

修士論文

壁面内蔵型衛星放送受信用

薄型ビームチルトアンテナの研究

A Study of Beamtitled Thin Antenna
Built in Wall Tile for DBS

指導教官 新井 宏之 教授

平成15年2月10日提出

01GD119 小谷 洋

要約

現在 BS デジタル放送，CS デジタル放送をはじめとする衛星放送が各家庭に普及しており，高画質，高音質な放送やデータ放送などのサービスにより，近年ではインターネットなどと並ぶ高度な情報伝達的手段として注目を集めている．衛星放送受信アンテナとしては最も広く普及しているパラボラアンテナ，ラジアル導波管を用いたラジアルラインスロットアンテナ (RLSA)，トリプレートアンテナ，マイクロストリップアンテナなどが存在する．これらのアンテナの大半は屋外に設置するタイプのものであり，なおかつアンテナ正面を人工衛星の方向に物理的に設定しなければならない．このことは近年の家屋がその外観を重視していることに反するとともに，アンテナの耐久性や設定の利便性の欠如といった問題が生じる．

このような問題点を改善するために家屋の壁面内部に設置することのできる CS 受信用薄型のビームチルトアンテナが提案されている．そこで本論文では，BS 受信を目的としたビームチルト型円偏波アンテナについて検討する．BS 受信用アンテナを家屋の壁面に内蔵し，壁が衛星方向に面していない場合でも調整可能な構造となるような素子アンテナを一層構造のプリント基板で実現できるものを提案し，その特性を明らかにすることにより衛星放送受信アンテナとしての有効性を検証することが本研究の目的である．

はじめに BS 放送波である円偏波の特性と励振方法に触れ，それを踏まえて本研究で検討する受信素子を設計した．まず BS 放送波を受信できるような円偏波アンテナとして動作させるためにパッチアンテナ単素子について軸比の周波数特性を中心とした主要特性をモーメント法により計算した．

次に衛星の仰角方向にはビームチルトで対応できるアレイ構造について検討した．今回提案するアンテナは壁面内部に設置することを想定しているため，薄型かつメインビームが仰角約 50° 方向に形成されるビームチルト型のアンテナが必要である．そこで，誘電体基板上に構成されたマイクロストリップ線路で各アレイ素子に直列給電される構造のアンテナの設計を行った．

さらに供給電力を分配させ，2次元の平面アレイを設計し，壁面設置型ビームチルトアンテナを構成するサブアレイの特性を求めた．最後に実際にサブアレイを試作することにより，BS 受信アンテナとしての有効性を解析的，実験的に検証した．

目次

第1章	序論	1
第2章	円偏波励振用マイクロストリップアンテナの受信素子	7
2.1	平面アンテナの円偏波技術	7
2.1.1	円偏波	7
2.1.2	2点給電円偏波励振方式	8
2.1.3	1点給電円偏波励振方式	9
2.2	壁面設置型アンテナの受信素子	13
2.2.1	円偏波受信素子	13
2.2.2	マイクロストリップアンテナの主要特性	14
2.3	まとめ	22
第3章	ビームチルト型マイクロストリップアレイアンテナ	23
3.1	ビームチルト型アンテナの構成	23
3.2	電力分配部	31
3.2.1	解析および実験モデル	31
3.2.2	解析および測定結果	32
3.3	2次元平面アレイアンテナ	34
3.3.1	マイクロストリップ平面アレイアンテナの構成	34
3.3.2	マイクロストリップ平面アレイアンテナの主要特性	35
3.3.3	マイクロストリップ平面アレイアンテナの放射指向性	36
3.4	まとめ	47
第4章	結論	48
	謝辞	49
	参考文献	50

第 1 章

序論

日本の放送衛星の開発等は，1978年に打ち上げられた実験衛星「ゆり」以来，国の宇宙開発計画に沿って進められてきた．1984年1月には初の実用衛星（BS-2a）が打ち上げられ，同年5月，日本で世界初の本格的な直接受信衛星放送が開始された．当初はBS-2aの故障により1チャンネルのみの試験放送であったが，86年に打ち上げられたBS-2bに切り替えると，87年から2チャンネルでの試験放送が開始され，1989年6月に本放送が始まった．

日本における衛星放送は，89年のBSアナログ放送開始以降，受信世帯数を伸ばし，現在，BS放送の視聴者数はアナログ，デジタル合わせて1,600万世帯近くに達していると推定され，着実に普及しつつある．衛星放送は，他の放送メディアに先駆けてデジタル化が進み，1996年6月から多チャンネルを提供するCSデジタル放送が開始された．また2000年12月からはデジタルハイビジョンによる高画質，CD並みの高音質な放送と，テレビを高機能にするデータ放送を両輪としたBSデジタル放送が開始されている．これらの衛星デジタル放送の普及は着実に進展し，2002年12月末でCSデジタル放送の加入者件数が約337万件，BSデジタル放送の視聴世帯数が366万世帯となっている．

衛星を利用することにより地上波では電波環境の悪い地域でも鮮明な画像や音声を伝達することが可能となり，また使用する周波数が地上波よりも高いため，映像信号，音声信号以外にもさまざまなデータの伝送が可能である．従って単なる放送だけでなく，双方向サービスを利用した電子商取引（TV Commerce：Tコマース）などのアプリケーションが可能となり，近年では，インターネットなどと並ぶ高度な情報伝達の手段として注目されている．また衛星放送は全国を同一チャンネルでカバーしていることが特長である．しかし，地上におけるBS放送波の電界強度が極めて弱いいため，パラボラアンテナ（図1.1）のように高い利得のアンテナが必要になる．

パラボラアンテナは一般家庭に最も普及しているアンテナである。パラボラアンテナは反射鏡アンテナとも呼ばれ、原理的には光学反射望遠鏡とほぼ同じである。図 1.1 に示すようにアンテナ正面を人工衛星の方向あわせ、人工衛星からの放送波を放物線状の反射鏡で一点に集めて集光器で受ける構成になっている。しかし静止衛星のような高度の衛星からの微弱な電波を受信する際にはこの集光器を支える支柱による電波の遮断（ブロッキング）による損失、ケーブルからの漏れ電波などが問題となる。またパラボラアンテナは反射器がお椀状になっているために受風面積が大きく、風雪害に耐えうるためにきちんとした設置工事が必要であり、さらに反射鏡面に積雪することによりアンテナの特性が変わってしまうという問題点もある。これを改善するために、集光器をパラボラ反射鏡正面からずらすことにより集光器と支柱による電波の遮断を低減できるオフセット型パラボラアンテナが開発された。オフセット型では反射鏡の焦点を反射鏡正面ではなく、反射鏡下方に向けることにより集光器が反射鏡に作る陰を軽減するが、同時に反射鏡を垂直に近い状態にできるので、積雪しにくく、アンテナの特性にも影響を与えにくくなる。パラボラアンテナの問題点は放射器をオフセットした場合、アンテナの開口面効率が下がってしまうということである。開口面効率とは面状のアンテナの電気的な面積の大きさを示す指標であり、幾何学的な面積と電気的な面積が同じ場合を 100% とし、数値が大きいほど効率が良い。パラボラアンテナは一度電波を反射させて集光器に集めるという特性上、反射鏡上での電波の分布に偏りが生じてしまい、開口面効率が低下する。さらに反射鏡を大地に対して垂直に近く設置するということは、衛星からの見かけ上の反射鏡面積が減少してしまい、さらに開口面効率が減少する。



図 1.1：パラボラアンテナ

開口面効率の高いアンテナとして，ラジアル導波管を用いたラジアルラインスロットアンテナ [2] などの平面アンテナが開発，実用化されている．ラジアルラインスロットアンテナは図 1.2 に示すように完全に平面であり，オーバーサイズの導波管で給電することにより，給電損失はほとんど無視することができる．また平面アンテナとして他にもトリプレートアンテナ，マイクロストリップアンテナなども存在し，実用化されている．

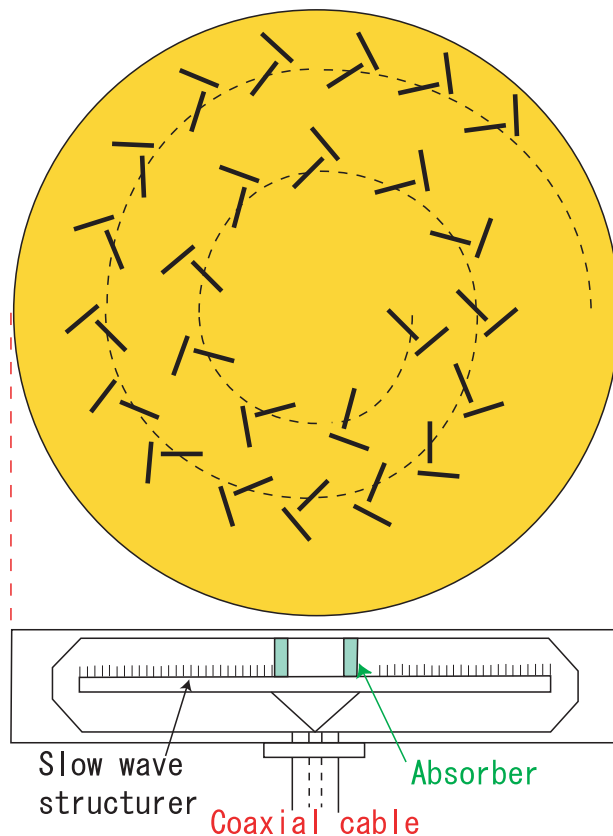


図 1.2：ラジアルラインスロットアンテナ

以上紹介してきたアンテナは屋外に設置し，なおかつその方向を物理的に設定する必要があり，アンテナそのものには何らかの調整機能がない．これらは最近の家屋がその外観を重視していることに反するだけでなく，鳥，風雪害によるアンテナ自体の耐久性やアンテナの設置場所の確保，細心の注意を伴う設置といった問題が生じる．サイドルッキングを採用した平面アンテナも提案されているが，壁面への取り付けごとに異なる角度を設定することは容易ではない．特に家屋ごとに異なるアンテナ主ビームの水平面内回転角が簡単な構造で設定できることが望まれる．

このような問題点を改善するために，CS (Communication Satellites) 受信用薄型ビームチルトアンテナが提案されている [1]．現在，衛星放送には大きく分けると送信偏波に垂

直，水平両偏波を使用する CS と円偏波を使用する BS (Broadcasting Satellites) が存在する．本論文では以上の点に留意し，家屋の壁面内部に設置可能な BS 受信を目的とした薄型のビームチルト型円偏波アンテナ素子を新たに提案し，その特性を明らかにする．このアンテナは大きく分けると各サブアレイに任意の位相差で電力供給可能な給電系と，衛星からの放送電波を受信するための放射系とで構成される．本論文ではその放射系に関する設計，製作を行いモーメント法で計算した解析値との比較により BS 受信アンテナとしての実現可能性を示す．



図 1.3 : 壁面設置型受信アンテナの外観

本論文で紹介するアンテナは家屋の壁面内部に設置することが可能な形状かつ特性を有することを想定しているため，以下のような条件が必要不可欠となる．

- アンテナの最大放射方向

まず家屋の壁面に設置することを考えると，仰角 (Elevation) 方向のアンテナの最大放射方向を制御しなければならない．仰角方向は，図 1.4 に示すように日本列島でも地域によって静止衛星の見える方向が異なるが，本論文ではメインビームが仰角約 50° 方向に形成されるアンテナを設計目標とする．また方位角 (Azimuth) 方向のアンテナの最大放射方向も同様に制御する必要がある．本論文で提案するアンテナは約 10cm 程度の厚さをもつ壁面の内部に設置することを想定しており，衛星の方向を合わせるため，水平面内で回転させることができるようにする．

- アンテナの入力特性

現在，日本で使用されている BS 放送の周波数帯域は 11.7GHz から 12GHz と 12GHz 帯において数百 MHz の周波数帯域を有する．この周波数帯域を一つのアンテナでカバーするためには比較的広帯域な周波数特性を持つアンテナが必要不可欠である．

- コストパフォーマンス

一般家庭に設置する衛星放送受信アンテナとなると，アンテナの製作に要するコストを低く抑えなければならない．レーダなど軍事用のアンテナの中には各アレイ素子間で給電電力と位相を制御するフェーズドアレイなどが存在するが，コストがかかり，商用化には向いていない．

- アンテナの厚み

給電損失を考慮すると導波管を用いたアンテナがあるが，壁面内部に設置することを考えると不向きである．よって本研究では誘電体基板で製作可能なアンテナを使用した．

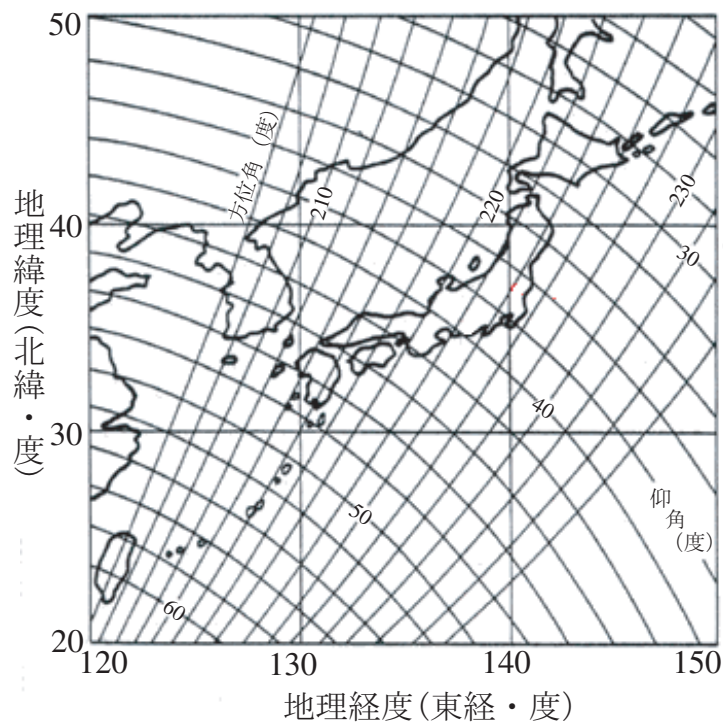


図 1.4 : 日本各地から放送衛星を望む方位角とチルト角

以上の条件を考慮した壁面設置型衛星放送受信アンテナの外観を図 1.5 に示す。アンテナの構成は給電部と放射部に分けられ、給電系はサブアレイ化した各アンテナに任意の位相差で電力を供給し、放射系は静止衛星からの放送電波を受信する。放射部は低コストかつ製作が容易なプリント基板を用い、放送波である円偏波の受信に対応した素子アンテナで構成する。アンテナの設置環境としては、図 1.5 に示すようにアレイ化した素子で一枚のサブアレイを形成し、その板を横方向に数枚並べることにより、それぞれが連動して方位角を調整できる構造とする。サブアレイを構成することにより方位角方向のアンテナの自由度が比較的大きく取れるという利点が生じるため、アンテナのビームチルト角は、方位角方向に関しては衛星の方向に向くようにアンテナの正面を壁面内で設置し、仰角方向に関してはアンテナの指向性を制御することによって対応させる。サブアレイを構成することにより位相差が生ずるため、位相調整を行うため位相器が必要となる。

本論文の構成は、まず BS 放送波に使用される円偏波についてその励振技術に触れる。次に図 1.5 に示す構造のアンテナを実現するための基礎検討として、サブアレイに用いられるビームチルト型アンテナのパッチ素子単体についてその形状設計および検討を行い、円偏波励振素子としての特性を示す。さらにアレイ化したビームチルト型アンテナとして使用するための給電回路および放射指向性について検討し、衛星放送受信アンテナとしての有効性を検証する。

