

TR-AC-0033

020

14GHz帯円形マイクロストリップアンテナの
相互結合に関する解析

藤野 義之

1999. 7. 6

ATR環境適応通信研究所

目次

あらし	1
1. はじめに	1
2. 解析モデル	1
3. 解析法	4
4. 結果	5
4.1 入力インピーダンス及び遠方界指向性	5
4.2 軸比	9
5. 実験値との比較	9
6. まとめ	14
7. 参考文献	14

14GHz 帯円形マイクロストリップアンテナの相互結合に関する解析

A T R 環境適応通信研究所

藤野義之

あらまし

14GHz 帯マイクロストリップアンテナの相互結合量に関して、モーメント法を使用した計算を行ったので報告する。本報告は光信号処理アンテナの高性能設計に資するためのものである。

1. はじめに

アンテナアレーの特性を悪化させる要因の一つとして、素子間の相互結合が挙げられる。本報告では 14GHz 帯の円形マイクロストリップアンテナ（以下 CMSA という）をアレー化した場合のアンテナ素子の放射指向性および軸比の変化について、アンテナをアレー化しない単体の場合と比較し解析を行った。このことで、光信号処理アンテナの高性能な設計のための資料を得た。

2. 解析モデル

モデルアンテナとして、3 種類のアンテナを使用した。モデル 1 は、CMSA 単体であり、図 1 に示す。円偏波を発生するために切り欠きがある。モデル 2 は、CMSA 7 素子のアレーであり素子の配列方向を変更している。これを図 2 に示す。モデル 3 は CMSA 7 素子の同一方向配列アレーである。モデル 2 およびモデル 3 は以前に A T R がアンテナ技研（株）に発注したアンテナと同寸法であるが、当該アンテナは 19 素子であったのに対し、今回は解析の都合上 7 素子としている。CMSA 単体の寸法はすべてのモデルに対して図 1 に示した通りである。パッチ半径及び中心-給電ピン間の距離、給電ピン直径、縮退分離素子の寸法は仕様書に明記されていないため、アンテナを機械的に測定して得た値である。また、基板の厚さ、誘電率等はその基板材料のカタログデータを使用している。

なお、モデル 2 のアンテナは軸比の改善を目的としてシーケンシャル配列を意図して配列方向が変更されているが、厳密な意味でのシーケンシャルアレーではない。なぜなら、シーケンシャルアレーでは、 N 番目の素子を $\phi_n = (n-1)\pi/N$ だけ回転して配置し、さらに位相を同じく ϕ_n だけ変移させて励振するという規則性がある[2]が、モデル 2 はこの原則から外れているためである。いずれも、アンテナ面で切り欠きに対して平行な方向を x 方向、アンテナ面で切り欠きに対して垂直な方向を y 方向とする。モデル 2 の場合は中心素子の切り欠き位置を基準とする。アンテナに対する座標系を図 4 に示す。

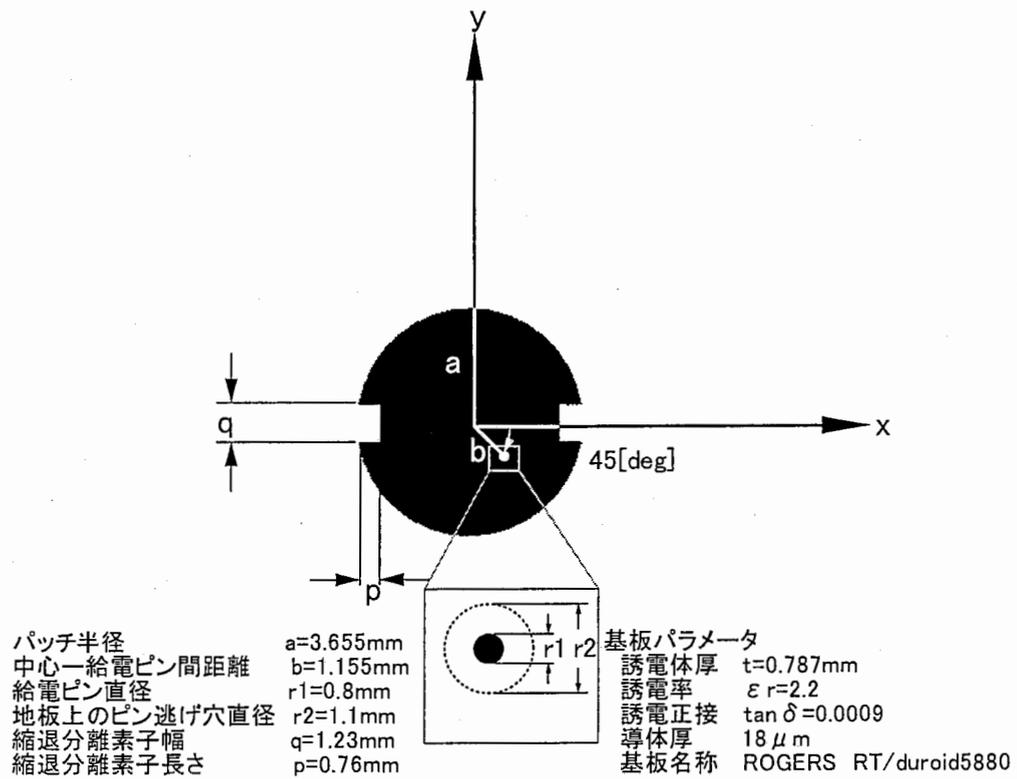


図1 1素子 CMTA (モデル1) と寸法

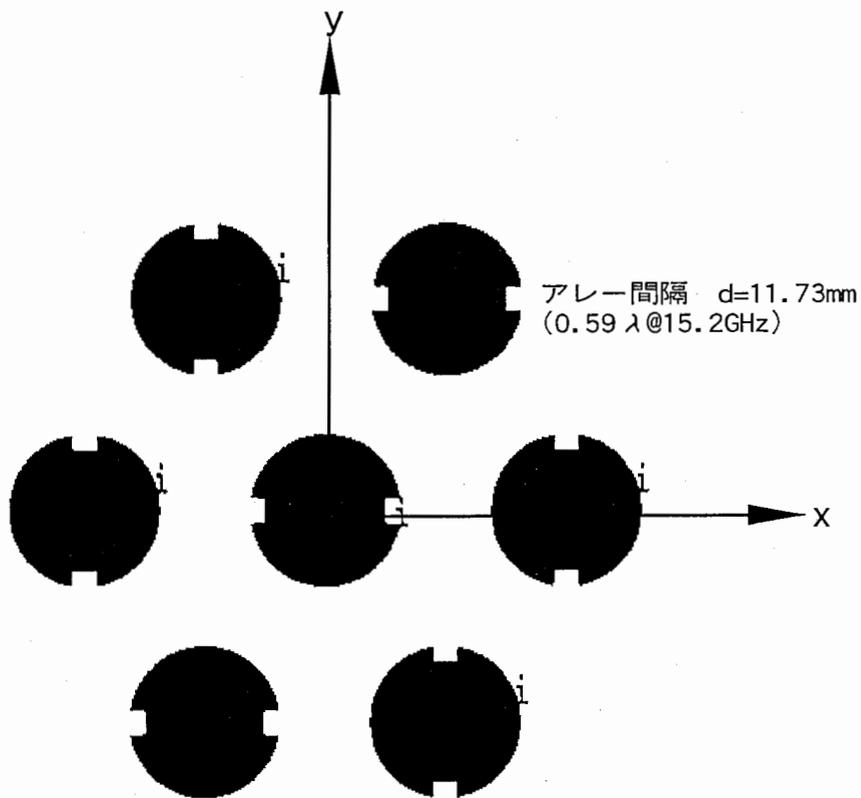


図2 7素子アレー配列変更モデル (モデル2)

