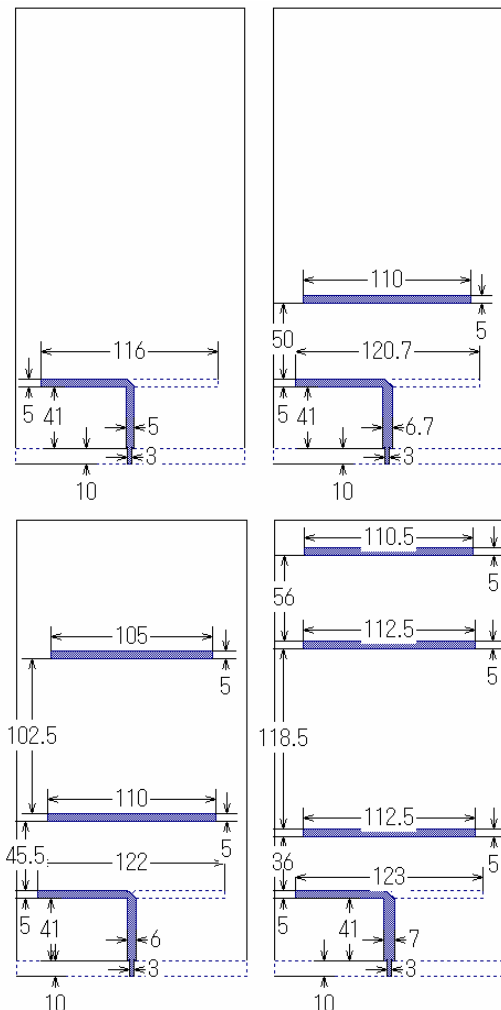


図 8 プリントダイポール八木・宇田アンテナ寸法
左上:2素子、右上:3素子、左下:4素子、右下:5素子
基板サイズは150×320 (単位:mm)

3 結果及び考察

3.1 プリントダイポールアンテナの特性

3.1.1 リターンロス特性および放射パターン

図9にリターンロス特性を示す。中心周波数のずれは、ダイポールアンテナ素子の長さとの幅により調整可能と考える。

図10に放射パターンを示す。半波長ダイポールアンテナの放射指向性に比べ、接地導体の影響で一方へよせられ単一指向性の放射パターンとなっている。しかし、基板材料による著しい違いはなかった。

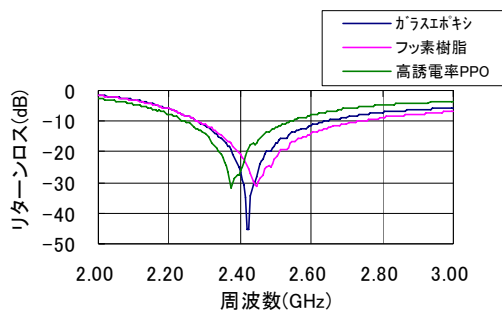


図9 リターンロス特性

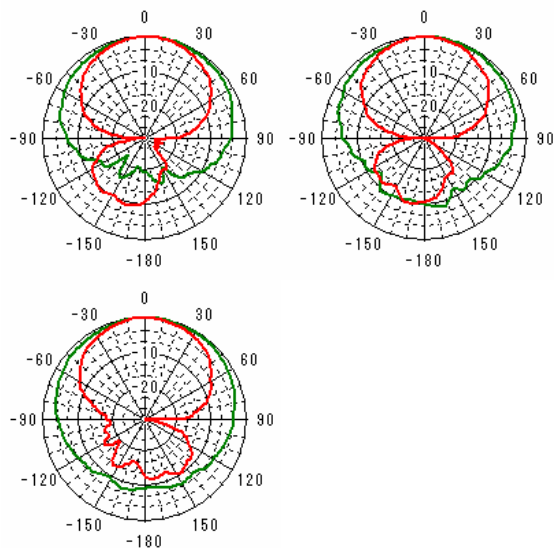


図10 放射パターン(赤:E面、緑:H面)
左上:ガラスエポキシ、右上:フッ素樹脂、左下:高誘電率PPO

表5に各基板材料での帯域幅と利得を示す。帯域幅は材料の比誘電率が大きくなると狭くなる傾向がある。しかし、利得は基板材料による影響が少ないことがわかった。

表5 基板材料による帯域幅と利得

基板材料	帯域幅 (MHz) (VSWR \leq 2)	利得 (dBi)	中心周波数 (GHz)
ガラスエポキシ	382.5	6.9	2.425
フッ素樹脂	484.5	6.8	2.445
高誘電率PPO	320.1	6.0	2.375