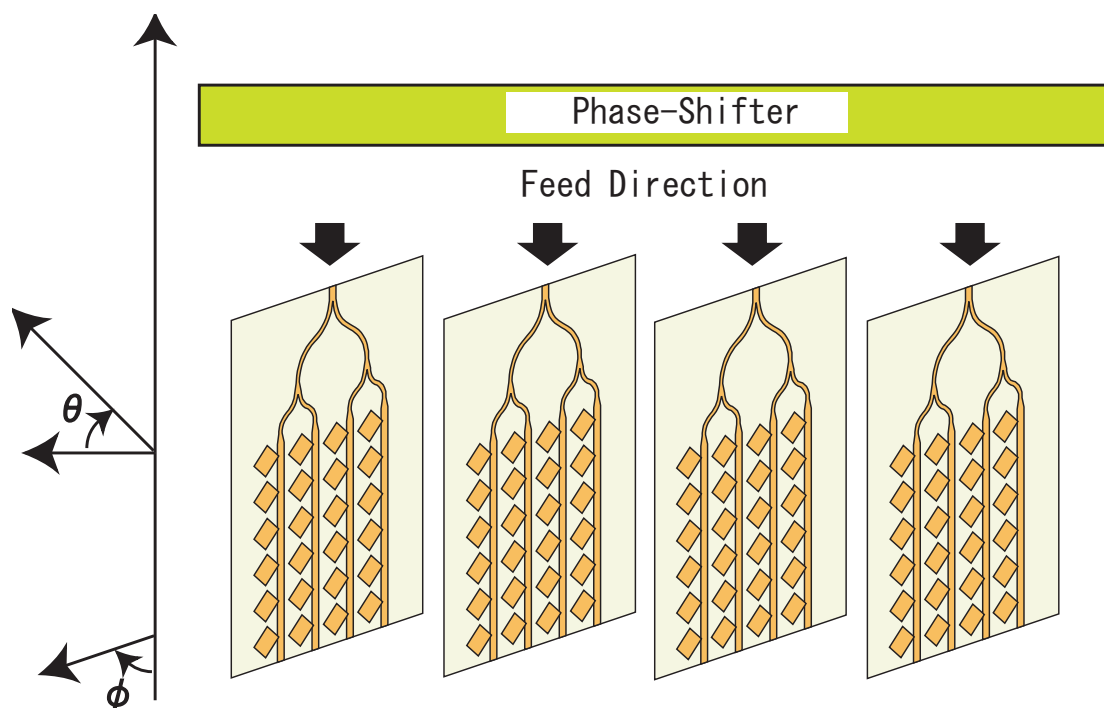


図 1.5 : アンテナの外観

第 2 章

円偏波励振用マイクロストリップアンテナの受信素子

本章ではまず BS 放送波として使用される円偏波について述べ、MSA 素子による円偏波を発生させるための給電方法について触れる。さらにその円偏波励振法を踏まえた上で壁面設置型平面アンテナの基礎検討として本論文で提案するマイクロストリップアンテナの素子の構造について説明し、モーメント法によって計算した主要特性を示す。

2.1 平面アンテナの円偏波技術

2.1.1 円偏波

移動通信、衛星通信および周波数の有効利用等の見地から、円偏波アンテナが着目されている。円偏波とは、電波の進行方向に垂直な面内で、その励振周波数と等しい周期で電界の向きが回転している偏波のことであり、その回転方向の違いにより、左旋円偏波と右旋円偏波に大別される。左旋円偏波と右旋円偏波は互いに電氣的に直交しており、図 2.1 のように定義される。円偏波は、等振幅で互いに 90° の位相差を持つ 2 つの直線偏波の合成によって実現することができるが、現実的には完全な円偏波を実現することは難しく、一般には楕円偏波になり、どの程度円偏波に近いかを表す指標として軸比 (Axial Ratio: AR) が用いられる。任意の楕円偏波は左旋円偏波と右旋円偏波の合成としても表すことができ、これらの電界強度をそれぞれ E_L および E_R とすると軸比 AR は

$$AR = \frac{|E_L| + |E_R|}{|E_L| - |E_R|} \quad (2.1)$$

で表される。AR が正のとき左旋円偏波となり、負のとき右旋円偏波となる。また、 $|AR|$ が 1 に近いほど円偏波に近い。軸比は通常は $20\log_{10} |AR|$ で表される dB 値で表示されることが多い。

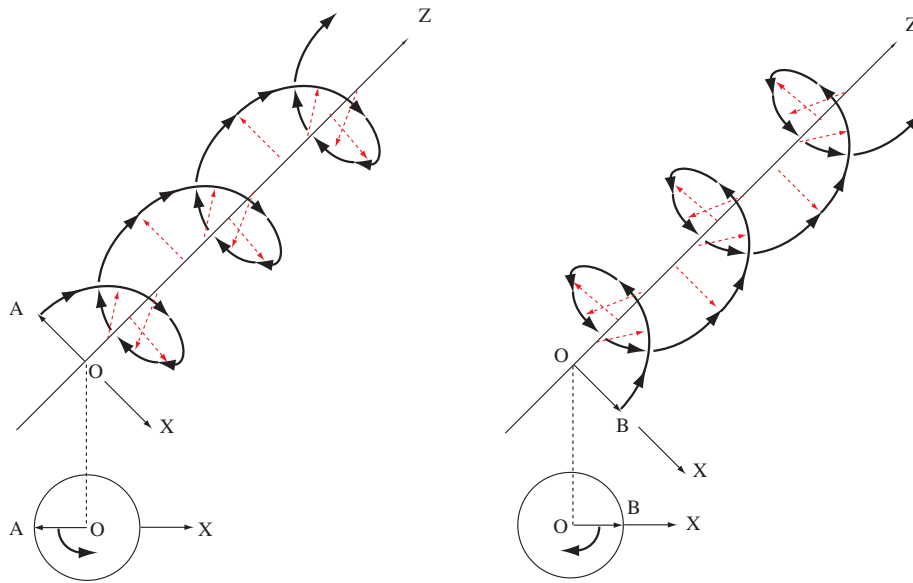


図 2.1 : 左旋円偏波と右旋円偏波

これら円偏波を受信するアンテナのうち，MSA (MicroStrip Antenna) 素子により円偏波を発生させる手法としては，図 2.2，図 2.3 に示すように，2 点給電方式と 1 点給電方式とに大別される．それぞれの給電方式について次小節以降に述べる．

2.1.2 2 点給電円偏波励振方式

はじめに，2 点給電方式について説明する．図 2.2 に示すように，空間的に直交した 2 つの給電点 F_1 および F_2 から方形または円形 MSA を励振すると，互いに偏波の直交する 2 つのモード，すなわち #1，#2 が発生する．これら 2 つのモード間分離度は一般に良好であり，基板定数，基板寸法などを適切に選定した MSA においては分離度を -30dB 以下まで抑制することができる．したがって，3dB ハイブリット (3dB-HB) もしくは電気長が 8 分の 1 波長だけ異なるオフセット型給電線路等を用い，空間的に直交する 2 つの給電点 F_1 ， F_2 から MSA を励振すれば，#1 および #2 モードの振幅は等しく，位相差は $\pm(\pi/2)$ だけ異なり，これらの MSA 素子は，円偏波アンテナとして作動する．この 2 点給電方式による円偏波発生方式は，クロスダイポール等の通常の線状アンテナに適用されてきた円偏波励振方式と原理的には等価である．通常の線状クロスダイポールにおいては，円偏波を発生させるためにアンテナ素子が 2 個必要であったが，この MSA 素子では 1 個のアンテナ素子を共用し円偏波を発生させることができる．また，給電系に使用される 3dB ハイブリットの周波数特性は，一般に広帯域であるため，2 点給電方式による円偏波 MSA 素子の軸比等の基本特性は，広帯域な特性を示す．

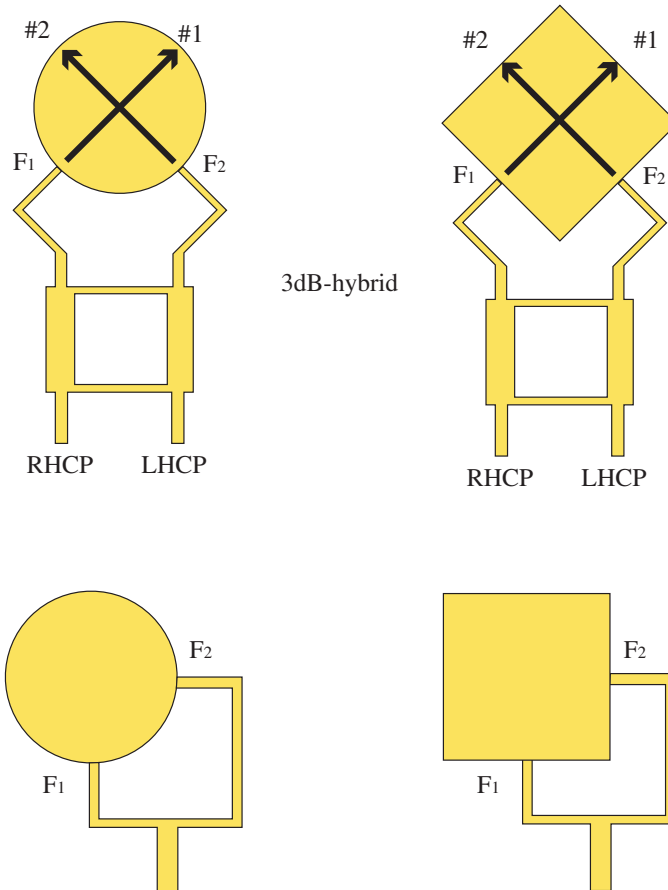


図 2.2： 代表的な 2 点給電型円偏波 MSA 素子

しかし、供試アンテナの基板厚が増加すると、主モードのほかにも高次モードも発生するため、2 点給電方式においても軸比の帯域等が劣化する。この 2 点給電方式は、比較的広帯域な周波数領域において良好な放射特性を示すが、円偏波を発生するために、必然的に 3dB ハイブリットなどの回路素子が必要となるため、その給電系の構成が複雑となり、かつ給電損失等も無視できない。

2.1.3 1 点給電円偏波励振方式

次いで、図 2.3 に示す 1 点給電について述べる。この方式は、給電系に 3dB ハイブリット等の特別な位相調整回路を用いることなく円偏波を発生させるため、給電系の構成が極めてシンプルになる。このように、1 点給電により円偏波アンテナを容易に構成できることが、MSA の大きな特色である。この 1 点給電方式の円偏波 MSA の構成法としては種々考えられるが、一般には直線偏波素子に図 2.3 のように、スリットやノッチ（切り込み）等による縮退分離素子を装荷し円偏波を発生させるものが多く利用されている。この 1 点給

電円偏波 MSA においては，一般に軸比特性が狭帯域であるものの，その構成が極めてシンプルであり，しかも広角方向における軸比特性が良好であるため，現在においても種々の研究が進められている．

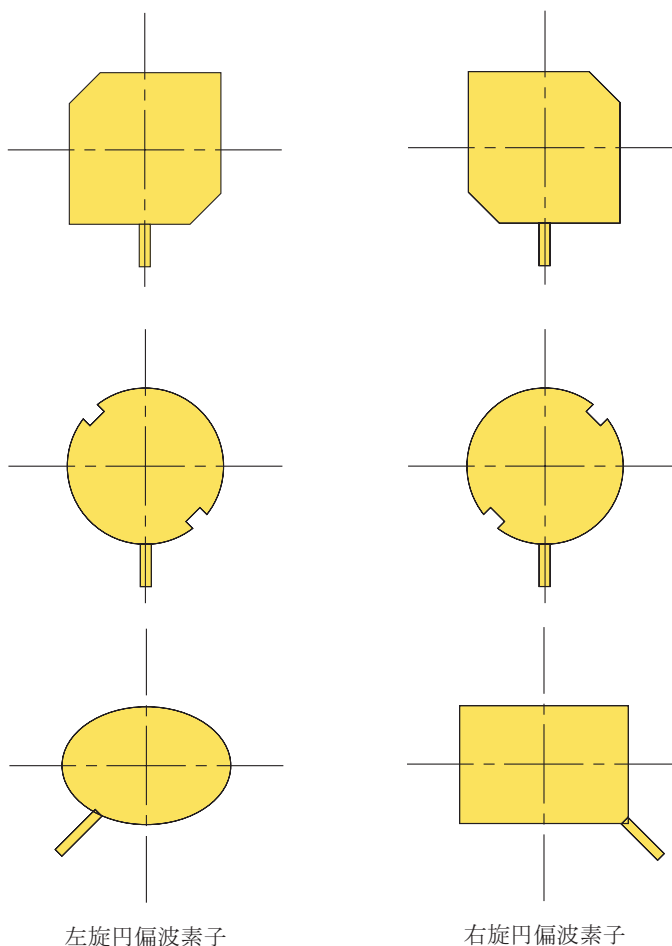


図 2.3： 代表的な 1 点給電型円偏波 MSA 素子

ここで，1 点給電円偏波 MSA の動作原理を図 2.4 および図 2.5 の模式図を用いて説明する．一般に，円形および正方形パッチアンテナにおいてはその主モードが 2 重に縮退している．そこで図 2.4 のように，主モードで励振された MSA 素子に縮退分離素子 (Δs) を装荷すると，主モードが解け，空間的に直交する 2 つのモード #1，#2 に分離する．ここに，#1 モードと #2 モードの共振周波数を比較すると，#1 モードの共振周波数は図 2.4 に示すように #2 モードのそれに比べて長くなるので，#1 モードの共振周波数は #2 モードのそれに比べて低下し，図 2.5 のようになる．摂動 (切り込み) を与える前の MSA の素子面

積を S とし、摂動素子（縮退分離素子）の面積を Δs とすると、摂動量（ $|\Delta s/S|$ ）の増加に伴い #1 と #2 モードの周波数差 $\Delta f_d (=f_2 - f_1)$ は増加する．ここに、摂動を装荷しない場合（ $\Delta s=0$ ），すなわち、切り込み等のない通常の円形または正方形の MSA の場合には、#1 と #2 の共振周波数が等しくなり（ $\Delta f_d=0$ ），その合成モードに対応するモードが励振される．

一方、#1 と #2 モードの励振分布の交点が -3dB （振幅分布では 0.707 ）となるように摂動量（ $|\Delta s/S|$ ）を調整すれば、#1 と #2 モードの相対位相差は約 90° となり、この種の MSA 素子は円偏波アンテナとして作動する．このように摂動量には円偏波を発生させるための最適値が存在することがわかる．また、図 2.3 に示すように給電点に対する摂動素子の装荷位置を制御することにより、容易に右旋（RHCP）または左旋（LHCP）偏波の円偏波アンテナを実現することができる．

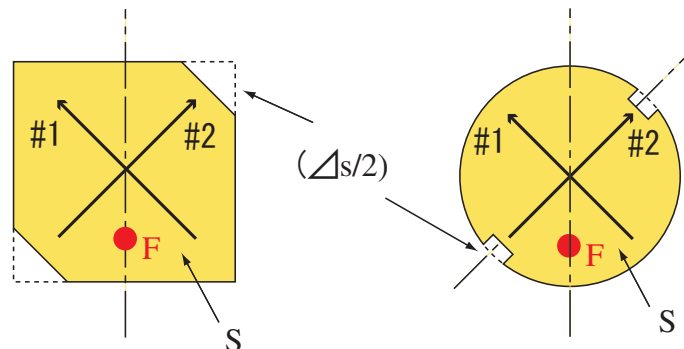


図 2.4：縮退分離

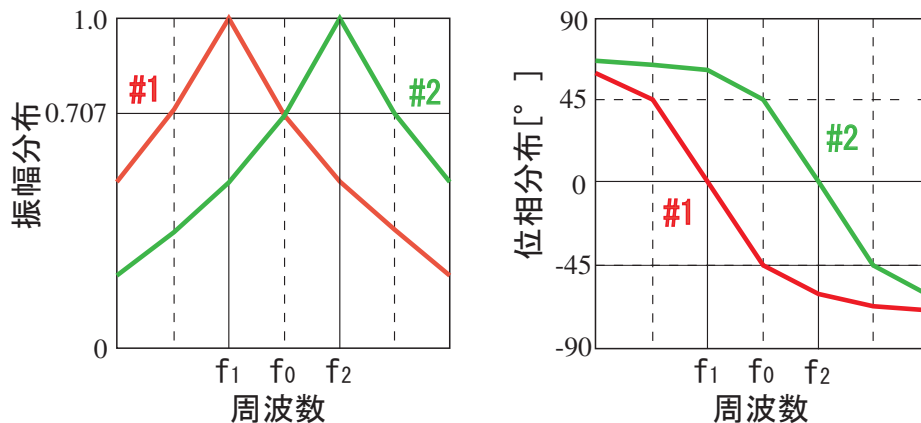


図 2.5：1点給電型円偏波 MSA の動作原理-振幅分布および位相分布

このように円偏波はアンテナに特別な工夫を施さなければならない．それでも円偏波を用いる理由は，次のケースが考えられる [4]．

- 衛星移動通信

衛星からくる電波を地上で移動しながら受信する場合，直線偏波を用いると，移動しながらアンテナを回転して偏波の方向に一致させる必要があるが，円偏波を用いるとその必要はない．

- 衛星放送

放送衛星からくる電波は国境を越えて隣国にも照射するのが普通である．隣接する国が互いに逆まわりの円偏波を用いると，同じ円偏波アンテナで隣国のテレビ放送を見ることはできない．衛星放送では日本は右回り，韓国は左回りの円偏波が割り当てられている．衛星放送に直交する直線偏波を割り当てたとすると，アンテナを 90° 回転すれば隣国のテレビを見ることができてしまうからである．