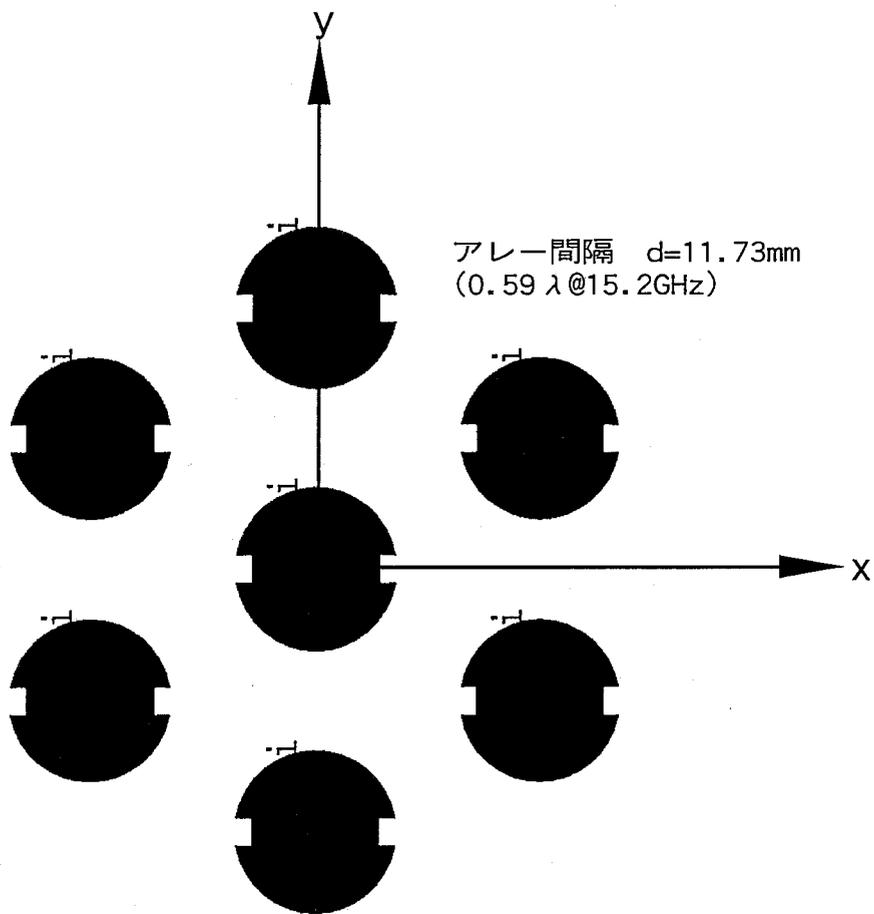


図3 7素子アレー同一方向配置モデル
(モデル3)

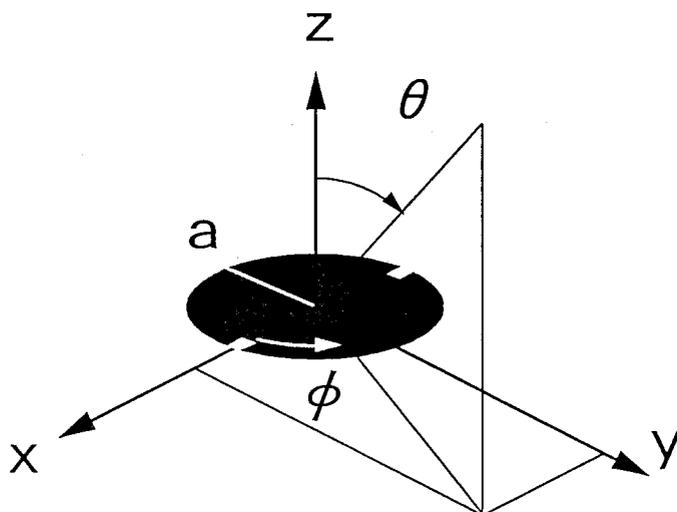


図4 解析モデルの座標系

3. 解析法

解析法として、部分領域展開関数を使ったモーメント法を用いた[2]。これは、HP社のMomentumとして市販されているソフトウェアである。モデル化にあたって、無限地板を仮定した。また、給電ピンは円形が理想であるが、モデル化の都合上、六角形とした。メッシュ分割は計算精度と計算時間の両者を考慮して、 $1/15\lambda$ を選択し、導体の端部を細かくメッシュに区切るよう、Edge Meshを設定した。アンテナ導体は三角形要素と四角形要素の2種類の素子で分割され、その一例を図5に示す。行列要素の数はモデル1で393、モデル2で1710、モデル3で1715であった。また、アンテナの給電は、背面同軸給電を使用した。用いた計算機はHP735-125であり、モデル2及びモデル3の計算時間は周波数1点あたり約1時間を要している。

入力インピーダンス及び遠方界はシミュレータより計算される。このときの遠方界パターンは電界の θ 方向成分(E_θ)および ϕ 方向成分(E_ϕ)であり、通常のスピンリニアによる測定法で測定される電界の最大値(E_{\max})および最小値(E_{\min})ではない。そこで、直交する2つの直線偏波の振幅比とその間の位相差(δ)から軸比を求める方法[3]を使用した。位相差は、シミュレータの遠方界位相の差から求めた。

軸比は楕円偏波における長軸長さと短軸長さの比である。ここで、長軸長さは電界の最大値(E_{\max})に相当し、短軸長さは電界の最小値(E_{\min})に相当する。ここで、偏波楕円は以下の方程式を満たす。

$$\frac{E_{\max}^2}{E_1^2} - \frac{2E_{\max}E_{\min}\cos\delta}{E_1E_2} + \frac{E_{\min}^2}{E_2^2} = \sin^2\delta \quad (1)$$

ここで、 E_1 および E_2 は観測する2つの直交偏波のいずれか(ここでは E_θ および E_ϕ)である。

長軸長 E_{\max} および短軸長 E_{\min} は次式で表される。

$$E_{\max} = \frac{\pm E_1E_2\sin\delta}{\sqrt{E_2^2\cos^2\tau - 2E_1E_2\cos\tau\sin\tau\cos\delta + E_1^2\sin^2\tau}} \quad (2)$$

$$E_{\min} = \frac{\pm E_1E_2\sin\delta}{\sqrt{E_2^2\cos^2\tau + 2E_1E_2\cos\tau\sin\tau\cos\delta + E_1^2\sin^2\tau}} \quad (3)$$

ここで、 τ は、次式で示される。

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2E_1E_2\cos\delta}{E_1^2 - E_2^2} \quad (4)$$