3.2 マイクロストリップアンテナの小形化

3.2.1 リターンロス特性および放射パターン

図11にリターンロス特性を示す。小形化するほど中心周波数が高くなっているが、放射素子の長さを調整することで目標の周波数にあわせることは可能と考える。CとDでは、短絡面の幅を変えている。短絡面の幅を小さくすることにより共振周波数を下げ、小形化できる²⁰⁾が、実測においても同じ傾向が得られた。

図12に放射パターンを示す。どのMSAも単一指向性の放射パターンが得られた。Aに比べて、B, C, Dの放射パターンが広がっているのは、片側短絡型MSAの特性²¹⁾である。

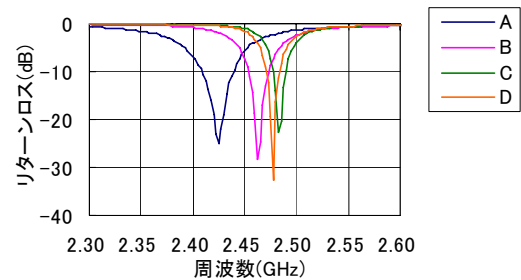


図11 リターンロス特性

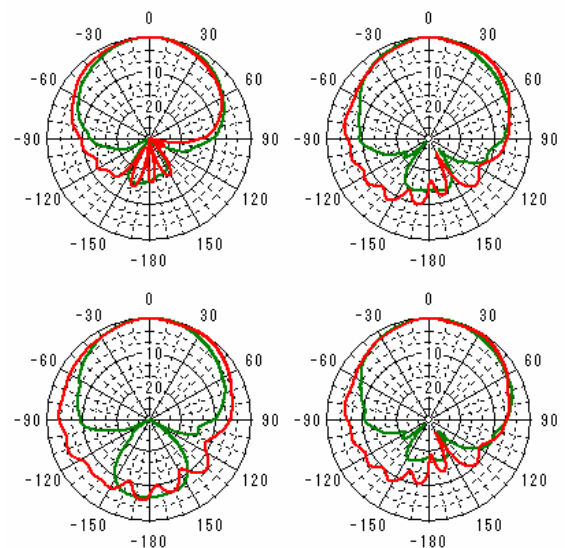


図12 放射パターン(赤:E面、緑:H面)
左上:A、左下:B、右上:C、右下:D

表 6 に各MSAの帯域幅と利得を示す。アンテナの小形化により、帯域幅が狭くなることが知られているが²²⁾²³⁾、表 6 においても同じ傾向が得られた。利得に関しては、放射源である放射素子面積が半分になると利得も半分(-3dB)となる²⁴⁾が、表 6 から、Aに対してBの利得は 3dB小さな値となった。CおよびDにおいては、放射素子がBの面積の半分であるが、Bの利得の 3dB小さな 0.8dBiにはならなかった。

これは、全ての方向に様に電波を放射する等方性(isotropic)アンテナ²⁵⁾のような、損失のない無指向性の場合の利得が 0dBiであるが、接地導体の影響で放射パターンは単一指向性となり、その結果 2~3dBiの利得が得られているものと考えられる。

表 6 放射素子面積による帯域幅と利得

タイプ	帯域幅 (MHz) (VSWR \leq 2)	利得 (dBi)	中心周波数 (GHz)
A	32.1	6.8	2.425
B	20.2	3.8	2.463
C	12.8	2.9	2.483
D	13.2	3.1	2.478