- レーダ

レーダに円偏波アンテナを用いると，円板のような伝搬方向に対して軸対称の反射物からの反射波は受信できない．電界の回転方向は進行方向と反射波は同じ向きになり，反射波は逆まわりの円偏波になるためである．雨や雲などの水滴は丸く軸対称に近い形なのに対して，検知すべき航空機や船舶は複雑な形をしている．レーダに円偏波を用いるのは，雨や雲からの反射波は受信しにくくし，航空機や船舶からの反射波は受信しやすくするためである．

2.2 壁面設置型アンテナの受信素子

2.2.1 円偏波受信素子

この節では BS の円偏波受信に使用する矩形マイクロストリップアンテナの基礎検討を行う。本論文で検討した円偏波受信素子であるマイクロストリップアンテナの素子構造を図 2.6 に示す。アンテナ構造を簡単にするため、誘電体基板が一層で構成できるものを考えた。同様の構造は斜め偏波のミリ波レーダ用としても提案されたが [5]、本研究のアンテナはその形状を方形パッチとすることで円偏波励振アンテナに応用しようというものである。車載ミリ波レーダは図 2.7 に示すような基本構造で、進行路の測定や、前方の障害物の検知、また車々間通信を行いながら車間距離を制御するために用いられる。図 2.6 の構造で円偏波が放射されるとの報告があるが [6]、詳細な設計パラメータが明らかになっていないこと、またビームチルト型アンテナとして使用するため新たに検討を行う。図 2.6 のアンテナはマイクロストリップ給電線路と矩形パッチで構成されるきわめてシンプルな構造である。マイクロストリップ線路を給電線として、矩形パッチは円偏波放射素子として動作する。比誘電率 $\epsilon_r=3.6$ 、基板厚 $t=1.2\text{mm}$ の誘電体基板上に矩形パッチの頂点付近をマイクロストリップ線路に直接接続し、線路損失の低減をねらいとしている。線路幅は 50Ω の給電線路になるように決定した。図 2.6 のアンテナは、誘電体基板上を通るマイクロストリップ線路に流れる電流が線路上に配置した矩形パッチに結合し、放射する進行波型のアンテナとして動作する。

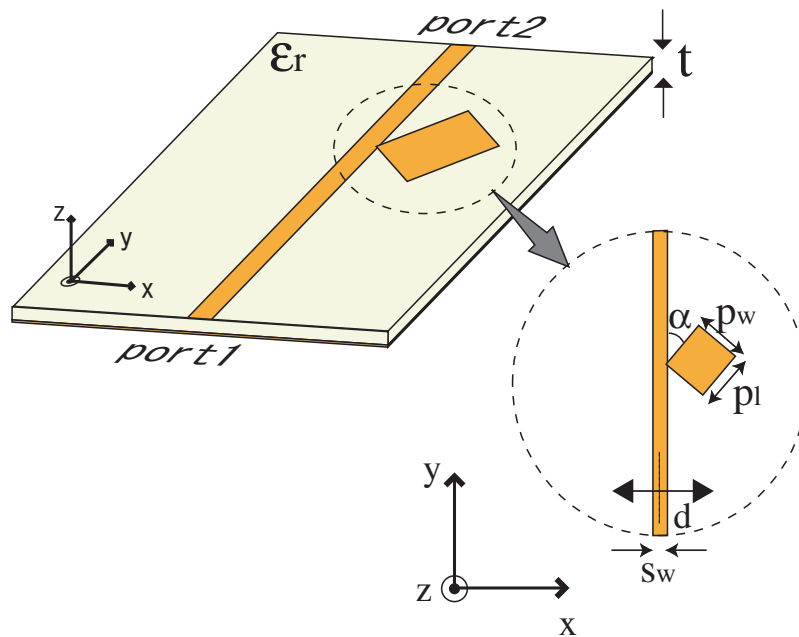


図 2.6 : アンテナの基本構造

また本アンテナは円偏波が励振するように縮退する直交モードを利用している．すなわち長方形のパッチを考えたとき，それぞれの辺の長さに対応する共振周波数 f_1, f_2 の中央部付近の周波数 f_0 でそれぞれの辺の共振が共に生じるように，パッチの対角線上で励振する方法である．円偏波励振するためには f_1, f_2 両モードの f_0 での位相差を 90° となるように， $\Delta f = f_2 - f_1$ を設定すればよいが， Δf はパッチの辺の比によって決定される [3]．

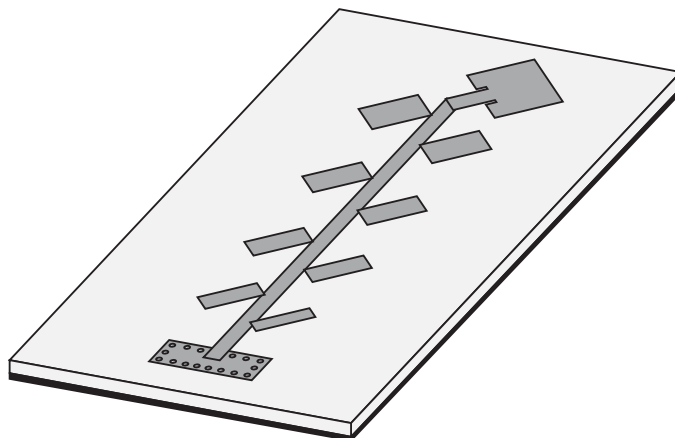


図 2.7：車載ミリ波レーダ用アンテナ

2.2.2 マイクロストリップアンテナの主要特性

解析パラメータは図 2.6 に示すように矩形パッチの長さ P_l ，幅 P_w ，パッチとマイクロストリップ線路のなす角 α ，パッチの頂点からストリップ線路の中心までの距離 d である．解析はモーメント法による 3次元電磁界シミュレータである Zeland 社製 IE3D を用いた [7]．

はじめにパッチ 1 素子について検討を行った．まず， α をパラメータとして軸比の周波数特性を計算したものを図 2.8 に示す．このとき周波数に依存性のある d を 1.0mm に， P_l, P_w をそれぞれ $6.7\text{mm}, 6.0\text{mm}$ に固定し， 12GHz 近傍でアンテナが動作するように設定している．図 2.8 から軸比 3dB 以下の帯域幅が広く取れる α の範囲が存在することがわかる．また，図 2.9，に α をパラメータとしたときのリターンロス特性を，図 2.10 に放射指向性を示す．図 2.9 より使用周波数帯域内で $-10 \sim -15\text{dB}$ 以下の反射量に抑えられた．図 2.10 に示す放射指向性によると，最大放射方向はアンテナ正面から給電方向に約 25° であり，左旋円偏波が小さく抑えられ良好な右旋偏波を放射していることがわかる．

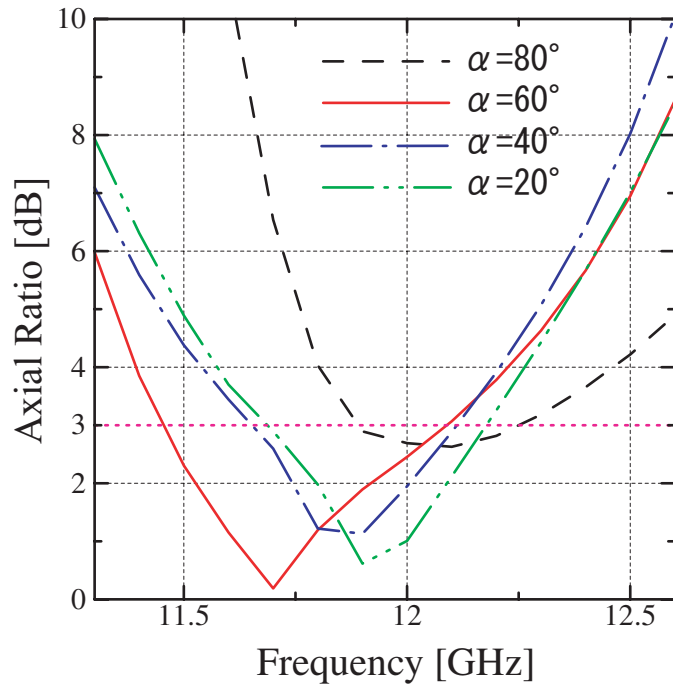


図 2.8 : 軸比の周波数特性

α : 変数 , $P_l=6.7\text{mm}$, $P_w=6.0\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$: 固定

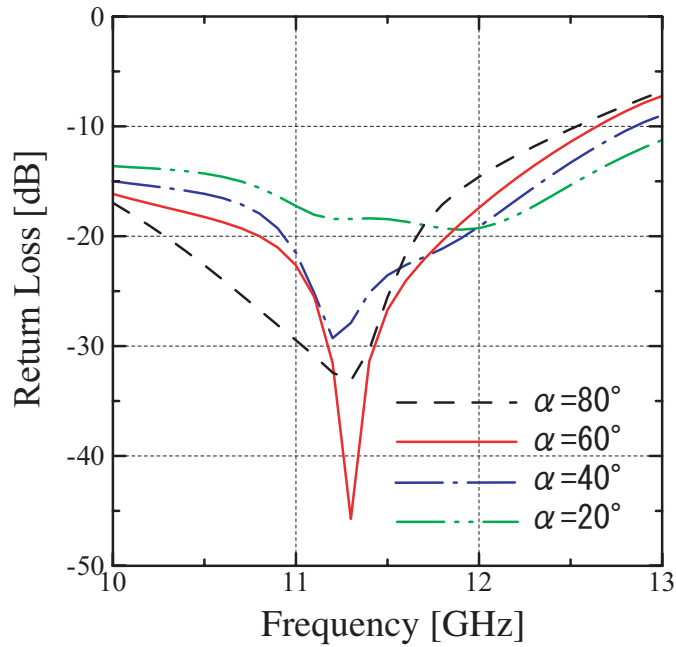


図 2.9 : リターンロス特性

α : 変数 , $P_l=6.7\text{mm}$, $P_w=6.0\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$: 固定

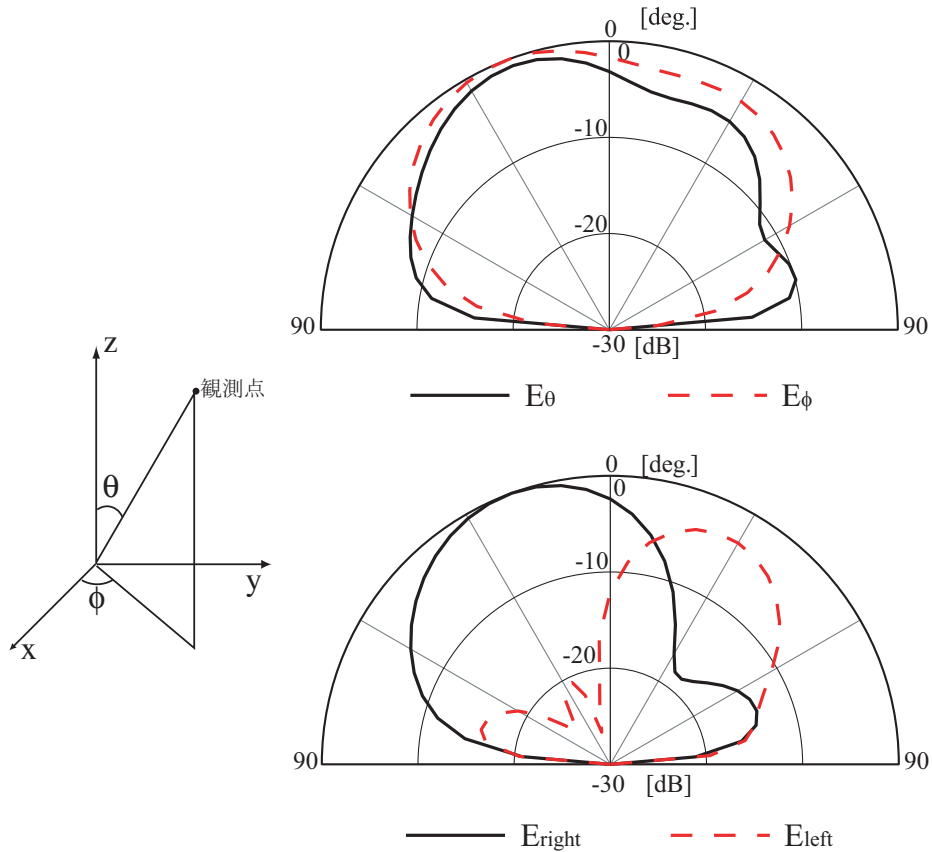


図 2.10 : 放射特性 ($\alpha=60^\circ$, 11.7GHz)

E_{left} , E_{right} はそれぞれ左旋円偏波, 右旋円偏波の電界強度

次にパッチの辺の比を決めるため $\alpha=60^\circ$ に固定し, P_l , P_w をパラメータとして, 同様に軸比の周波数特性およびリターンロス特性を計算した. はじめに $P_w=6.0\text{mm}$ と固定し, P_l を変数としたときの軸比の周波数特性を図 2.11 に示す. パラメータによる軸比の周波数特性の最適化を行う際, 軸比が最も小さい値をとれる場合と, 周波数帯域幅が最も広くとれる場合のいずれかの選び方があるが, ここでは一般にマイクロストリップアンテナの周波数帯域特性が狭いことを考慮して後者の方法でパラメータを選択した. よって図 2.11 から軸比 3dB 以下の帯域が最も広くとれる値として $P_l=6.9\text{mm}$ に固定し, さらに P_w をパラメータとして同様の計算を行った結果が図 2.13 である. 図 2.13 から $P_w=6.0\text{mm}$ のとき軸比 3dB 以下の帯域が最も広くとれた. 以上の結果からわかるように, α , P_l , P_w に関して 3dB 以下の軸比の周波数帯域幅を広くする最適値が存在する.

図 2.14 に P_w を変数としたリターンロス特性を示すが, P_w による周波数シフトは見られず, いずれも -10dB 以下の反射量に抑えられている.

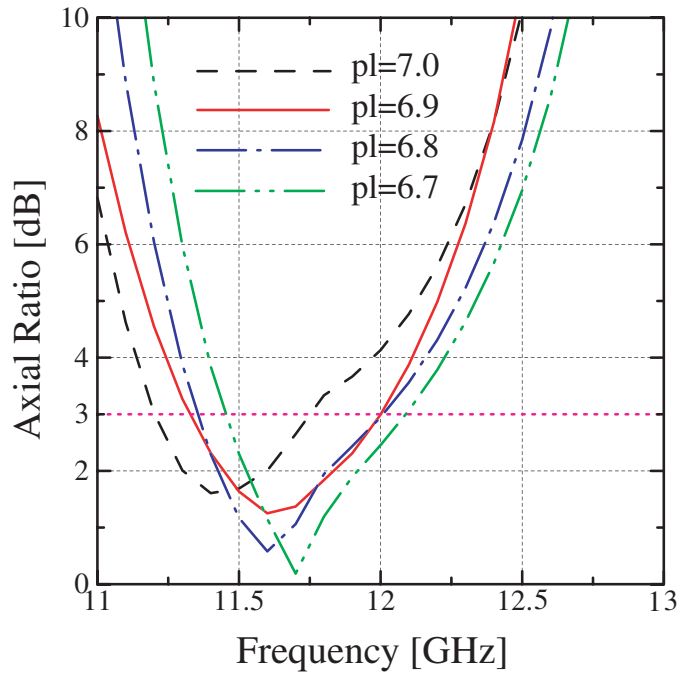


図 2.11 : 軸比の周波数特性

P_l : 変数 , $\alpha=60^\circ$, $P_w=6.0\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$: 固定

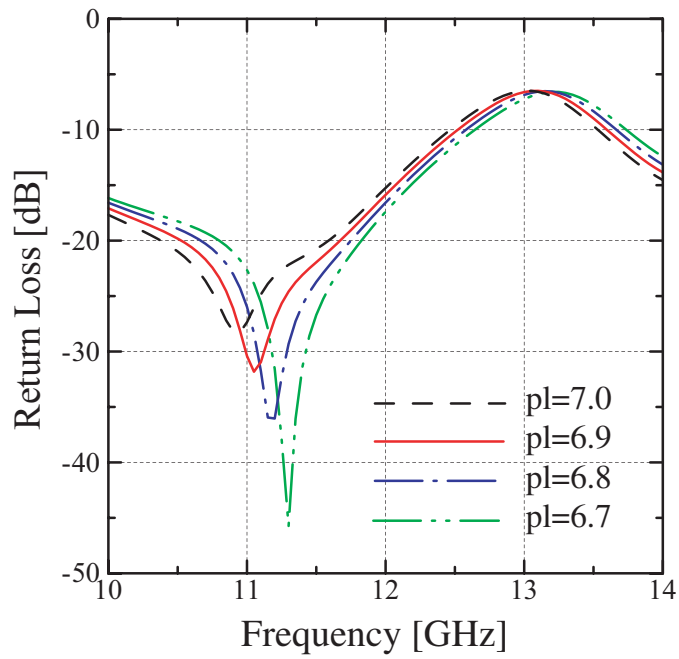


図 2.12 : リターンロス特性

P_l : 変数 , $\alpha=60^\circ$, $P_w=6.0\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$: 固定