軸比(AX)は、長軸長 E_{\max} および短軸長 E_{\min} の比であり、次式となる。

$$AX = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \quad (5)$$

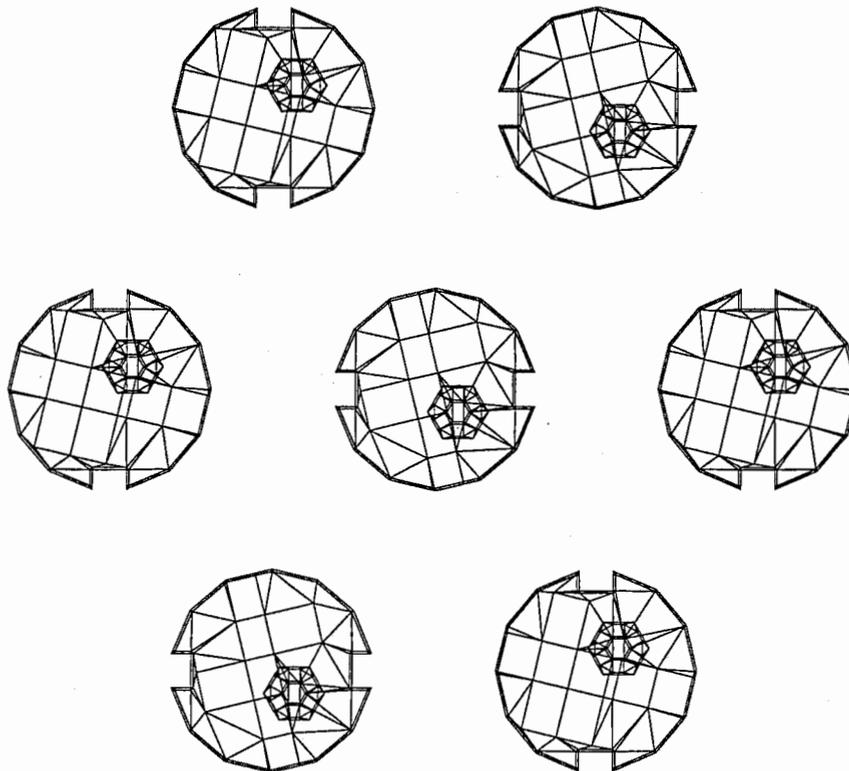


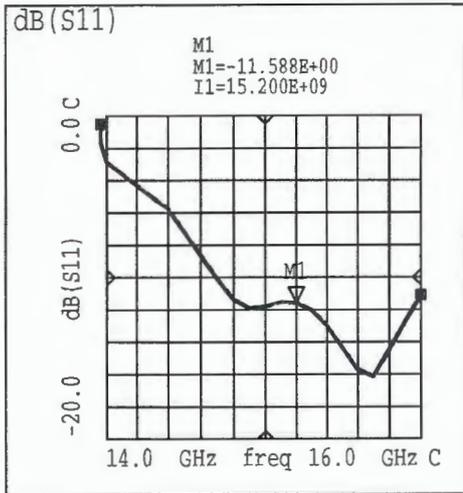
図5 アンテナ素子と給電ピンのメッシュ分割 (モデル2)

4. 結果

4. 1 入力インピーダンス及び遠方界指向性

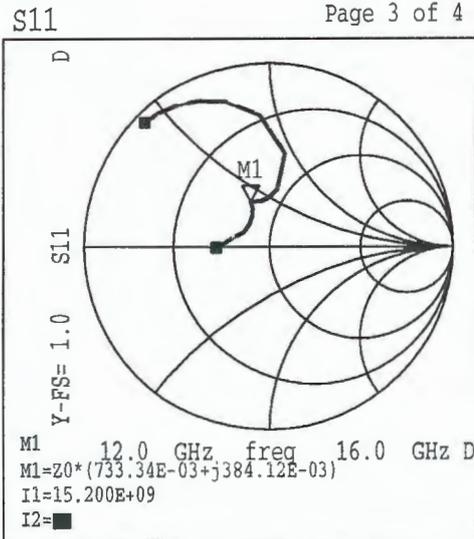
モデル1, モデル2, モデル3のそれぞれについて, 入力インピーダンスおよび遠方界指向性を計算した. モデル1のリターンロスの周波数特性を図6に, スミスチャートを図7に示す. 周波数 15.2GHz の時の遠方界の指向性を $\phi=0^\circ$ 面については図8に, $\phi=90^\circ$ 面については図9に示す. 同様に, モデル2のリターンロスの周波数特性を図10に, スミスチャートを図11に示す. 周波数 15.2GHz の時の遠方界の指向性を $\phi=0^\circ$ 面については図12に, $\phi=90^\circ$ 面については図13に示す. また, モデル3のリターンロスの周波数特性を図14に, スミスチャートを図15に示す. 周波数 15.2GHz の時の遠方界の指向性を $\phi=0^\circ$ 面については図16に, $\phi=90^\circ$ 面については図17に示す. 指向性は最大値で規格化してあり, 指向性利得は Momentum では計算できない.

リターンロスモデル1, 2, 3のいずれも周波数 15.9GHz 前後で-16dB 程度となり, 最良となることがわかる. しかしながら, スミスチャート上でキックができる周波数が 15.2GHz であり, この周波数において, 図4のパッチアンテナにおける x 方向の共振モードと y 方向の共振モードが等振幅となり, いわゆる「縮退が解けた」状態となる[4]と考えられる. このため, この周波数を共振周波数とする. 周波数 15.2GHz のとき, 入力インピーダンスは誘導性であり, 実数部は 36 から 41[Ω], 虚数部は+19 から+25[Ω]程度となる. これらの特性は, 3つのモデル共にほぼ一定である.



Dataset=P14G_1E

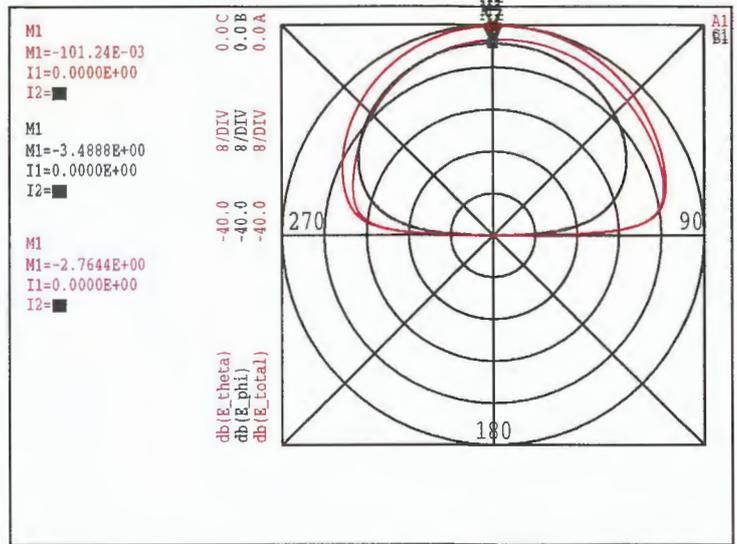
Figure 6 Frequency characteristics of S11 (model 1)



Dataset=P14G_1E

Figure 7 Smith chart of S11 (model 1)

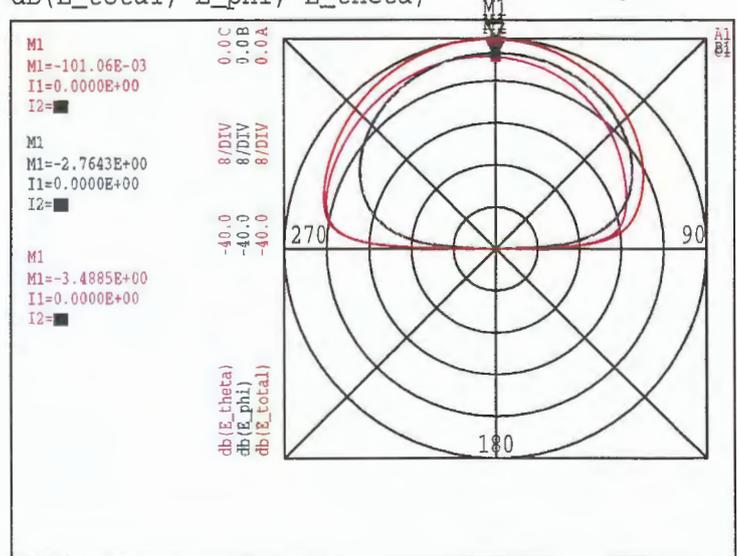
dB(E_total, E_phi, E_theta)