3.3 プリントダイポール八木・宇田アンテナ

3.3.1 リターンロス特性および放射パターン

図13にリターンロス特性、図14に放射パターンを示す。図13より導波器を配置すると、リターンロス特性が急峻になっているのがわかる。

また、図14では、導波器を増やすごとに放射パターンのメインローブが鋭くなり、また、4素子、5素子においては、サイドローブが発生している。

多素子八木・宇田アンテナでは素子間隔を広くとるとメインローブが鋭くなるが、サイドローブも大きくなることが知られている²⁶⁾。

今回は、できるだけ利得を大きくすることを目的としたため、素子間隔が広くなりサイドローブが大きくなったと思われる。

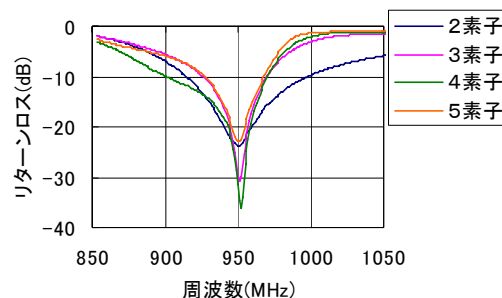


図 13 リターンロス特性

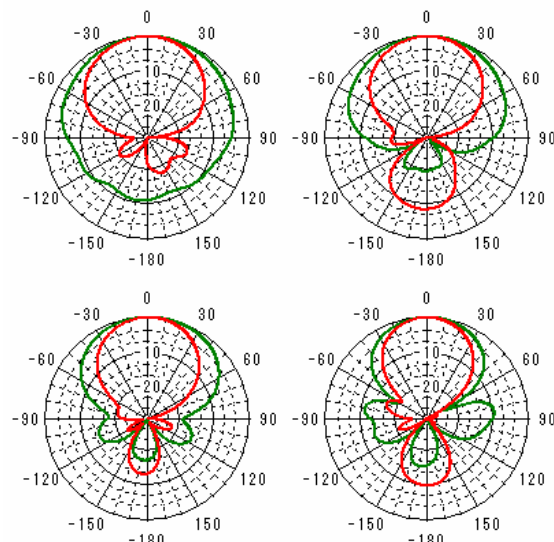


図14 放射パターン(赤:E面、緑:H面)

左上:2素子、右上:3素子、左下:4素子、右下:5素子

表 7 素子数による帯域幅と利得

素子数	帯域幅 (MHz) (VSWR \leq 2)	利得 (dBi)	利得増加分 (dB)
2	88.9	6.7	1.6
3	46.6	8.3	
4	73.6	9.9	1.5
5	43.0	11.4	

表 7 に示すとおり、素子数を増やすと帯域幅は減少するが、利得は増加する。また、導波器 1 本ごとに利得の増加は 1.5dB 程度得られた。

しかし、導波器 1 本増やすことによる利得の増分量は、導波器の本数が増えるごとに減少し、導波器の位置や長さの調整が複雑となるので、実用上取りうる利得は半波長アンテナに比べ 14dB 程度といわれている²⁷⁾。

4 まとめ

今回の研究では、試作したアンテナの測定を行い以下のことを得た。

(1) プリントダイポールアンテナ

プリントダイポールアンテナでは、異なる基板材料でも利得に対する影響は小さい。また、接地導体の影響で単一指向性となり、半波長ダイポールアンテナに比べて利得が大きくなるのがわかった。

(2) マイクロストリップアンテナの小形化

MSA の小形化により、帯域幅と利得が減少することを、実験より確認した。また、小形化により利得が小さくなるが、接地導体により単一指向性が得られ、MSA の損失が少なければ、その結果利得が 2~3dBi となることがわかった。

(3) プリントダイポール八木・宇田アンテナ

一般的なプリント基板材料であるガラスエポキシ基板を用い、プリントダイポールアンテナと導波器を組み合わせて、八木・宇田アンテナとすることで利得を増加できることがわかった。

謝辞

本研究を進めるに当たり、御指導いただきました埼玉大学の羽石操教授に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 無線データ通信の基礎と RF 部品活用法, CQ 出版, (2003)169
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)2
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)42
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)109
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)116
- 虫明康人: アンテナ・電波伝搬, コロナ社, (2002)48
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)242
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)242
- 森 英二: マイクロウェーブ技術入門講座[基礎編], CQ 出版, (2003)409
- 森 英二: マイクロウェーブ技術入門講座[基礎編], CQ 出版, (2003)425
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)239
- 広畑 敦: 高周波技術センスアップ101, CQ 出版, (2003)85
- 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫: 小形・平面アンテナ, (社)電子情報通信学会, (1998)80
- 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫: 小形・平面アンテナ, (社)電子情報通信学会, (1998)94
- 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫: 小形・平面アンテナ, (社)電子情報通信学会, (1998)133
- 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫: 小形・平面アンテナ, (社)電子情報通信学会, (1998)81
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)118
- 虫明康人: アンテナ・電波伝搬, コロナ社, (2002)78
- 虫明康人: アンテナ・電波伝搬, コロナ社, (2002)78
- 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫: 小形・平面アンテナ, (社)電子情報通信学会, (1998)137
- 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫: 小形・平面アンテナ, (社)電子情報通信学会, (1998)135
- 小暮裕明: 電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界, CQ 出版, (2001)102
- 羽石 操, 平澤一紘, 鈴木康夫: 小形・平面アンテナ, (社)電子情報通信学会, (1998)135
- 小暮裕明: 電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界, CQ 出版, (2001)111
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)28
- アンテナ工学ハンドブック, オーム社, (1999)119
- 虫明康人: アンテナ・電波伝搬, コロナ社, (2002)78