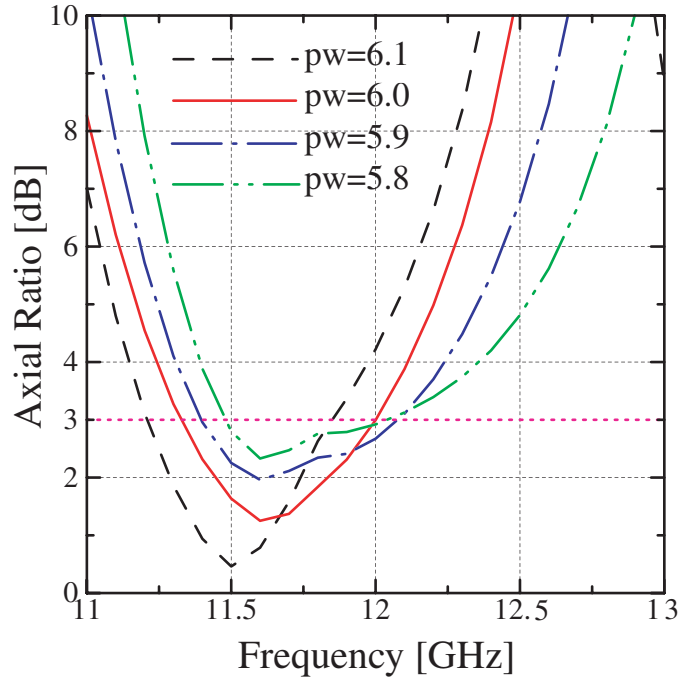


図 2.13 : 軸比の周波数特性

P_w : 変数 , $\alpha=60^\circ$, $P_l=6.9\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$: 固定

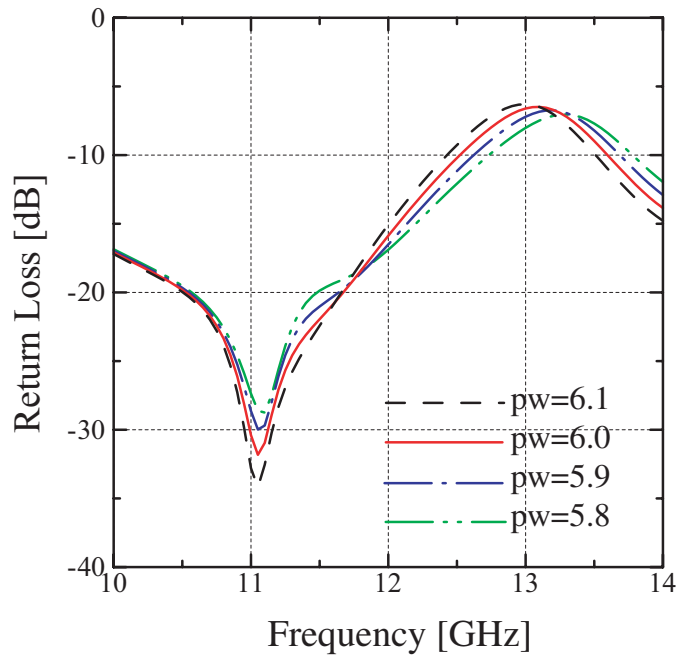


図 2.14 : リターンロス特性

P_w : 変数 , $\alpha=60^\circ$, $P_l=6.9\text{mm}$, $d=1.0\text{mm}$: 固定

次に図 2.6 に示す d を変数として特性を調べた．図 2.15 に d を変化させたときの軸比の周波数特性を示す． d が小さくなるにつれ矩形パッチはマイクロストリップ線路と一体になり，辺の長さが見かけ上短くなるため図 2.15 に示すように周波数が高周波側にシフトする．図 2.15 からパッチ単素子ではオフセットの値を小さくするにつれ，軸比 3dB 以下の帯域は広く取れることがわかる．しかし図 2.17，に示すようにアレイ化すると単素子の場合と同じく周波数はシフトするが，軸比の周波数帯域幅は単素子の場合ほど d による顕著な変化が見られないことがわかる．また，図 2.16，図 2.18 からパッチ単素子，アレイ化いずれの場合も 12GHz 近傍において，リターンロス特性の d による影響は小さい．これらの解析結果から素子をアレイ化した場合， d は P_l, P_w と同様アンテナの周波数に依属するパラメータとして捉えることができる．

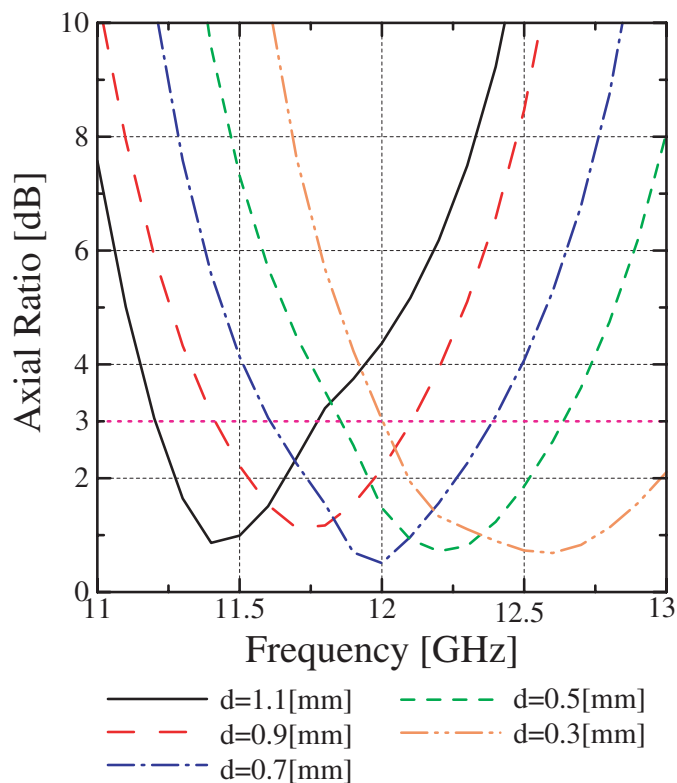


図 2.15 : 軸比の周波数特性

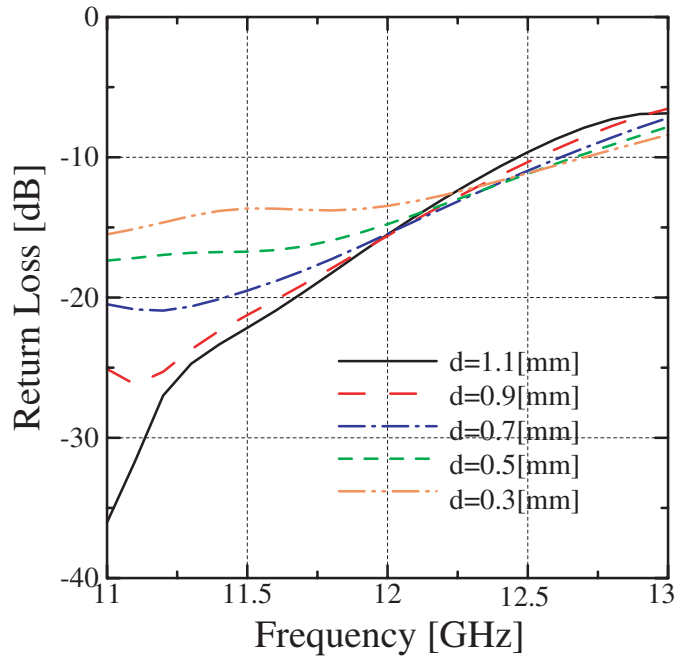


図 2.16 : リターンロス特性

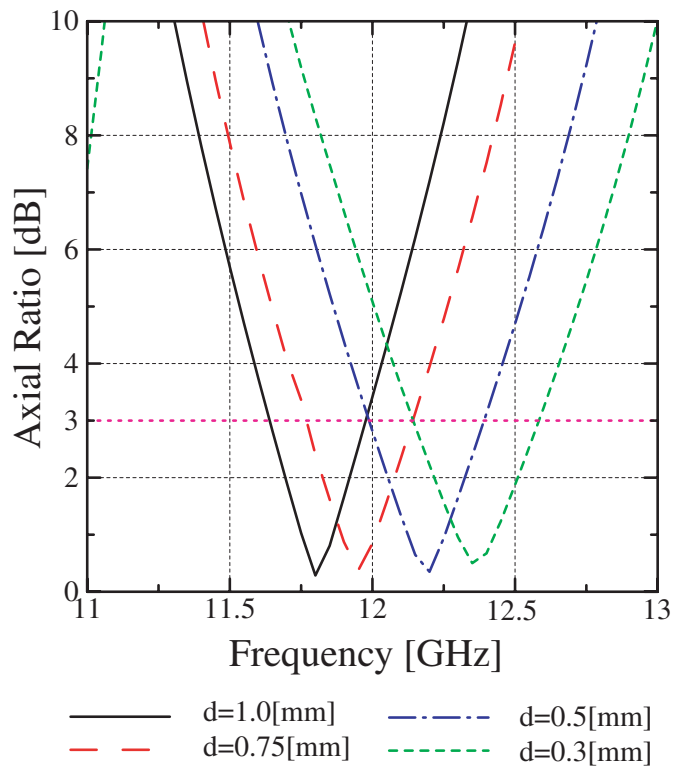


図 2.17 : 軸比の周波数特性 (8 素子アレイ)

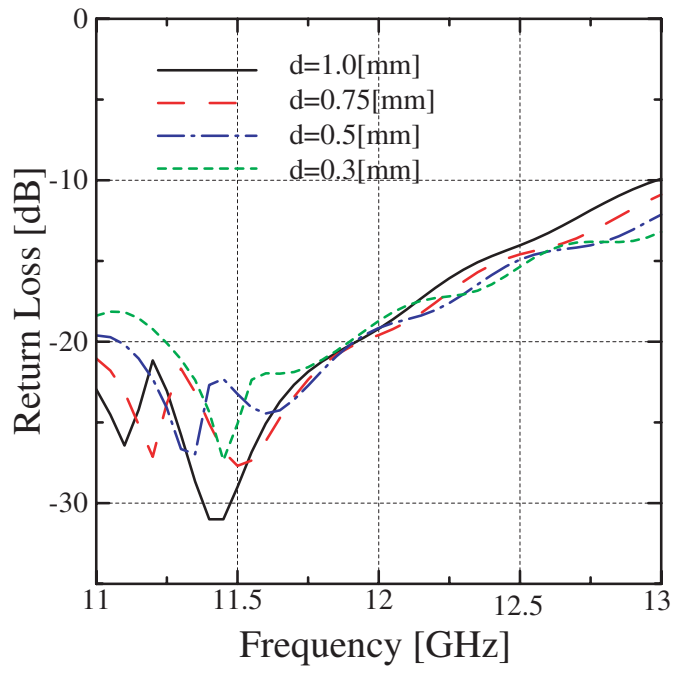


図 2.18 : リターンロス特性 (8素子アレイ)

2.3 まとめ

本章では壁面設置型平面アンテナを構成するサブアレイを設計するにあたり、まず円偏波受信素子であるパッチ単素子の設計をした。第1節では円偏波の概要と、マイクロストリップアンテナの円偏波励振技術について触れ、第2節ではそれを踏まえてアンテナの素子構造を設計した。IE3Dによる解析結果から、円偏波励振に作用するパラメータを割り出し、円偏波を放射する受信素子の設計を実現した。

表 2.1：単素子矩形パッチアンテナの主要特性

素子数	1 素子
誘電体基板	$\epsilon_r=3.6, t=1.2\text{mm}$
周波数帯	12GHz
最大放射方向	アンテナ正面より 25 °方向
反射損失	帯域内-10dB 以下
軸比 3dB 以下帯域幅	680MHz
偏波	右旋円偏波

第 3 章

ビームチルト型マイクロストリップアレイアンテナ

この章では、壁面内蔵型平面アンテナを構成するサブアレイについて検討を行い、主要特性を考察することによって 12GHz 帯で使用する BS アンテナとしての適応性を検証する。まず、アンテナの最大放射方向を人工衛星の方向に向けるために、ビームをチルトさせるための検討から行い、さらに前章で検討してきた 1 次元直列アレイを 2 次元の平面並列アレイに応用するために必要な同相励振用電力分配部の設計を行う。3.3 節ではその電力分配部を用いて 2 次元アレイアンテナを構成し、軸比、利得等の主要特性を得た。3.4 節でまとめとする。

3.1 ビームチルト型アンテナの構成

本節では、前章のパッチ素子を使用した直列アレイの設計および製作し、IE3D による解析値と実験値との比較を行い特性の評価を行う。今回提案する壁面設置型ビームチルトアンテナは地面に対してアンテナ面が垂直になるように設置するため、仰角方向の指向性の制御が必要である。本研究ではその設計目標として最大放射方向が仰角 50° 、つまりアンテナ正面より 40° 方向に傾くビームチルトアンテナの設計、製作を行う。通常、アレイアンテナを設計する際には素子間隔はグレーティングローブの発生しない 1 波長以下の条件で使用し、またマイクロストリップで給電されるアレイは給電方向に最大放射方向がチルトするのが一般的である。漏れ波型アンテナとして動作する場合、チルト角はマイクロストリップ線路の伝搬定数によって決定されるが、共振特性をもつ放射素子を用いると、その素子間隔によってチルト角が変化する。

そこでまず指向性を制御するため図 3.1 に示すようにパッチを直列に 4 素子並べ、パラメータを素子間隔 d_y としたときの放射指向性を計算した。図 3.2 はその計算結果である。

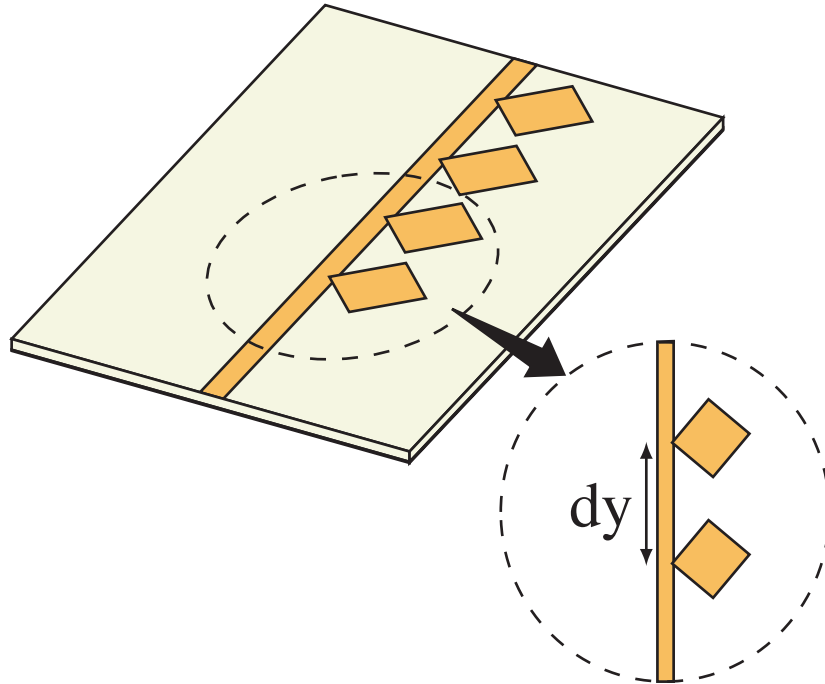


図 3.1 : 4 素子アレイアンテナ

図 3.2 に示すように管内波長 λ_g に対してアンテナ主ビームのチルト角は $d_y=0.81\lambda_g$ のとき 25° , $d_y=0.78\lambda_g$ のとき 30° , $d_y=0.74\lambda_g$ のとき 35° であった . 図 3.2 から , 素子間隔 d_y を詰めることにより徐々にビームは傾斜していき , 素子間隔を変化させることによって最大放射方向を制御できることがわかる . ただし管内波長 λ_g は以下の式より導出される . ε_r は基板の比誘電率 , ε_e は等価誘電率 , W はストリップ線路の幅 , t は基板の厚さを表す .