Dataset=/InagakiArray/ELEMENT/P14G_1E_0_152

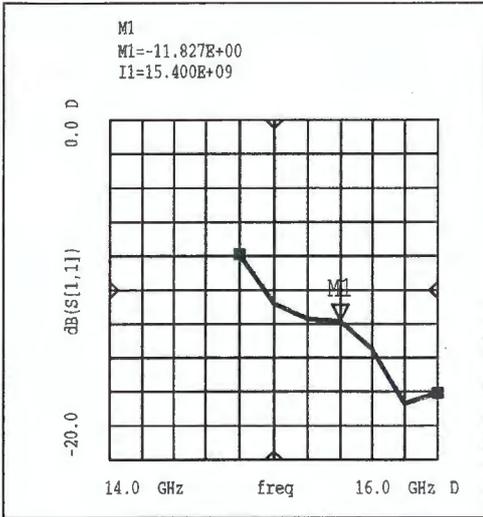
Figure 8 Directivity of model 1 (phi=0 deg, f=15.2GHz)

dB(E_total, E_phi, E_theta)



Dataset=/InagakiArray/ELEMENT/P14G_1E_90_152

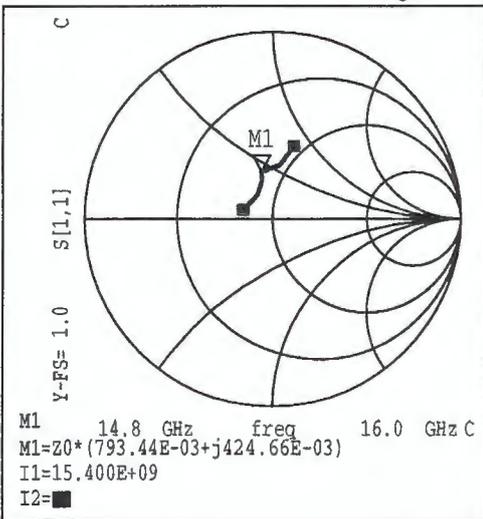
Figure 9 Directivity of model 1 (phi=90 deg, f=15.2GHz)



Edit port numbers directly on trace label.

Dataset=P14G_7E2

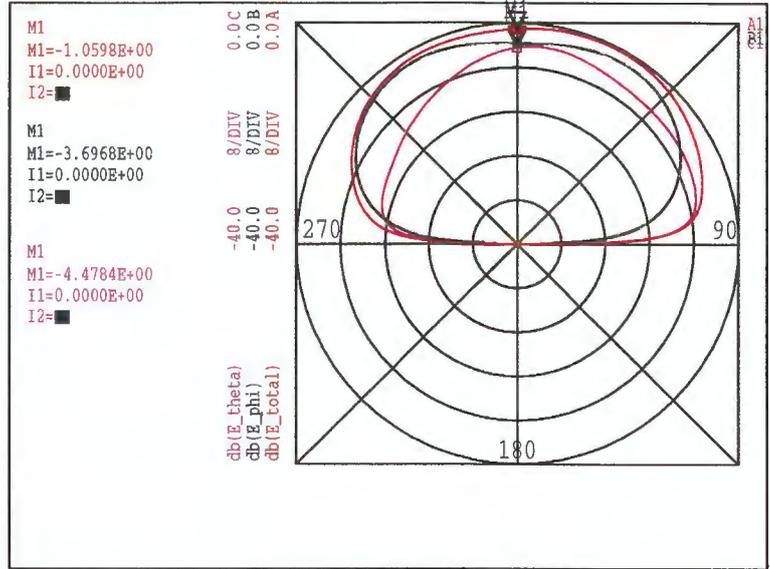
Figure 10 Frequency characteristics of S11 (model 2)



Edit port numbers directly on trace label.

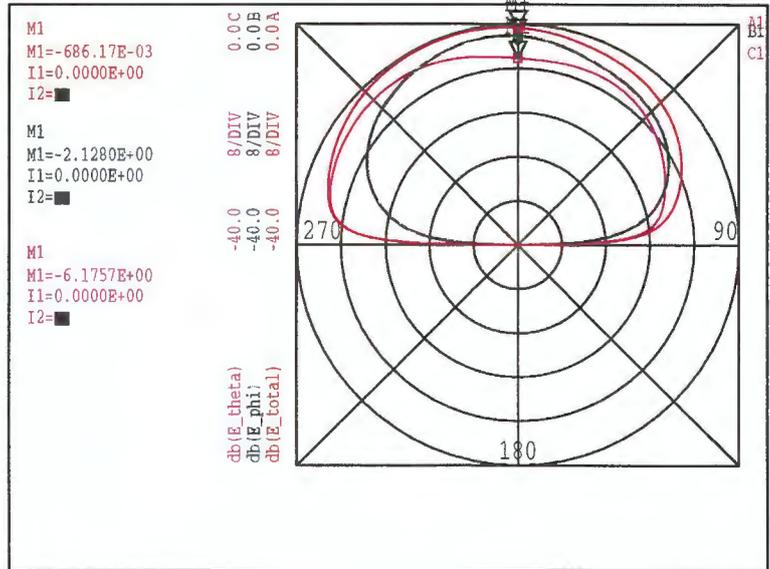
Dataset=P14G_7E2

Figure 11 Smith chart of S11 (model 2)



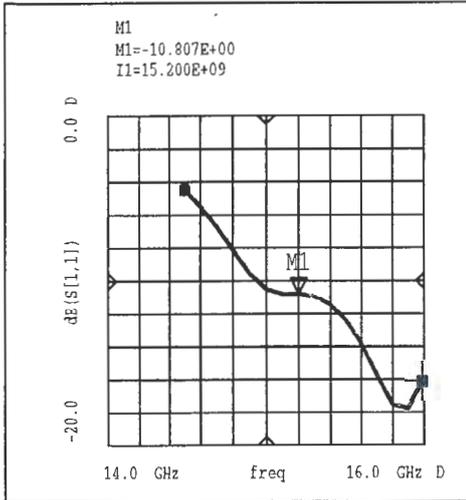
Dataset=/InagakiArray/ARRAY/P14G_7E2_0_152

Figure 12 Directivity of model 2 (phi=0 deg, f=15.2GHz)



Dataset=/InagakiArray/ARRAY/P14G_7E_90_152

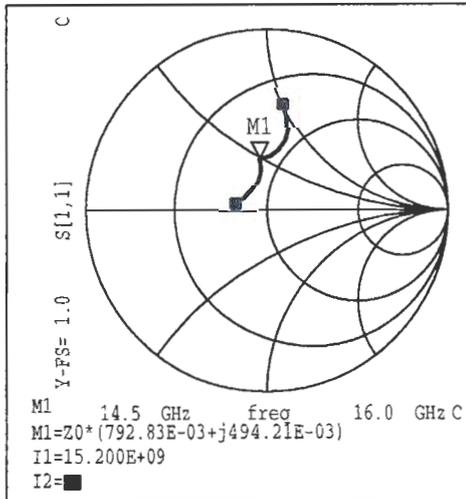
Figure 13 Directivity of model 2 (phi=90 deg, f=15.2GHz)



Edit port numbers directly on trace label.