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_e}}, \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r - 1}{2} + \frac{\varepsilon_r + 1}{2\sqrt{1 - \frac{10t}{W}}} \quad (3.1)$$

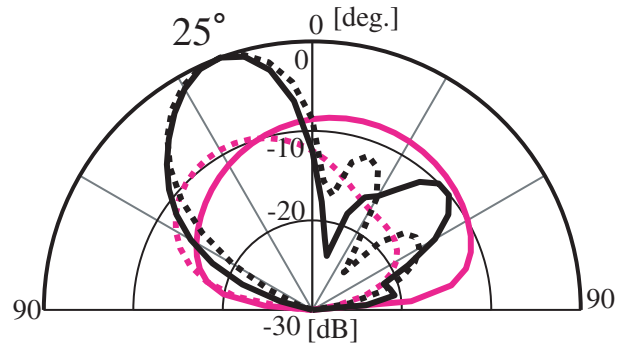
図 3.3 はさらにパッチ素子を直列に 20 素子並べたアレイアンテナの放射指向性を示す . この図からアンテナは設計目標通りチルト角約 40° 方向に鋭くビームがチルトしていることが確認できる . また , 図 3.3 (b) に示すとおり , アンテナは左旋円偏波が十分小さく抑えられ , 良好な右旋円偏波を放射していることがわかる .

ところで 2.1 節でふれたように日本では BS 放送波に右旋円偏波を使用しているが , 韓国では左旋円偏波を使用している . そこで左旋円偏波を受信するためには図 3.4 (a) に示すようにパッチ素子をマイクロストリップ線路の左側に配置すればよい . 図 3.4 の (a) と (b) のアンテナは左旋円偏波と右旋円偏波の違い以外は全く同じ特性を持つアンテナである .

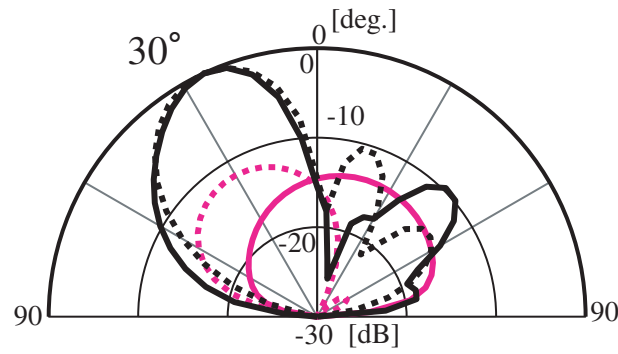
図 3.5 にアレイ素子数に対する利得の変化を算出した結果を示す . これよりパッチ直列

アレイは 20 素子あたりで利得 15dBi 程度のピークを迎え，さらに素子数を増やしてもほとんど利得の増加は見られないことが予想される．

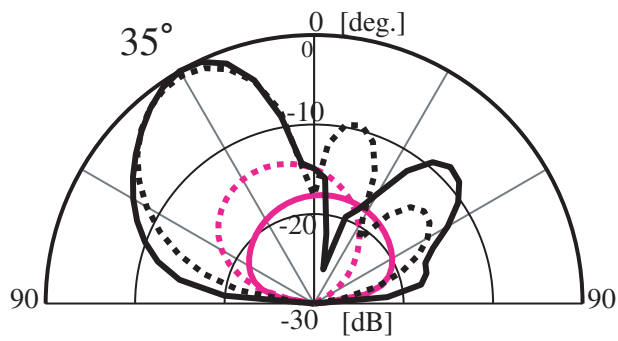
これらの計算結果をもとにマイクロストリップ線路 1 列に矩形パッチを 20 素子配列させたアレイアンテナを製作し，S パラメータおよび放射指向性の測定を行った．図 3.6 に示す測定装置の略図のように，アレイアンテナのポート 1，ポート 2 をネットワークアナライザに接続し，S パラメータを測定した．図 3.7 より反射特性，透過特性とも電力レベルが低いところでの比較なので双方が一致しているとは言えないが，双方ともに -15dB 以下に抑制されていることが確認できる．また電波暗室内で放射指向性を測定した．図 3.8 はその測定結果と解析結果を比較したものであり，ともに約 40 ° 方向にビームが傾斜しておりそれぞれ概ね一致した結果といえる．また図 3.9 は擬似的に円偏波環境を作り出すスピリニア偏波で測定した放射パターンである．このスピリニア偏波とは，被測定アンテナの水平面内の回転速度に対し十分速い速度で偏波面を回転させることで，被測定アンテナで受信する電波の偏波・位相を変化させ，擬似的に円偏波環境を作り出す偏波のことである [8]．図 3.9 からアンテナの最大放射方向において軸比は 2dB 弱と低く抑えられていることが見てとれ，円偏波励振アンテナとして比較的良好な特性を有しているといえる．



(a) $d_y = 0.81\lambda_g (=12[\text{mm}])$



(b) $d_y = 0.78\lambda_g (=11.5[\text{mm}])$



(c) $d_y = 0.74\lambda_g (=11[\text{mm}])$

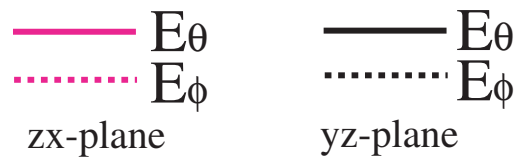
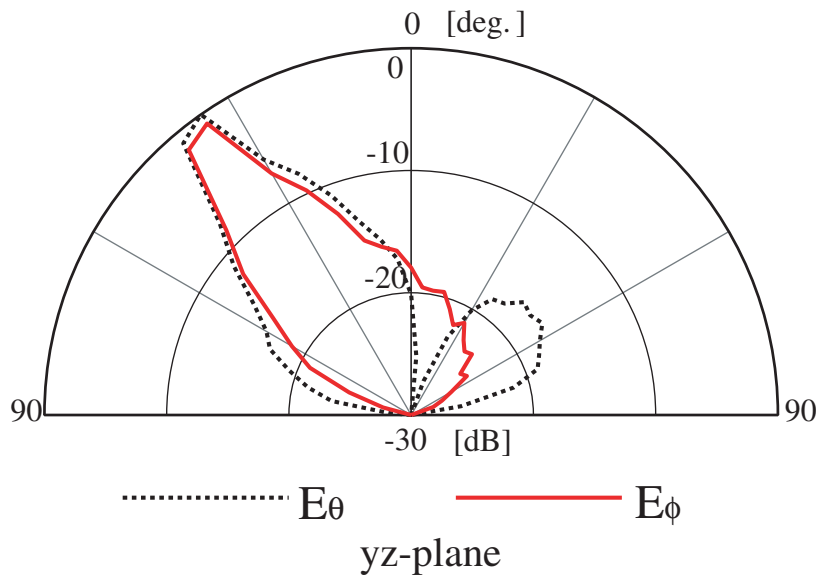
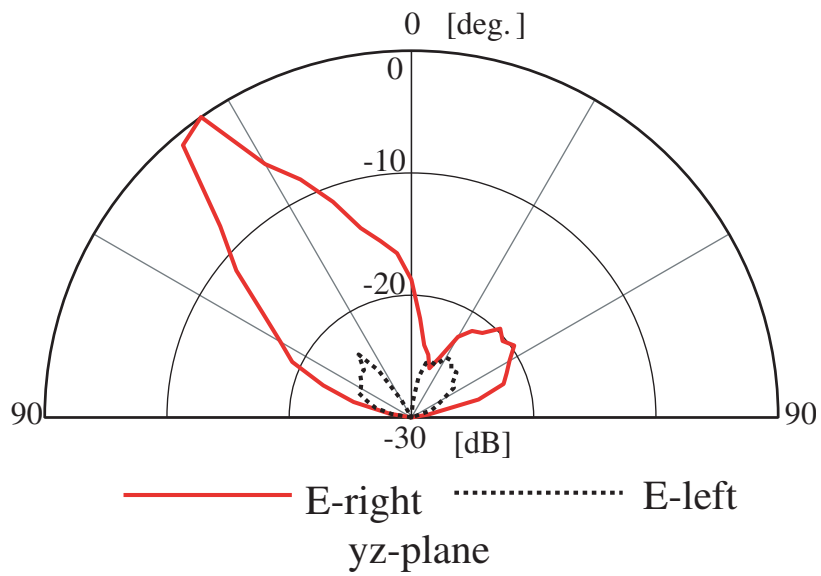


图 3.2 : 放射指向性



(a) E_θ and E_ϕ



(b) E-right and E-left

図 3.3 : 放射指向性 : 11.85GHz

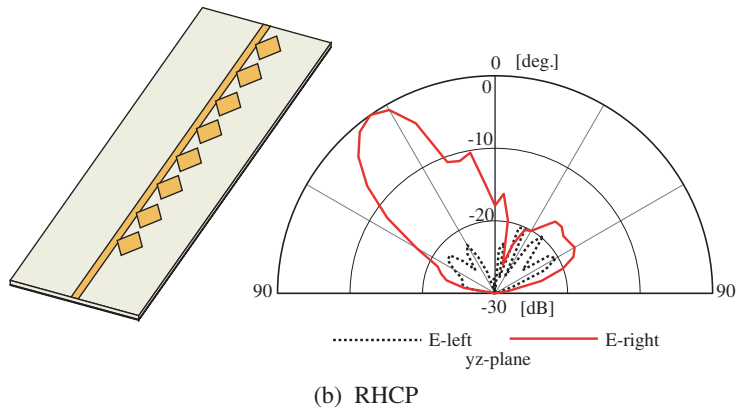
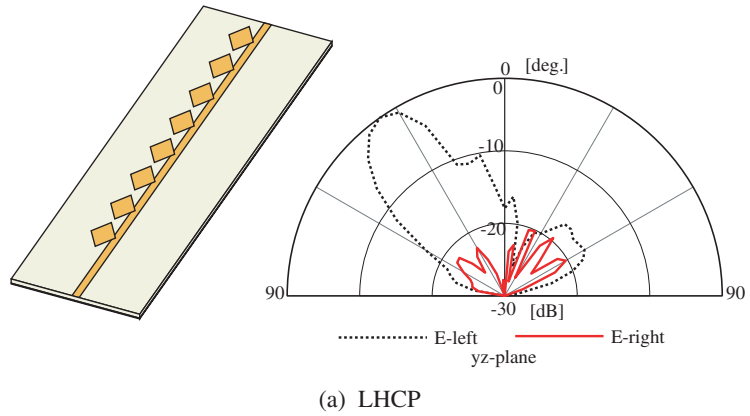


図 3.4 : LHCP と RHCP

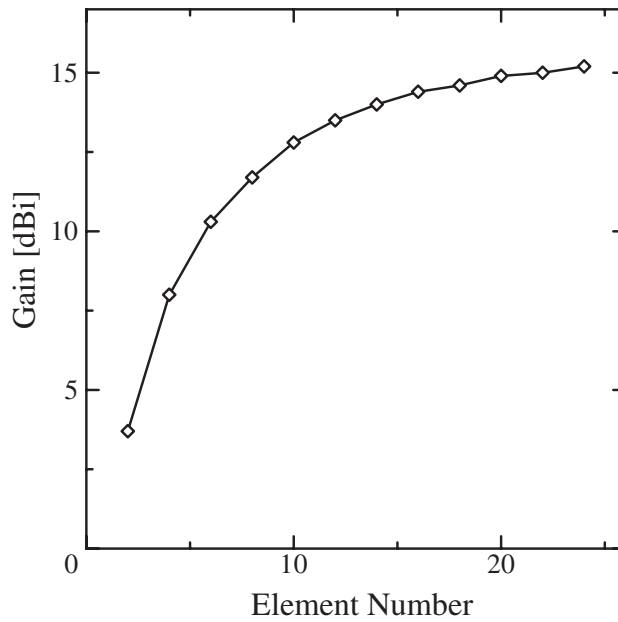


図 3.5 : パッチ直列アレイの利得特性

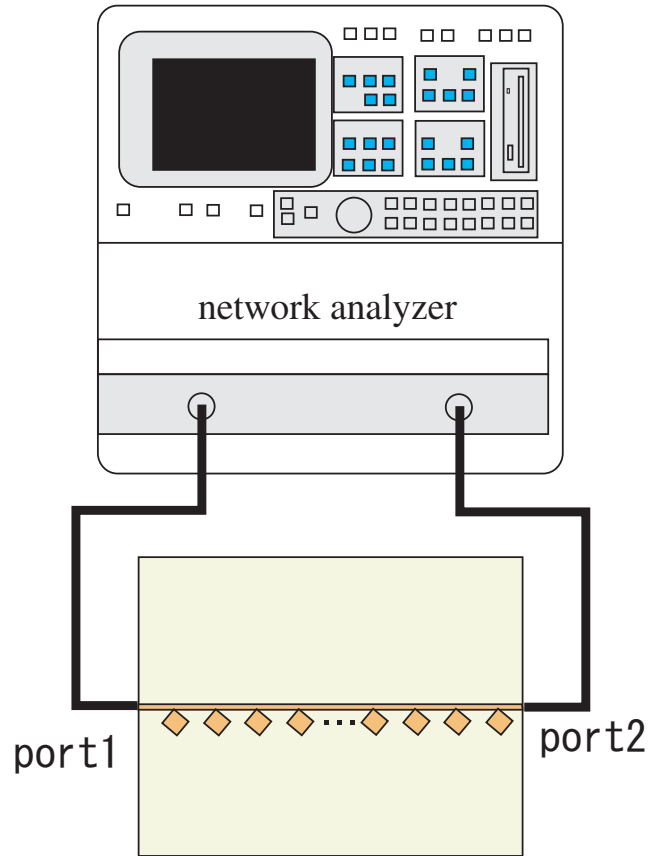


図 3.6 : S パラメータ測定装置の略図

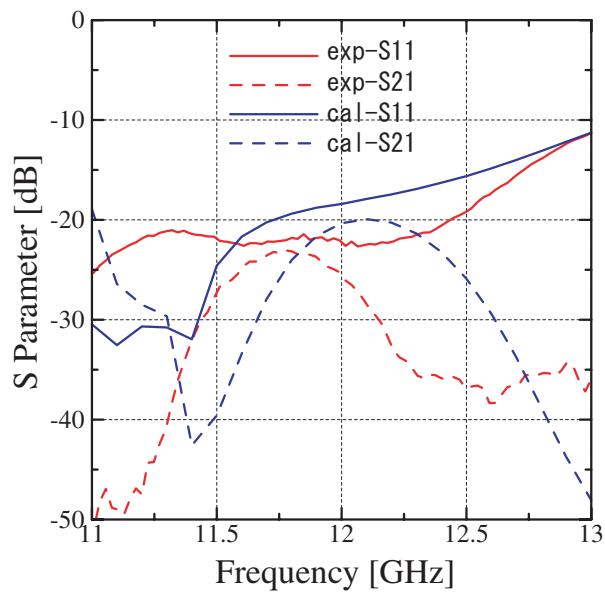


図 3.7 : S パラメータ特性 (測定結果)

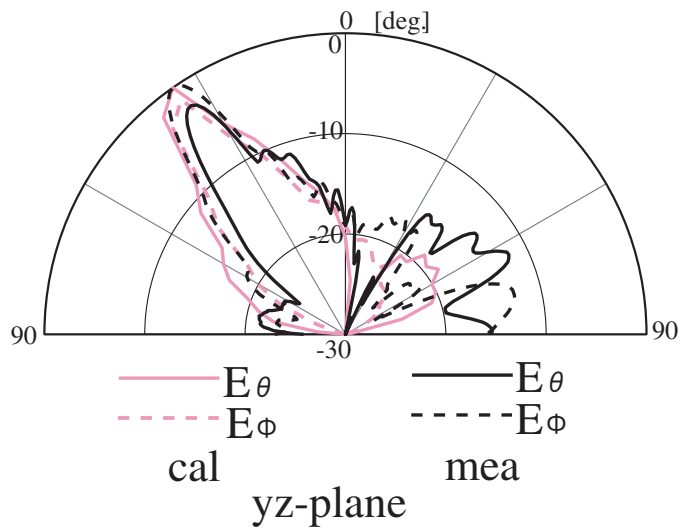


図 3.8 : 放射指向性 (測定結果 : 11.9GHz)

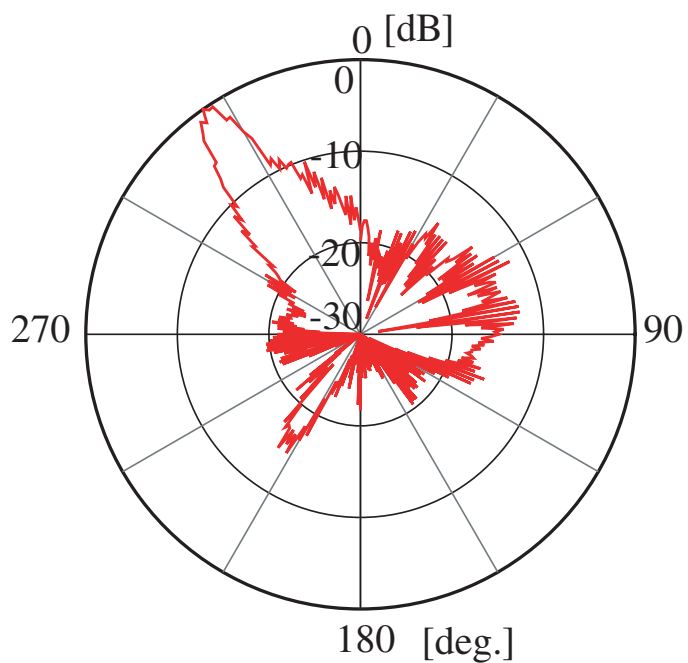


図 3.9 : 放射指向性 (スピンリニア偏波による測定 : 11.9GHz)

3.2 電力分配部

図 3.10 は 4 ポートに同相，同電力が分配される電力分配部の概念図を示す．ここでは 12GHz 帯で使用する平面アンテナを構成する際に用いるので，マイクロストリップ線路で構成される 4 分岐について設計，検討を行う．

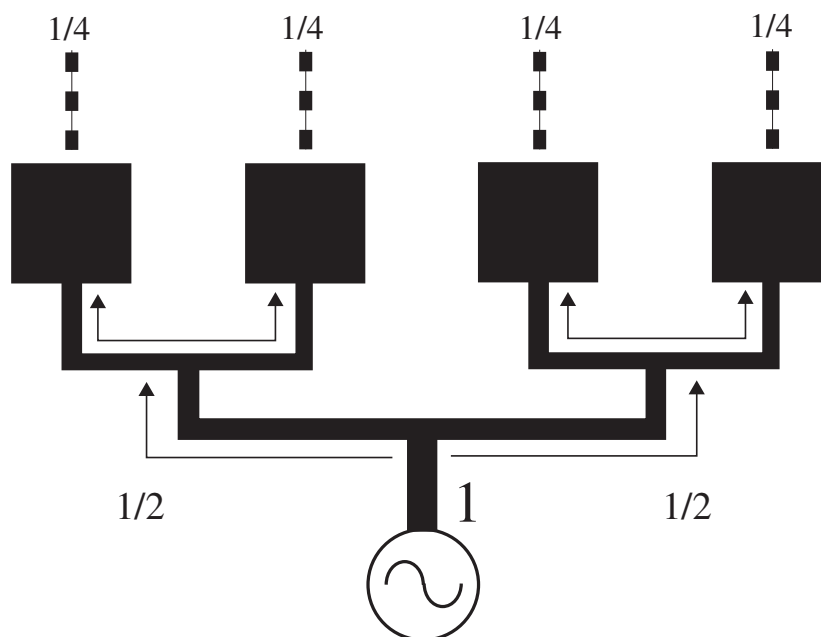


図 3.10 : 電力分配部の概念図

3.2.1 解析および実験モデル

給電プローブからアンテナ素子まで電力が到達するために，給電線路は合計 4 分割される必要がある．電力を 4 分配する際に，単純にストリップ線路を並列接続するのではなく，線路のインピーダンスが接続部分で連続になるように分配器を設計する必要がある．電力分配器には代表的なものにウィルキンソン型や T 分岐のものが存在する．本研究において検討するアンテナはマイクロストリップ線路にパッチ素子を配置する進行波型アンテナであり，ポート間のアイソレーションは十分とれるため，図 3.11 に示すウィルキンソン型分配器に用いられるような吸収抵抗を必要としない．そこでベンド部の反射低減をねらい，図 3.12 に示されるような電力分配器を新たに設計した．パラメータを $R_1, R_2, \beta_1, \beta_2$ としして解析し，各直列アレイに同振幅，同位相の電力を供給できるように検討した．この分配

器は単純な構造で比較的容易に製作できる利点がある。給電線路は特性インピーダンスが 50Ω と 70.7Ω の線路を主体に構成され、給電線路の分岐部分は $1/4$ 波長のインピーダンス変換器で構成した。

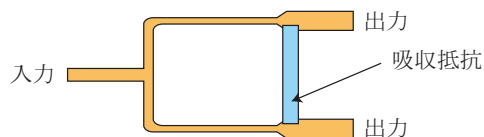


図 3.11 : ウィルキンソン型電力分配器

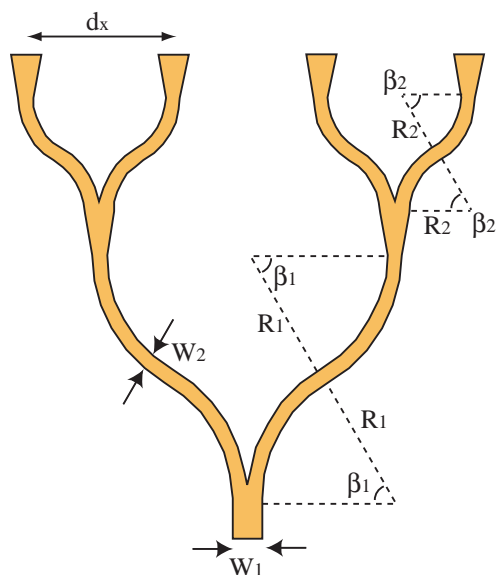


図 3.12 : 電力分配部

$\epsilon_r=3.6$, $t=1.2\text{mm}$, $R_1=12.35\text{mm}$, $R_2=5.85\text{mm}$, $\beta_1=\beta_2=60^\circ$, $d_x=13.0\text{mm}$,
 $W_1=2.60\text{mm}$, $W_2=1.31\text{mm}$

3.2.2 解析および測定結果

図 3.13 に電力反射損失特性を示す。図 3.13 より設計周波数帯域内で -15dB 以下と反射は低く抑えられ、解析、実験の結果もおおむね一致しているといえる。また図 3.14 に電力透過特性を示す。図 3.14 より透過量は -7.5dB 程度と若干の線路損失がみられた。 12GHz 帯という周波数を考えると比較的低損失な分配器の特性を有していることが確認できる。

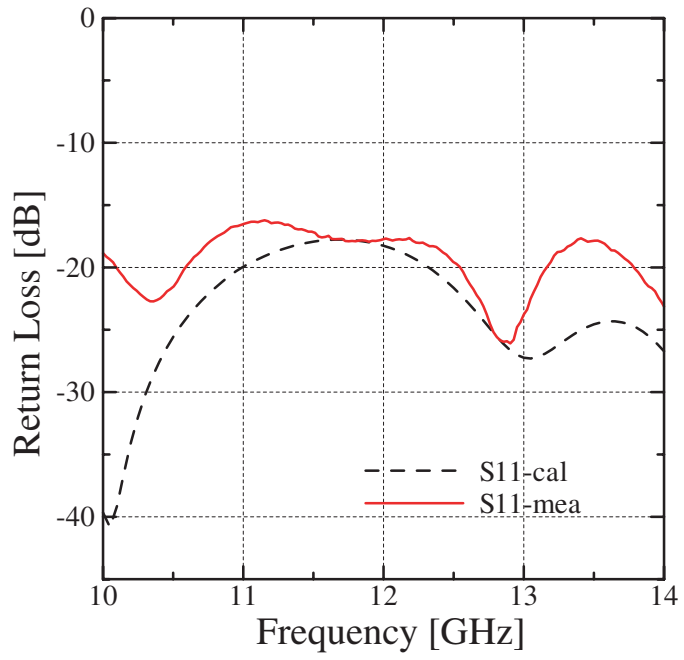


图 3.13 : 反射特性

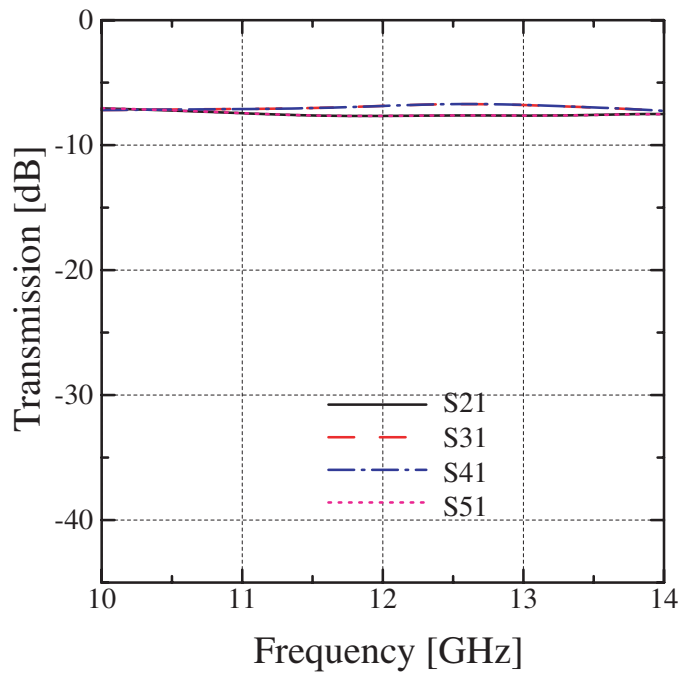


图 3.14 : 透過特性

3.3 2次元平面アレイアンテナ

3.3.1 マイクロストリップ平面アレイアンテナの構成

本節では、3.1節で考察してきた直列アレイアンテナと3.2節で考察した電力分配器を使用して薄型円偏波励振アンテナを設計し検討を行う。本研究で提案しているマイクロストリップアンテナは給電と反対方向に最大放射方向が制御されることが3.1節より確認されている。図3.15に壁面設置型平面アンテナを構成するサブアレイの基本構成を示す。このアンテナは円偏波受信素子である矩形パッチと給電線であるマイクロストリップ線路、同相、同振幅で電力を供給する電力分配器、またサブアレイの給電回路を構成する給電部とで構成される。3.2節で検討した分配器を使用してマイクロストリップアレイはy正方向へ給電する。アンテナの利得を考えると図3.5に示すように1列に20素子パッチを並べて15dBi程度なので、分配器を用いて4列×20素子程度のアレイアンテナが必要となる。IE3Dによる計算を行う際に、この規模の平面アレイを計算するのは莫大な計算量であり、実質不可能なため、まず解析モデルを図3.15に示すような4列×6素子アレイとして基礎検討を行った。サブアレイのパラメータの詳細を表3.1に示す。

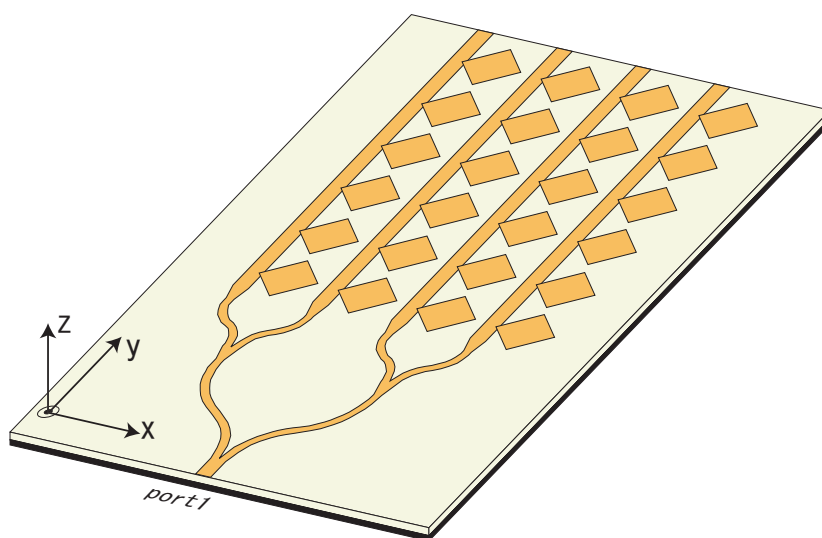


図 3.15 : アレイアンテナの構造

表 3.1 : 構成したサブアレイの解析パラメータ

素子数	4 列 × 6 素子
誘電体基板	$\epsilon_r=3.6, t=1.2\text{mm}$
素子寸法 (mm)	$P_l=7.0, P_w=6.1, d=0.75 \alpha=45^\circ$
素子間隔 (mm)	$d_y=11.0, d_x=13.0$
周波数帯	12GHz

3.3.2 マイクロストリップ平面アレイアンテナの主要特性

図 3.16 に 1×6 素子, 2×6 素子, 4×6 素子アレイアンテナにおける利得の周波数特性を示す. 通常アンテナの素子数が倍になれば利得も倍になるが, 図 3.16 に示すように, 解析した 1×6 素子, 2×6 素子, 4×6 素子アレイアンテナについても理論どおり設計周波数帯域内で利得がそれぞれ約 3dB ずつ向上していることが確認できた. このとき利得は 4×6 素子アレイアンテナで約 16dB であった. 利得に関しては図 3.5 に示すように 1×24 素子アレイについておよそ 15~16dBi 程度あり, 4 分岐電力分配器を用いると現状ではサブアレイ 1 枚で約 21~22dBi 程度見込まれる. なお, アンテナ構成については位相器の方式, および分配器の損失を最適化して今後検討する必要がある.

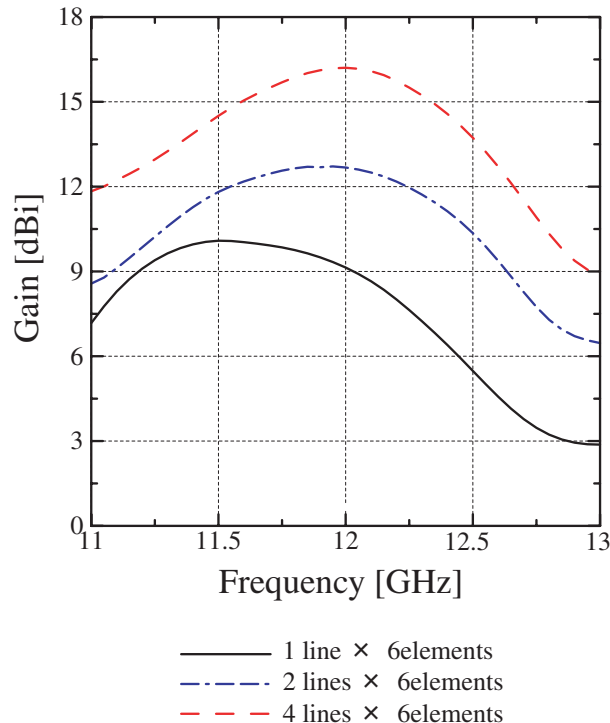


図 3.16 : 利得の周波数特性

また図 3.17 に 1×6 素子, 2×6 素子, 4×6 素子アレイの軸比の周波数特性を示す. 分岐することにより軸比の周波数特性を劣化することなく, 軸比 3dB 以下の帯域幅は約 500MHz 程度であった.

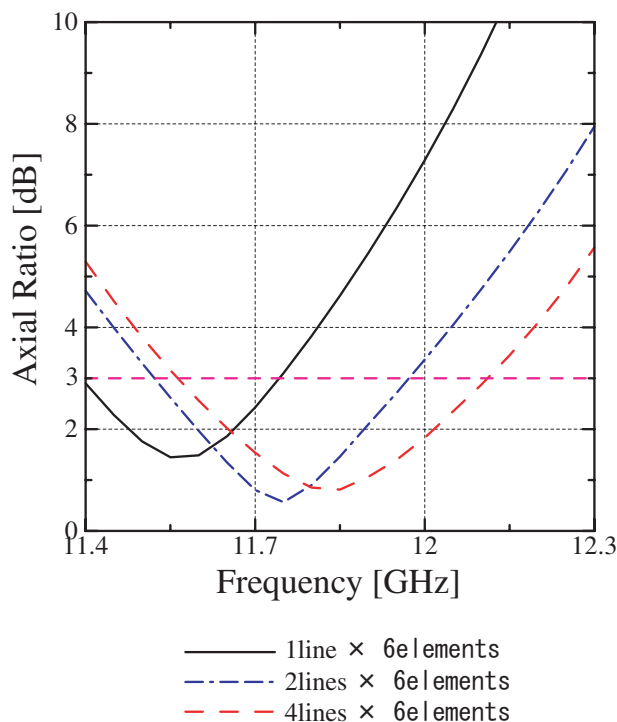


図 3.17 : 軸比の周波数特性

3.3.3 マイクロストリップ平面アレイアンテナの放射指向性

次に, 図 3.15 に示す 4×6 素子アレイの放射指向性の解析結果を図 3.18 から図 3.20 に示す. BS 放送波の周波数帯域から 11.7GHz, 12GHz およびその中間周波数の 11.85GHz における放射指向性を示しており, 図 3.18, 図 3.19, 図 3.20 はそれぞれ 11.7GHz, 11.85GHz, 12GHz における指向性である. 図 3.18, 図 3.19, 図 3.20 において (a) は E_θ および E_ϕ の差から円偏波放射特性を (b) は E_{left} に対する E_{right} の大きさから右旋円偏波放射特性をそれぞれ示したものである. これらの図を見てわかるように, アンテナの最大放射方向はアンテナ正面より約 40° 方向に制御されており, ほぼ目標通りのアンテナを設計することができた. また, 図に示すように 12GHz 帯の数百 MHz の帯域にわたり比較的良好な円偏波を励振していることが確認できる.