Dataset=P14G_N7E2

Figure 14 Frequency characteristics of S11 (model 3)

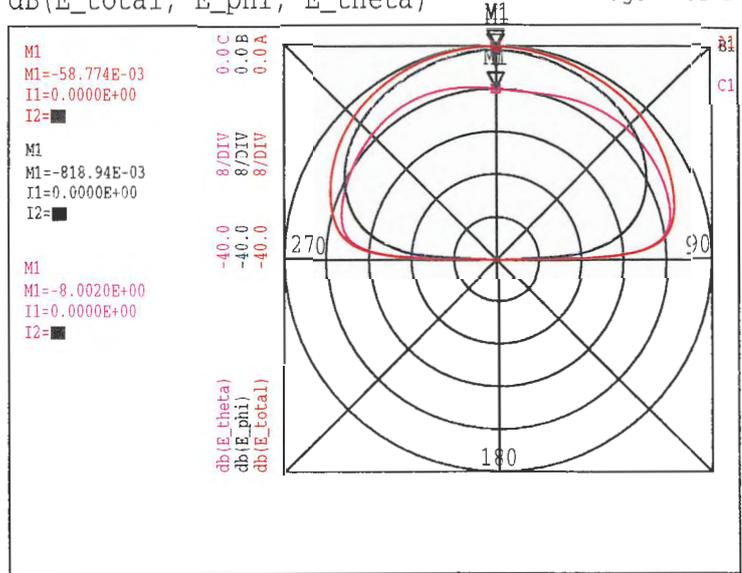


Edit port numbers directly on trace label.

Dataset=P14G_N7E2

Figure 15 Smith chart of S11 (model 3)

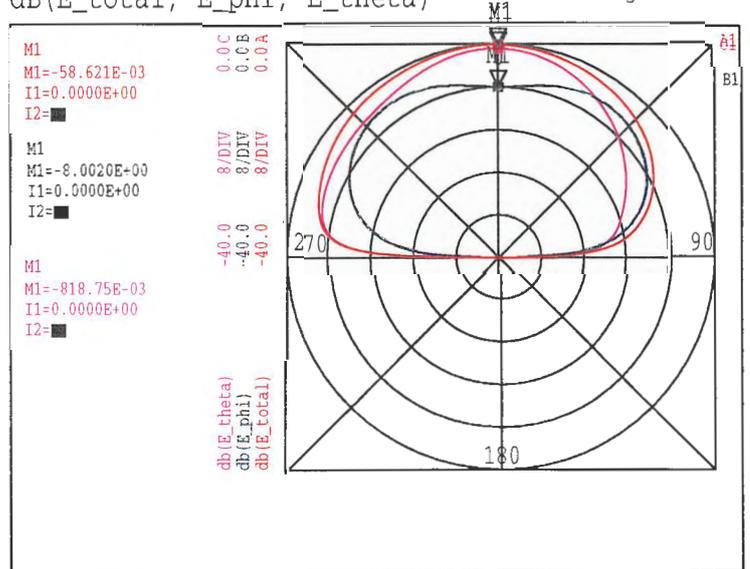
dB(E_total, E_phi, E_theta)



Dataset=/InagakiArray/ARRAY_NoSeq/P14G_N7E2_0_152

Figure 16 Directivity of model 3 (phi=0 deg, f=15.2GHz)

dB(E_total, E_phi, E_theta)



Dataset=/InagakiArray/ARRAY_NoSeq/P14G_N7E2_90_152

Figure 17 Directivity of model 3 (phi=90 deg, f=15.2GHz)

遠方界指向性についてはすべてのモデルで $\theta = \pm 90^\circ$ において零となっている。これは、Momentumにおける理論計算においては無限大の地板を仮定しているためである。また、モデル2、モデル3では一部の指向性が正面においてヌルを持つことがわかる。アンテナ素子単体であるモデル1では正面ヌルの傾向はないことから、これらは、アレー化したことによる相互結合の影響であると考えられる。また、放射指向性が $\theta = 0^\circ$ で軸対称とならない理由は、給電ピンの影響によるものである。

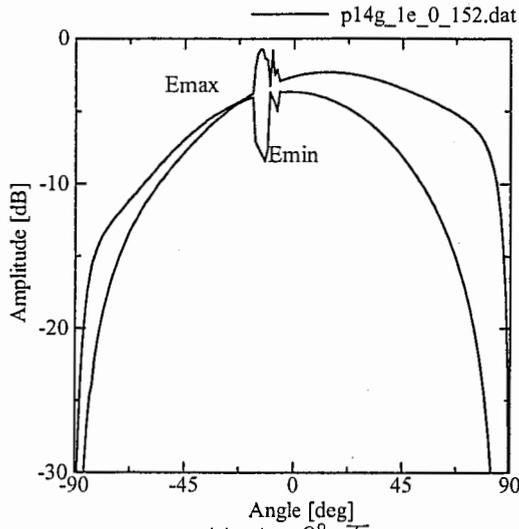
4. 2 軸比

シミュレータによって出力された E_θ および E_ϕ の遠方界指向性から(2)式及び(3)式を使用して、電界の最大値(E_{max})および最小値(E_{min})を計算した。結果を図18から図26に示す。図18から図20に周波数15.2GHzの場合のモデル1、モデル2、モデル3のそれぞれの指向性を示す。図21から図23に周波数15.4GHzの時の各モデルの指向性を示す。また、図24から図26に周波数15.6GHzの時の各モデルの指向性を示す。また、軸比は E_{max} と E_{min} の差分によって示される。各図面において振幅が急峻に変化する角度がみられるが、これは、Momentumの遠方界の位相パターンを計算する際に、 $-\pi$ から π への位相変化が起きる付近での計算に問題があるためである。このような角度以外での計算値に問題がないことについては確認しており、また、Momentumの後継ソフトウェアであるADSでは改善されている。

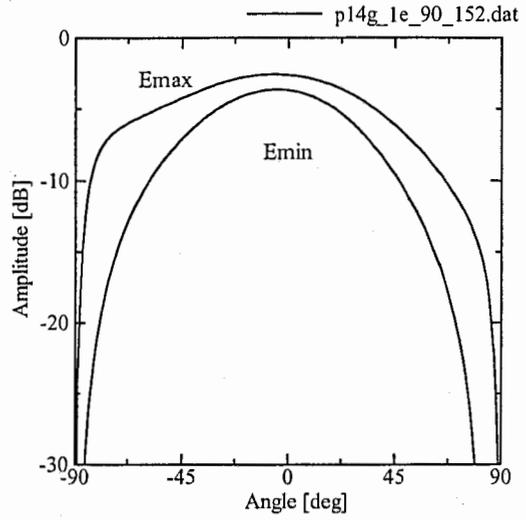
正面方向の軸比を3種類の周波数についてまとめたものを表1に示す。モデル1およびモデル2では周波数15.2GHzの時の軸比が最小であり、それぞれ1.06dB、0.80dBとなった。この周波数ではモデル2の正面軸比が良好であるが、これは図19に示すようにモデル2のこの周波数において、正面方向にヌルが形成されているためである。また、モデル3では周波数15.6GHzの時の軸比が最小であり、2.50dBとなった。ここでも、 $\phi = 90$ 度面において、最大放射方向が正面方向から外れる現象があり、これが結果的に軸比の減少につながったものと考えられる。モデル2、モデル3では特に広角方向において軸比が改善される箇所もあることが分かった。

5. 実験値との比較

入力インピーダンスの周波数特性の理論値と実験値をスミスチャートを用いて比較した。モデル2およびモデル3の結果を図27、図28のそれぞれに示す。理論値はパッチアンテナの地板に同軸給電したときの入力インピーダンスを計算しており、実験値はCMSAに直接同軸コネクタを半田付けしたときのコネクタの嵌合面での入力インピーダンスである。両者の参照面を一致させるため、理論値にコネクタの電気長に等しい伝送ラインの位相変化を補正した。理論値と実験値はある特定の周波数においてスミスチャート上にキックを持つ点で一致しているが、共振周波数は実験値が14.2GHzにたいし、理論値では15.4GHzと、8%程度の違いが認められた。また、スミスチャートの軌跡も一致していない。これは、共振周波数が異なることによるものと考えられる。