また解析結果をもとに 2次元アレイを試作, 測定し, 解析結果と比較した. 図 3.21, 図 3.22

は 4 列 × 4 素子アレイの放射特性および S パラメータ特性である．図 3.21 から測定結果は解析結果と良く一致し，製作したアンテナは解析通り動作していることを確認した．S パラメータについても図 3.22 に示すように概ね一致しているといえる．

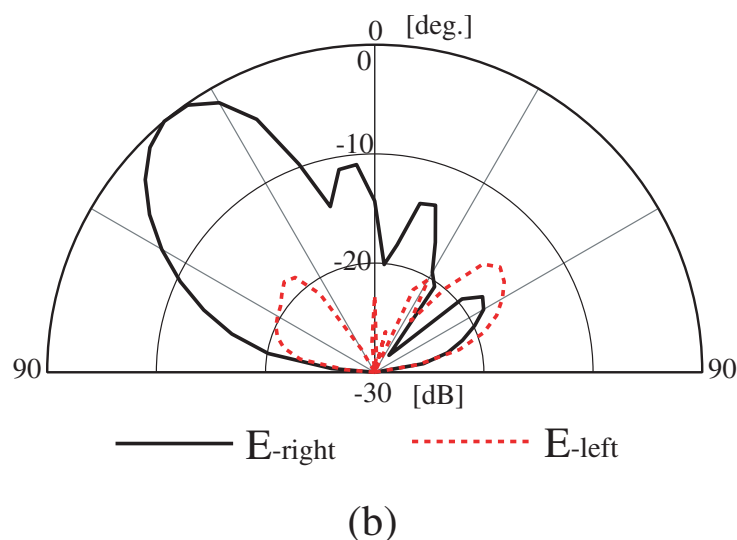
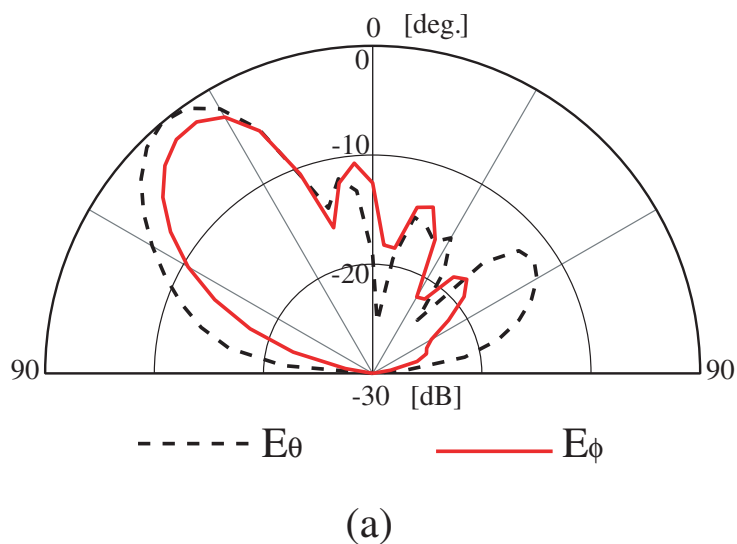


図 3.18 : 放射指向性 (11.7GHz)

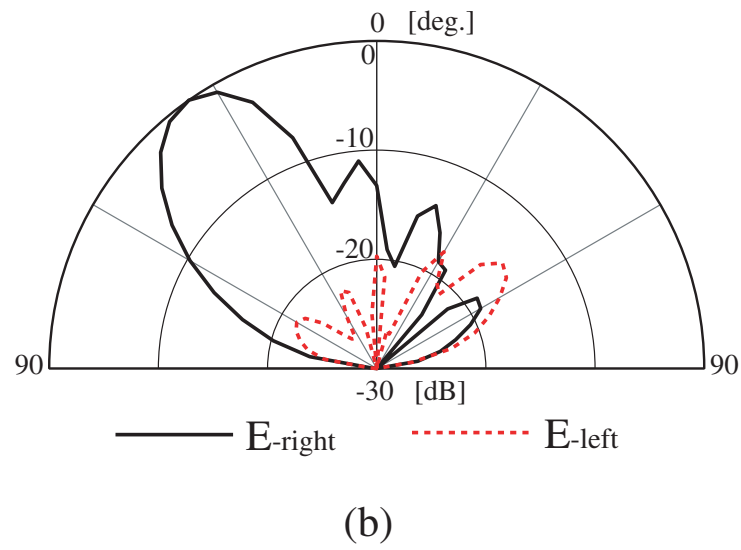
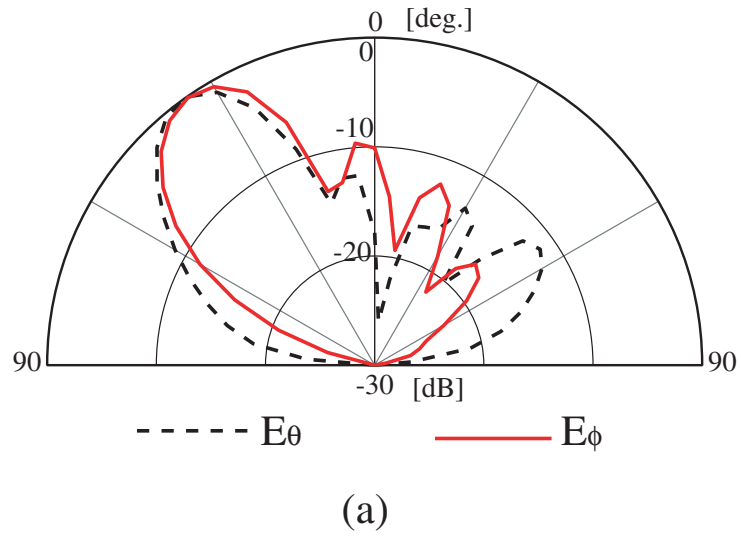
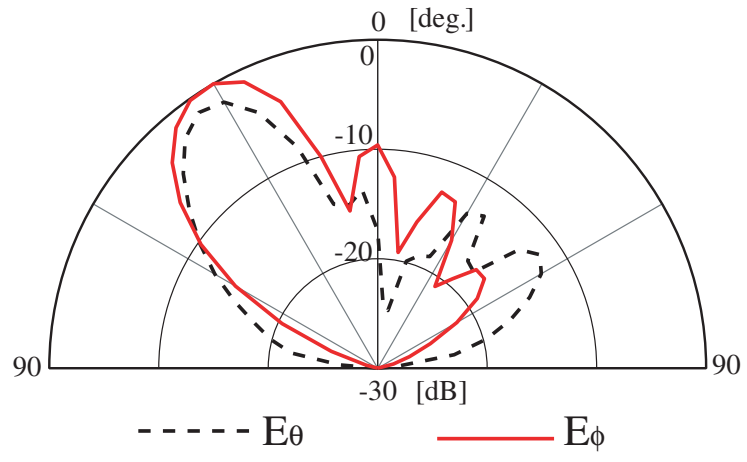
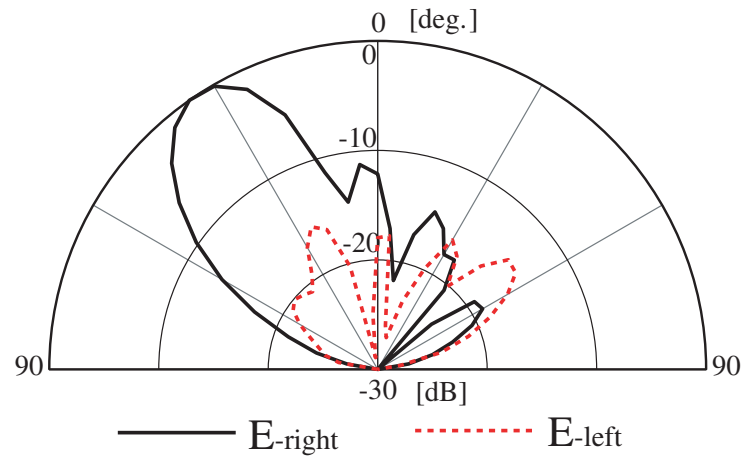


图 3.19 : 放射指向性 (11.85GHz)



(a)



(b)

图 3.20 : 放射指向性 (12GHz)

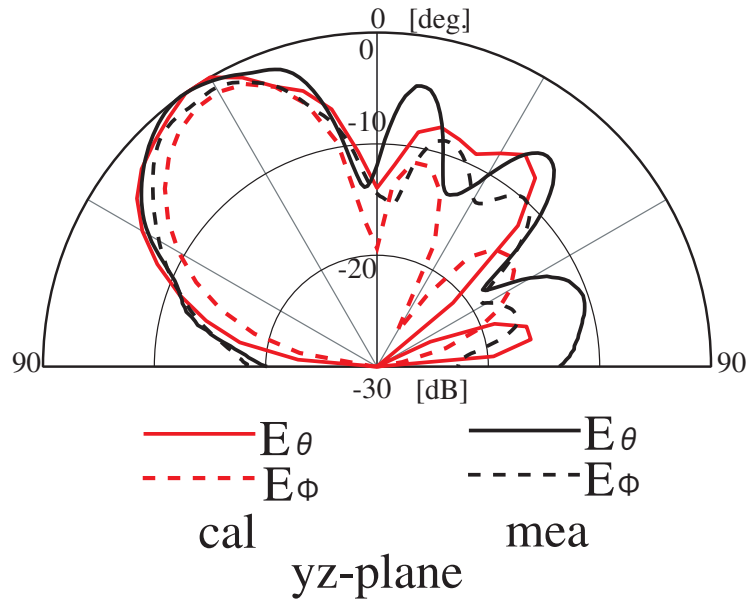


図 3.21 : 放射指向性 (11.9GHz)

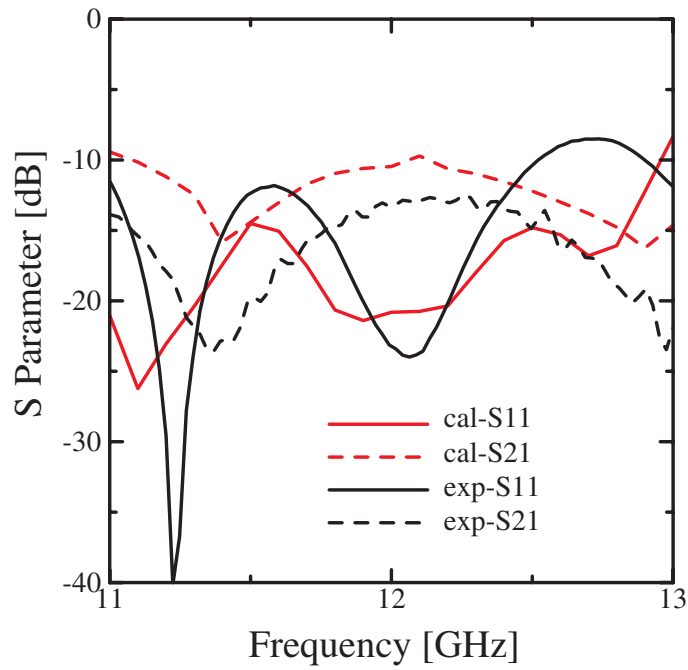


図 3.22 : S パラメータ

さらに円偏波受信素子であるパッチ素子を並べ、4列×20素子のアレイアンテナを製作し、主要特性を得た。図 3.23 に示す製作したアンテナは、寸法が 110×263mm であり、アンテナを約 10cm 程度の厚さの壁面内部に設置することを想定すると、実際に壁面に埋め込むアンテナがこの程度の大きさで実現できれば水平面内の自由度はかなりとれる。図 3.24 は図 3.23 のアレイアンテナをネットワークアナライザに接続して S パラメータを測定した結果である。図 3.24 から使用周波数帯域内で透過量は-30dB、反射量は-15dB 以下と低く抑えられ、ポートから給電された電力はほぼ放射されることがわかる。

また試作したアンテナの放射指向性を図 3.25 から図 3.32 に示す。このアンテナは進行波型のアンテナであるため測定周波数を変化させると最大放射方向が若干変動する。最大放射方向は測定周波数が高くなると隣接する素子間の経路差が短くなるためその方向はアンテナ正面方向にチルトするのである。これらの図よりビームはアンテナ正面より約 40° 方向に制御されており、ほぼ設計どおりのビームチルトアンテナを製作することができた。またこれらの図から製作したアンテナの軸比の周波数特性の極小点をとる周波数は 12.4GHz 付近と目標としていた周波数帯域より数百 MHz 高域にシフトしている。これは設定周波数が 12GHz と高周波で、アレイ素子のパラメータ、オフセット量などがかなり特性に影響するためその試作誤差が重複したものと考えられる。

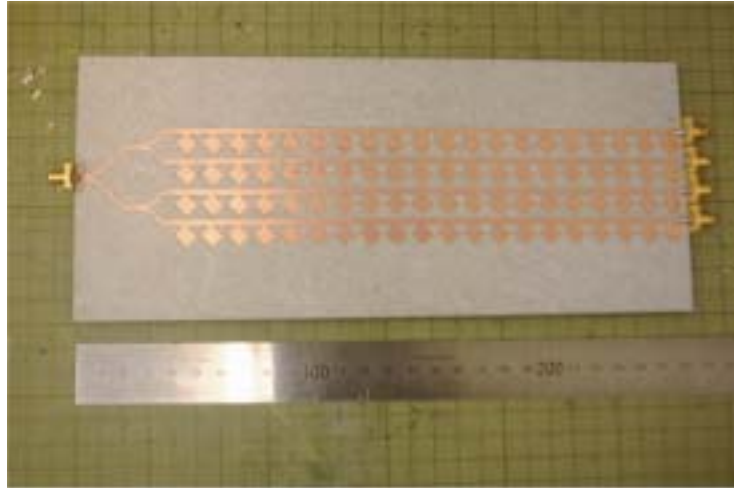


図 3.23 : 製作したアレイアンテナ

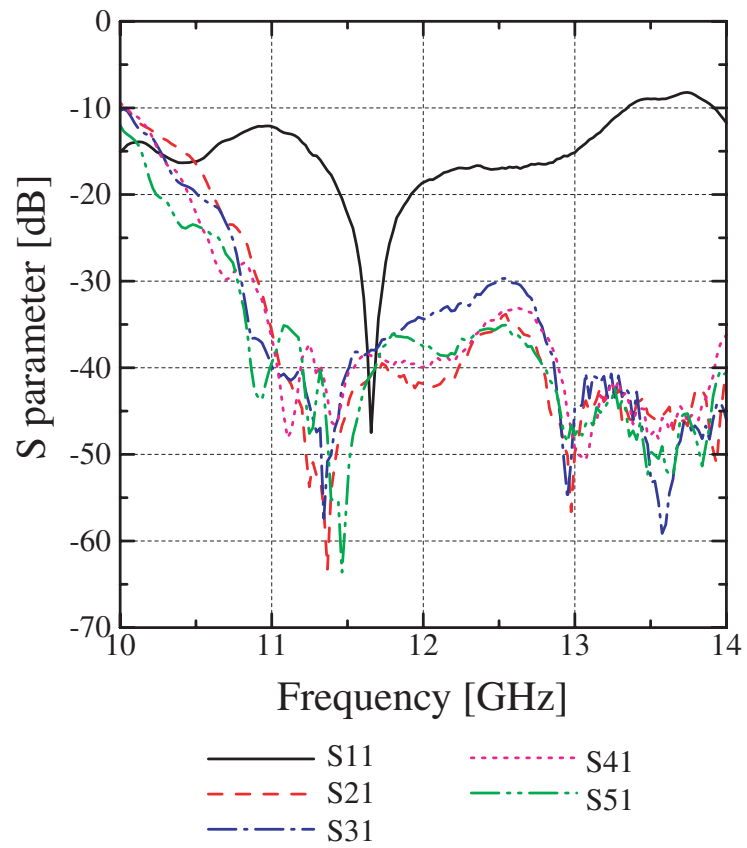


図 3.24 : Sパラメータの周波数特性

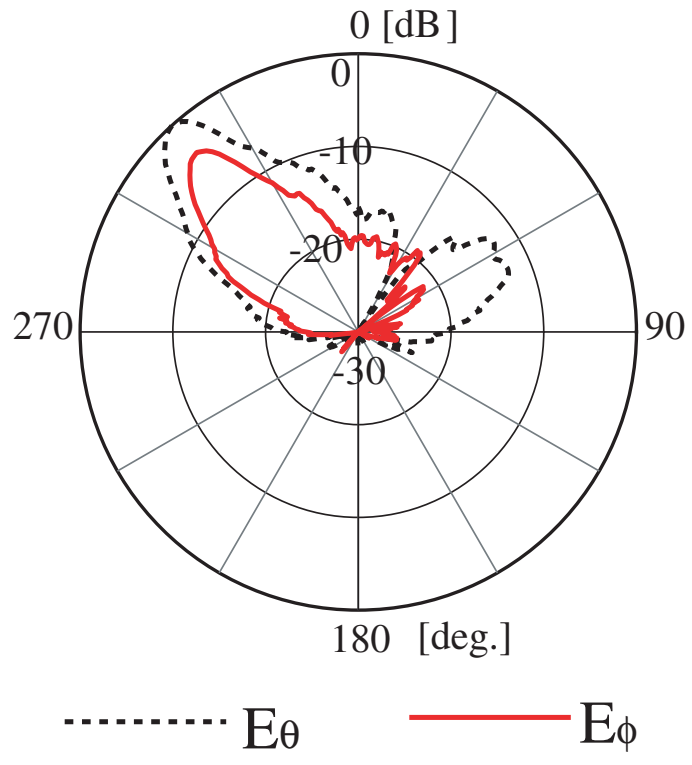


図 3.25 : 放射指向性 (測定周波数 : 11.9GHz)

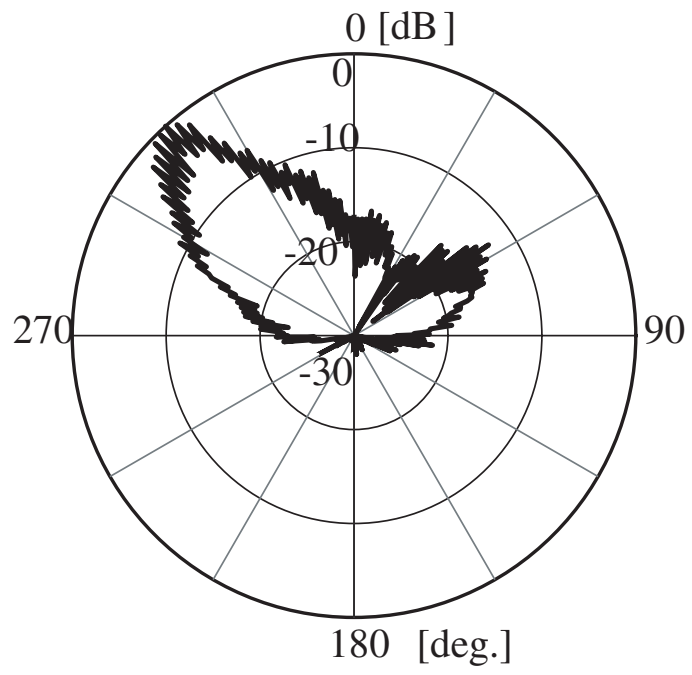


図 3.26 : 放射指向性 (スピンリニア偏波による測定 : 11.9GHz)

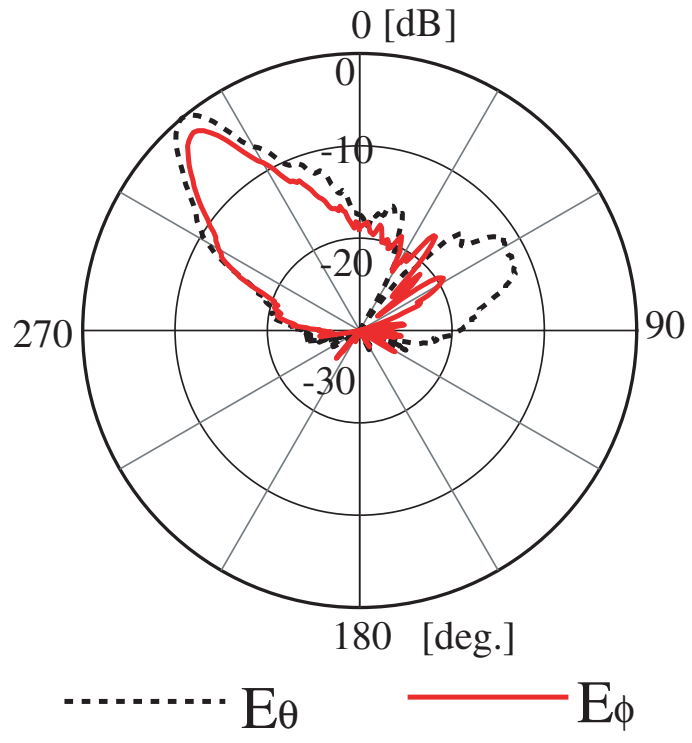


図 3.27 : 放射指向性 (測定周波数 : 12GHz)

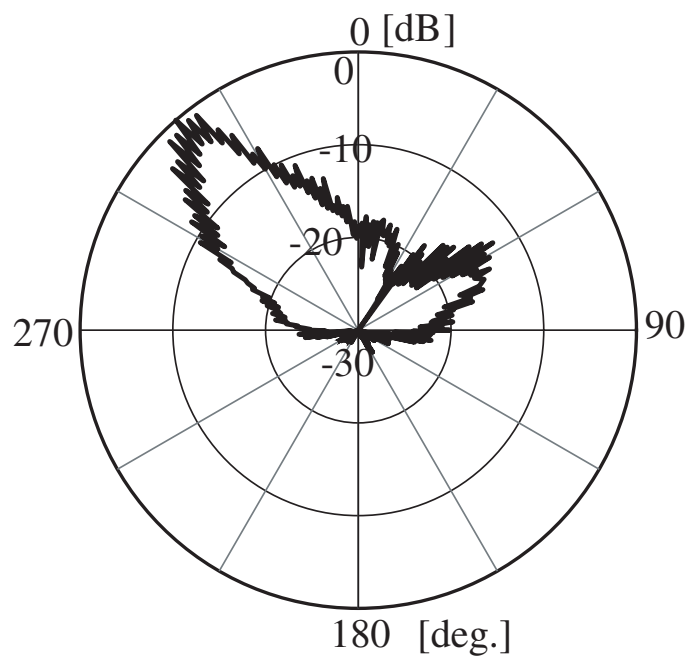


図 3.28 : 放射指向性 (スピンリニア偏波による測定 : 12GHz)

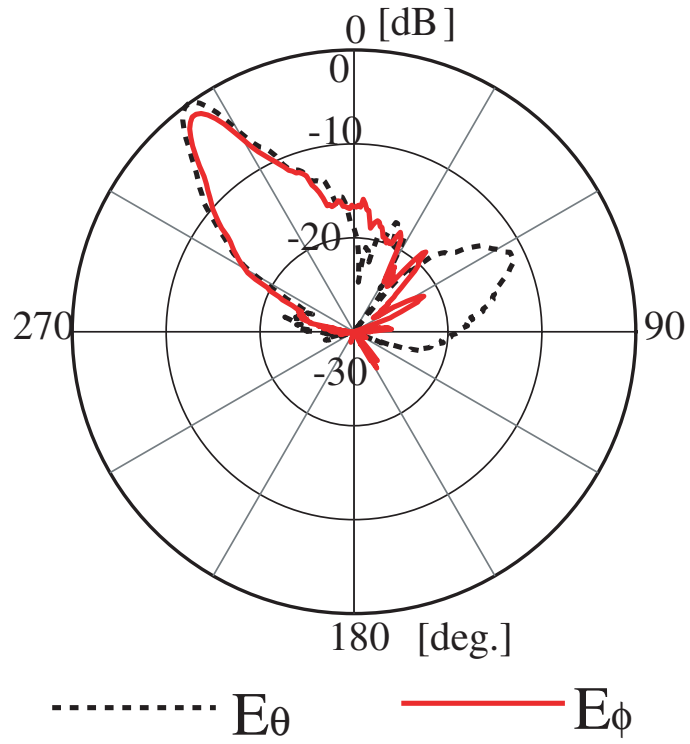


図 3.29 : 放射指向性 (測定周波数 : 12.2GHz)

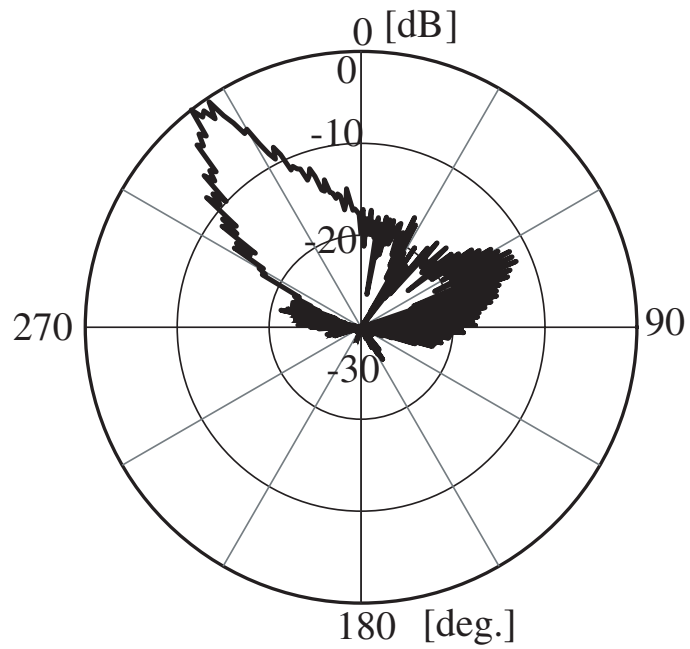


図 3.30 : 放射指向性 (スピンリニア偏波による測定 : 12.2GHz)

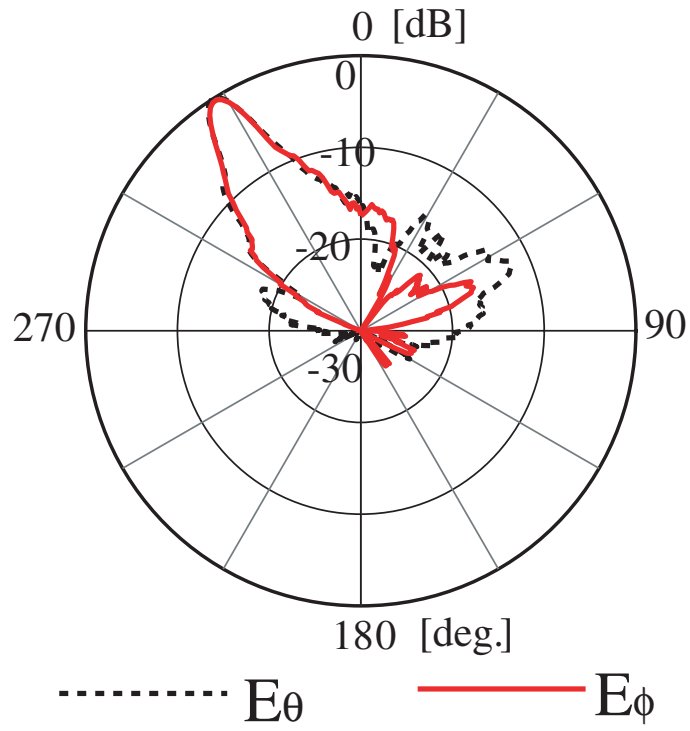


図 3.31 : 放射指向性 (測定周波数 : 12.4GHz)

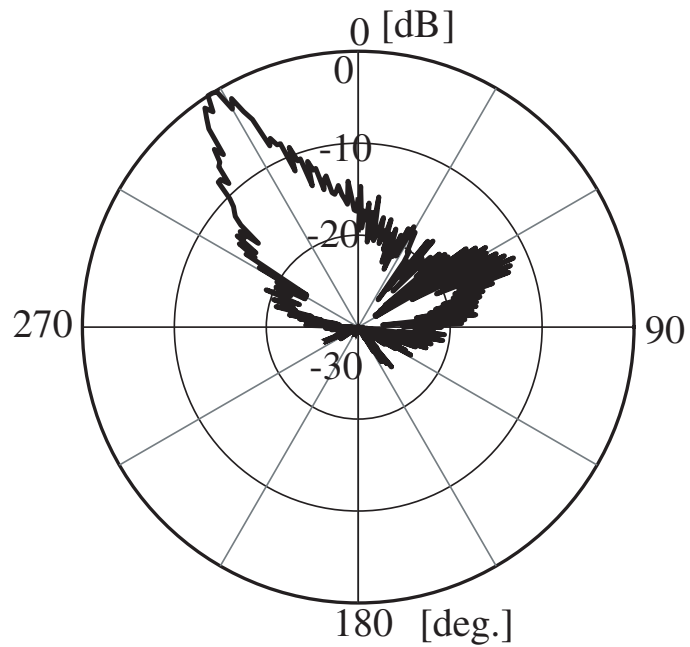


図 3.32 : 放射指向性 (スピンリニア偏波による測定 : 12.4GHz)

3.4 まとめ

本章では前章で検討してきたマイクロストリップアンテナを BS 受信用壁面設置ビームチルトアンテナにするために、電力分配器の検討を行い、サブアレイをシミュレーション解析をもとに設計、試作し、その特性を得た。4 列 × 20 素子程度のサブアレイを 4 枚並べることにより理論的に 27dBi 程度の利得が得られるので、BS 放送波を受信することが原理的に可能であると考えられる。これらより BS 受信用アンテナとしての有効性を明らかにした。

第 4 章

結論

本論文では，BS 放送受信を目的とした 1 層の誘電体基板で構成される壁面内部に設置可能な薄型ビームチルトアンテナを提案し，モーメント法による解析および実験的検討を行った．

- 給電線路，オフセット量，パッチの大きさについて，使用する周波数帯でアンテナが動作するようにそれぞれのパラメータを検討した．
- 円偏波励振させるためパッチ 1 素子において，パラメータを設定し，円偏波アンテナとしての基礎的な検討を行った．
- ビームチルト型のアンテナにするため素子間隔を調整することによって最大放射方向を制御できることを確認した．
- 電力分配部を用いて，並列アレイアンテナを設計し，利得，軸比の検討を行った．
- 解析結果をもとにアンテナを試作し，測定することにより仰角が 40° 方向にチルトするようなほぼ設計目標通りのビームチルトアンテナが得られることを確認した．

以上より本論文では提案したアンテナが壁面設置型 BS 受信ビームチルトアンテナとしての基本特性を有するアンテナであることを示した．

今後の課題として 3.2.2 節に触れたように電力分配器の損失の最適化を行う必要がある．12GHz 帯という周波数と給電法を考えると若干の損失はやむを得ないが，利得を向上させるためには分配器の損失をさらに低減させることが望まれる．また，実際に壁面設置 BS 受信アンテナとして使用する場合には，各サブアレイ間で生じる位相差を調整する必要があるので，位相器を含めた相互的検討も今後の課題としてあげられる．

謝辞

本研究を進めるにあたり、厳しくかつ丁寧に御指導下さった新井宏之教授に深く感謝致します。

また、研究に関して数々御指導下さった韓国海洋大学校の閔庚植教授に、研究生活全般に渡って御指導下さった D3 の陸田裕子氏、D2 の道下尚文氏に深く感謝致します。

最後に研究生活を共に過ごした新井研究室の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 松崎 敬臣, "衛星放送受信用壁面内蔵型ビームチルトアンテナに関する研究", 横浜国立大学 工学研究科 電子情報工学専攻 修士論文, 2000.
- [2] M.Ando, K.Sakurai, N.Goto, K.Arimura, Y.Ito, "A Radial Line Slot Antenna for 12 GHz Satellite TV Reception, "IEEE TRANS. ON ANTENNA AND PROPAGATION, Vol. AP-33, No. 12, Dec.1985.
- [3] 新井宏之, 新アンテナ工学, 総合電子出版社, 1996.
- [4] 後藤尚久, 図説・アンテナ, 電子情報通信学会編, 1995.
- [5] 渡辺俊明, 飯塚英男, 佐藤和夫, 西川訓利, "自動車レーダ用ミリ波帯マイクロストリップアレーアンテナ", 信学総大, B-1-135, Mar. 2000.
- [6] 羽石操, 伊藤公一, 鈴木康夫, 金子洋一, 最新平面アンテナ技術, 総合技術センター, 1993.
- [7] "IE3D User's Manual", Zeland Softwea,Inc., 2001 .
- [8] 八幡 正典, "移動体衛星通信用携帯機アンテナシステムの研究", 横浜国立大学 工学研究科 電子情報工学専攻 修士論文, 1999.

発表文献

- [1] 小谷 洋, 新井 宏之, 関 庚植 "円偏波励振用方形マイクロストリップアレイアンテナ," 電子情報通信学会総合大会, B-1-87, March 2002.
- [2] 小谷 洋, 新井 宏之, 関 庚植 "円偏波励振用方形マイクロストリップアレイアンテナ," 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-1-93, March 2002.
- [3] Hiroshi KOTANI, Hiroyuki ARAI, Kyeong-Sik MIN "Circular Polarized Rectangular Microstrip Array Antenna for DBS Reception," Asia-Pacific Microwave Conference APMC'02, FR3D-3, November 2002.