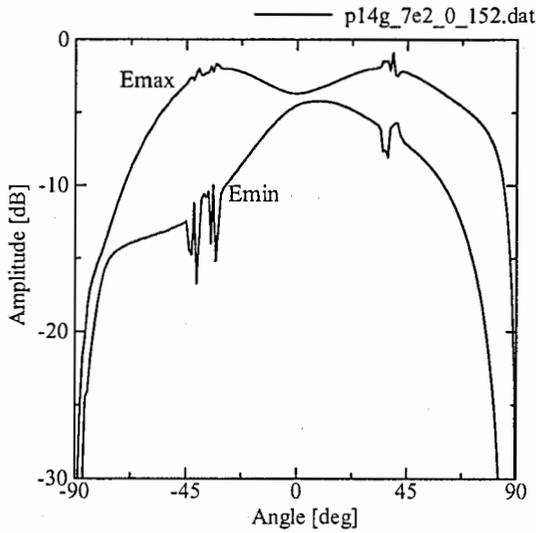


(a) $\phi = 0^\circ$ 面

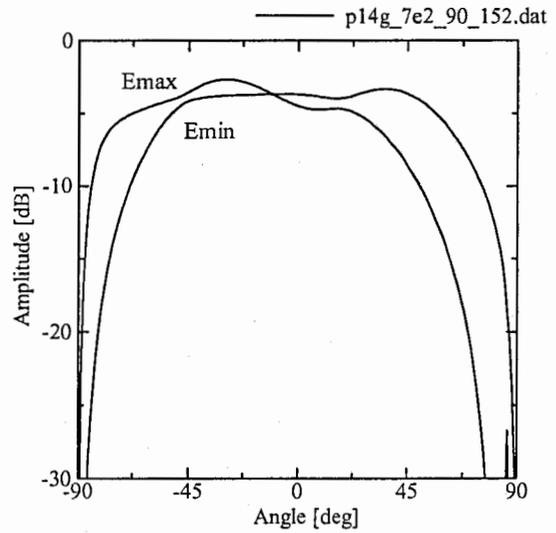


(b) $\phi = 90^\circ$ 面

図18 モデル1(1素子)の放射指向性($\epsilon=15.2\text{GHz}$)

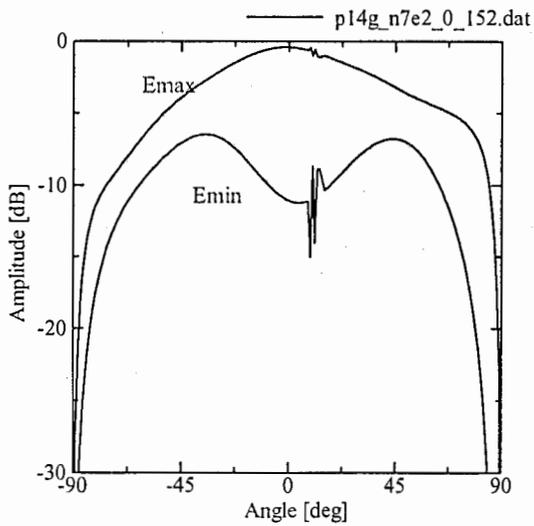


(a) $\phi = 0^\circ$ 面

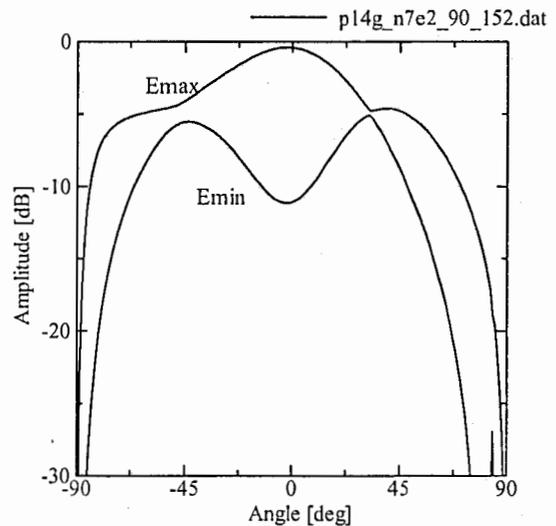


(b) $\phi = 90^\circ$ 面

図19 モデル2(7素子, 配列方向変更モデル)の放射指向性($\epsilon=15.2\text{GHz}$)

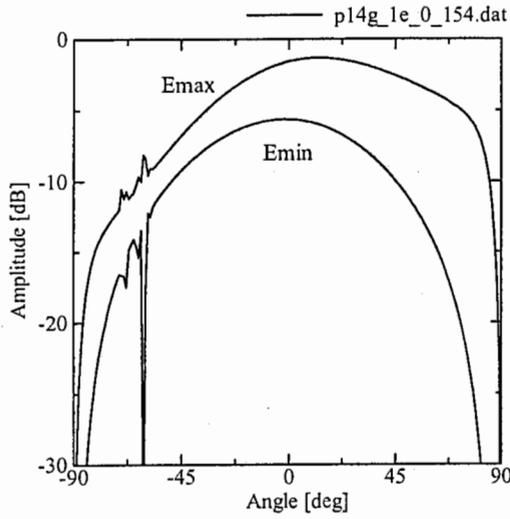


(a) $\phi = 0^\circ$ 面

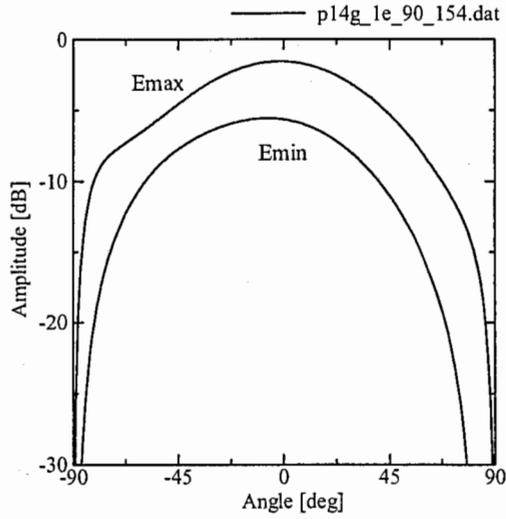


(b) $\phi = 90^\circ$ 面

図20 モデル3(7素子, 同方向配列)の放射指向性($\epsilon=15.2\text{GHz}$)

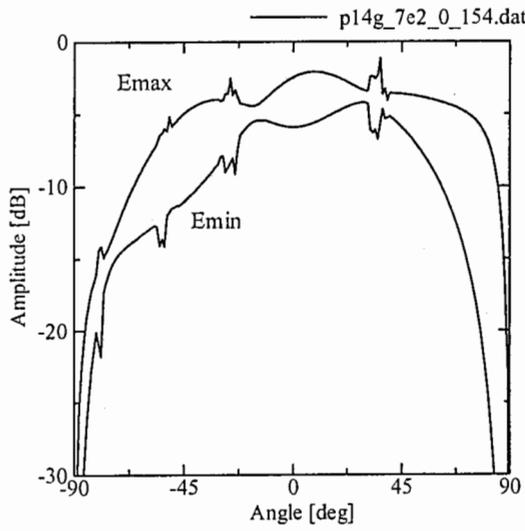


(a) $\phi = 0^\circ$ 面

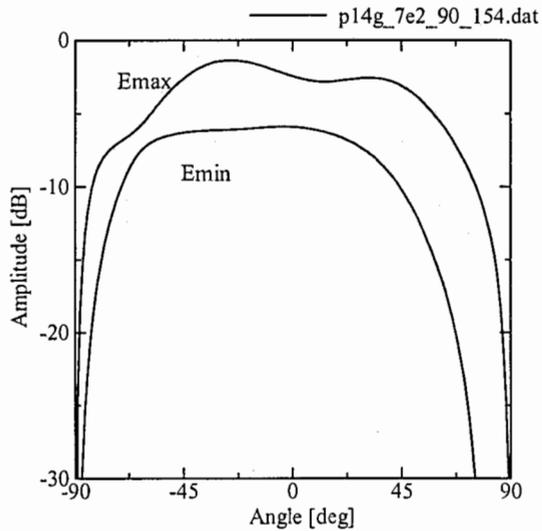


(b) $\phi = 90^\circ$ 面

図21 モデル1 (1素子)の放射指向性 ($f=15.4\text{GHz}$)

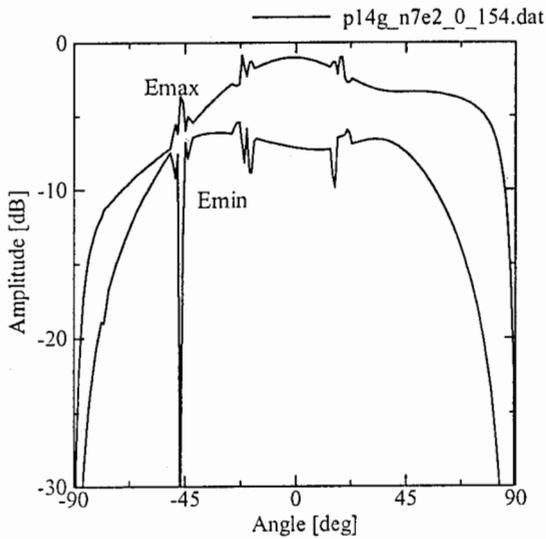


(a) $\phi = 0^\circ$ 面

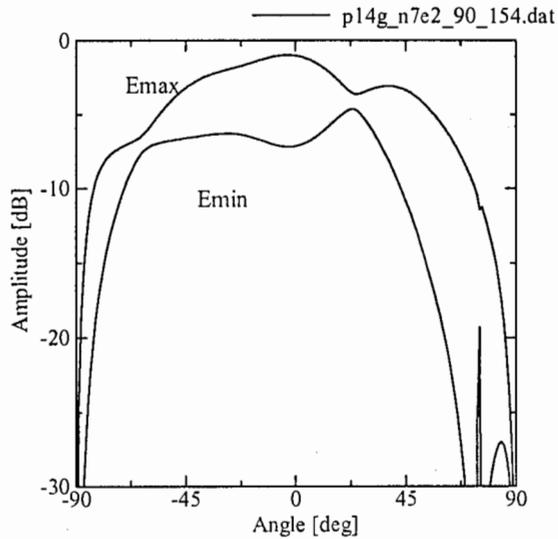


(b) $\phi = 90^\circ$ 面

図22 モデル2 (7素子, 配列変更モデル)の放射指向性 ($f=15.4\text{GHz}$)

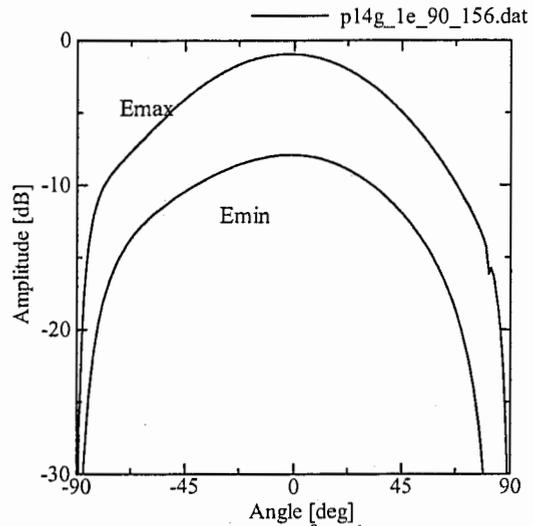
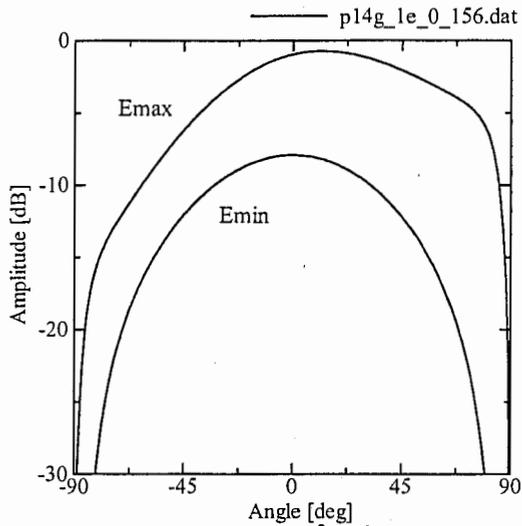


(a) $\phi = 0^\circ$ 面



(b) $\phi = 90^\circ$ 面

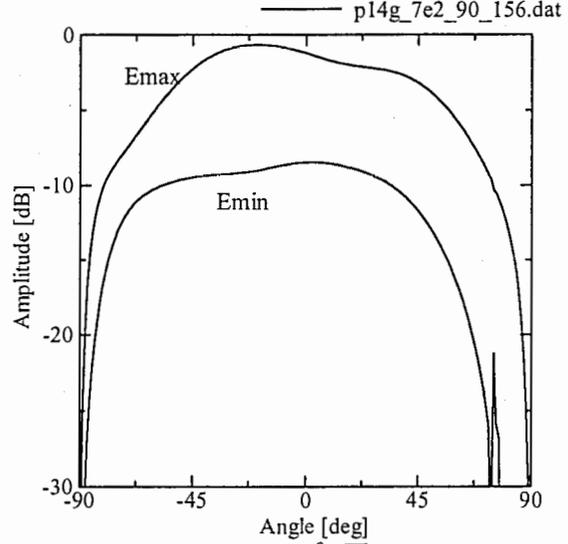
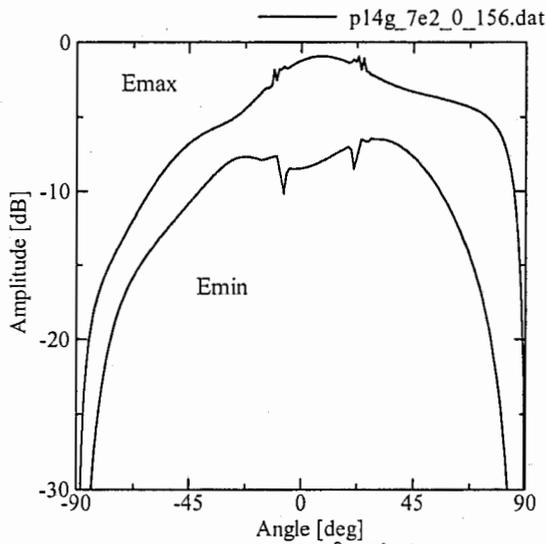
図23 モデル3 (7素子, 同方向配列)の放射指向性 ($f=15.4\text{GHz}$)



(a) $\phi = 0^\circ$ 面

(b) $\phi = 90^\circ$ 面

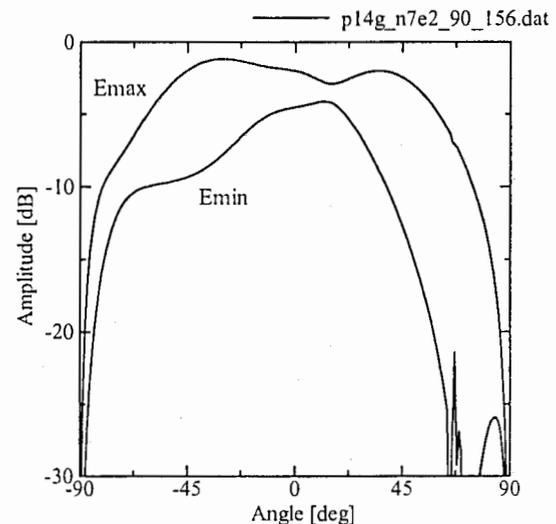
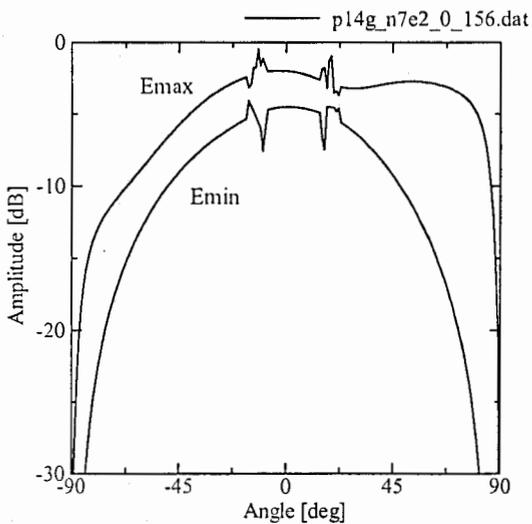
図24 モデル1(1素子)の放射指向性 ($\epsilon=15.6\text{GHz}$)



(a) $\phi = 0^\circ$ 面

(b) $\phi = 90^\circ$ 面

図25 モデル2(7素子, 配列方向変更モデル)の放射指向性 ($\epsilon=15.6\text{GHz}$)



(a) $\phi = 0^\circ$ 面

(b) $\phi = 90^\circ$ 面

図26 モデル3(7素子, 同方向配列)の放射指向性 ($\epsilon=15.6\text{GHz}$)

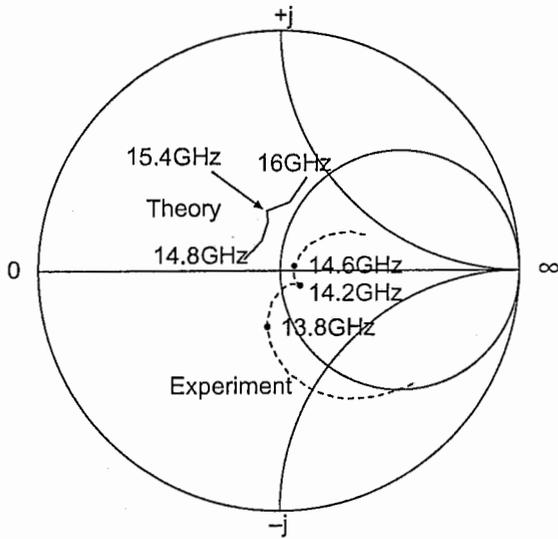


図27 入力インピーダンスの周波数特性の理論値と実験値(モデル2)

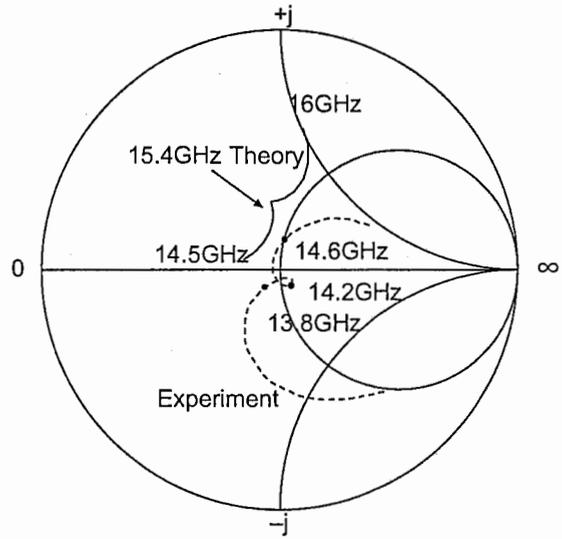


図28 入力インピーダンスの周波数特性の理論値と実験値(モデル3)

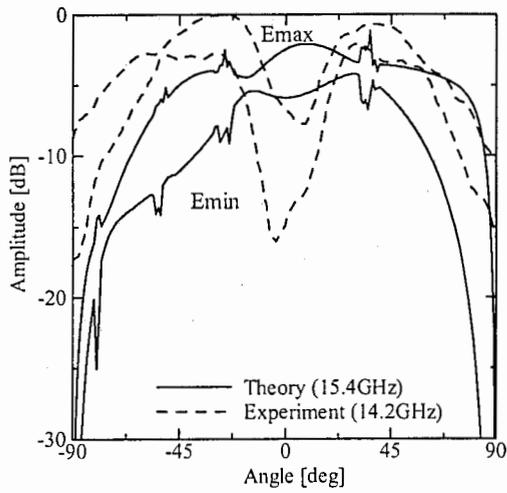


図29 放射指向性の理論値と実験値(モデル2, $\phi = 0^\circ$ 面)

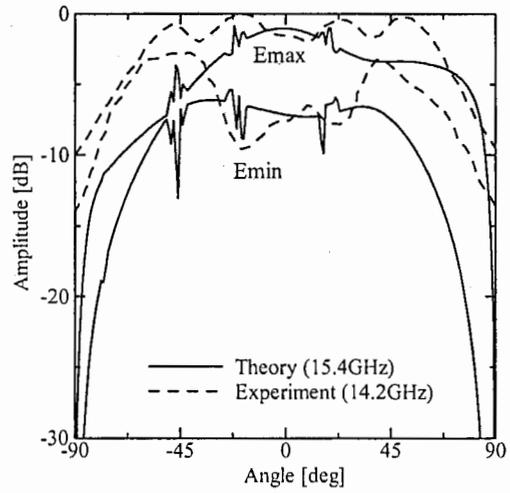


図30 放射指向性の理論値と実験値(モデル3, $\phi = 0^\circ$ 面)

表1 各モデルの正面方向の軸比の周波数依存性

周波数	モデル1 軸比	モデル2 軸比	モデル3 軸比
15.2GHz	1.06[dB]	0.80[dB]	10.66[dB]
15.4GHz	4.09[dB]	3.46[dB]	6.12[dB]
15.6GHz	6.98[dB]	7.23[dB]	2.50[dB]

次に、放射指向性について理論値と実験値を比較した。モデル2、モデル3のそれぞれの放射指向性を図 29 および図 30 に示す。理論値と実験値の一致はみられなかったが、いずれもが従来の1素子のCMSAのパターンとは違っており、正面にヌルが形成されたり、広角方向でのパターンが歪んだりする現象が確認されている。理論値、実験値ともに周波数に応じてかなりパターンが変化することが分かっているため、理論値をさらに細かく計算した上で比較することが必要であると思われる。

6. まとめ

14GHz 帯円形マイクロストリップアンテナについて、アレー化した場合のアンテナ素子の放射指向性の計算を行い、アンテナをアレー化しない場合と比較して相互結合により軸比が悪化しており、その悪化は特に正面方向に関して顕著に現れることが示された。

今後の課題として、軸比の悪化を防ぐためにアンテナ間隔やショートピン等を配置したアンテナについて解析することがあげられる。

7. 参考文献

- [1] 飯田尚志編, "衛星通信", pp.123, オーム社, 1997
- [2] J. R. Mosig and F. E. Gardiol, "General integral equation formulation for microstrip antennas and scatterers", IEE Proc., Vol.132, Pt.H, No.7, pp.424-432, Dec., 1985.
- [3] Kraus "Antennas", pp.479, McGraw-Hill, 1950.
- [4] 羽石, 平沢, 鈴木, "小形・平面アンテナ", pp.144, 電子情報通信学会, 1996.