

GAを用いた八木・宇田アンテナの設計

嶋田 将大* 堀 俊和* 藤元 美俊* 丸山 珠美**

*福井大学 工学部 ** (株)NTTドコモ

〒910-8507 福井市文京 3-9-1 〒239-8536 横須賀市光の丘 3-5

E-mail:shimada@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp

あらまし 八木・宇田アンテナは、地上テレビジョン放送受信アンテナとして広く用いられているが、最適設計するのもパラメータが多数となることから、困難を伴う。本報告では、遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithms)を用いて設計し、入力抵抗の変化による指向性利得およびGB積の関係を示し、文献と比較し本報告で設計したアンテナの妥当性を示す。また、素子数の変化による指向性利得および比帯域幅の関係を示し、3素子における特異解の特性について示す。

キーワード 八木・宇田アンテナ, 遺伝的アルゴリズム, 指向性利得, GB積, 比帯域幅

The design of Yagi-Uda antennas using GA

Masahiro SHIMADA* Toshikazu HORI* Mitoshi FUJIMOTO* Tamami MARUYAMA**

*Faculty of Engineering, University of Fukui, **NTT DoCoMo Inc,

3-9-1, Bunkyo, Fukui, 910-8507 Japan 3-5, Hikari-no-oka, Yokosuka, 239-8536 Japan

E-mail:shimada@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp

Abstract Yagi-Uda antennas are widely used for television broadcast reception. However, the optimum designing is difficult because of many parameters. This paper describes the optimum design methods of Yagi-Uda antennas using a genetic algorithm (GA). The relation between the directivity and gain-bandwidth product are shown with input resistance as a parameter. The validity of the antenna designed the method described in this paper is compared with a reference. Moreover, the relations between the directivity and the relative bandwidth are indicated. Furthermore, the performances of a three element array with the unique solution are shown.

Keyword Yagi-Uda antennas, Genetic Algorithm, directivity, gain-band product, relative bandwidth

1. まえがき

八木・宇田アンテナは、地上テレビジョン放送受信アンテナとして広く用いられており、反射器と放射器と数本の導波器で構成されている。その利得は素子長、素子間隔、素子半径などで決まり、4素子でも素子長と素子間隔だけでパラメータが7つもあり、素子数を増やすと、パラメータが多数となることから、最適な構造を決定することは、困難を伴う。そこで、近年、遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithms)を利用して八木・宇田アンテナを設計する手法が注目されている。Jonesらは八木・宇

田アンテナをGAを用いて設計し、勾配法と比較している[1]。LindenらはGAによる八木・宇田アンテナの特性と従来の特性を比較し、アンテナ長が同じ場合でも高利得なアンテナが得られることを報告している[2]。糞谷らは、擬似八木・宇田アンテナを直線または平面フェーズドアレーアンテナに適用し、アレー素子指向性をビーム走査範囲で平坦とし、ビーム走査に伴う利得変動を抑えるとともに、実効利得そのものを向上させる方法を提案している[3]。また、八木・宇田アンテナ以外では、丸山らが携帯電話基地局のセクタアンテナをGAを用いて

設計し、従来のアンテナに比べ性能を損なうことなく小型化が実現できることを報告している[4].

本報告では、これらの GA を用いた設計法に注目し、高利得が得られるように素子長と素子間隔をパラメータとして八木・宇田アンテナの最適設計を試みる.

本報告では、2 章で GA を用いた八木・宇田アンテナの設計手法と入力抵抗に対する指向性利得および GB 積の関係を示す. 3 章では、2 章で示した設計手法を用いた場合の指向性利得および GB 積を文献と比較し、本報告の設計法の妥当性を検証する. 4 章では、素子半径と指向性利得および比帯域幅との関係、および素子数と八木・宇田アンテナの特性との関係を示す. さらに、3 素子の場合特異解が存在することを示し、その特性を通常解の特性と比較する.

2. GA を用いた八木・宇田アンテナの設計

2.1 GA を用いた設計手法

本報告で用いる設計法について、4 素子を例に説明する.

図 1 に 4 素子八木・宇田アンテナの構造を示す. アンテナの素子長 l_n と素子間隔 S_n をパラメータとして、GA を用いてパラメータスタディを行った. 素子長および素子間隔をそれぞれ 8 ビットで表現し、これを 1 つのビット列で表現し、適合関数を(1)式のように決定した.

$$o(x) = a \cdot G'(x) - b \cdot \text{Re}'(Z(x)) - c \cdot \text{Im}'(Z(x)) \quad (1)$$

ただし、

$$G'(x) = 10 \cdot \log_{10} G(x) \quad [\text{dBi}] \quad (2)$$

$$\text{Re}'(Z(x)) = |\alpha - \text{Re}(Z(x))| \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$\text{Im}'(Z(x)) = |\text{Im}(Z(x))| \quad [\Omega] \quad (4)$$

であり、 $G(x)$ は利得、 $\text{Re}(Z(x))$ は入力抵抗、 $\text{Im}(Z(x))$ は入力リアクタンス、 α は定数(入力定数の目標値に相当)、また a, b, c は重み係数である.

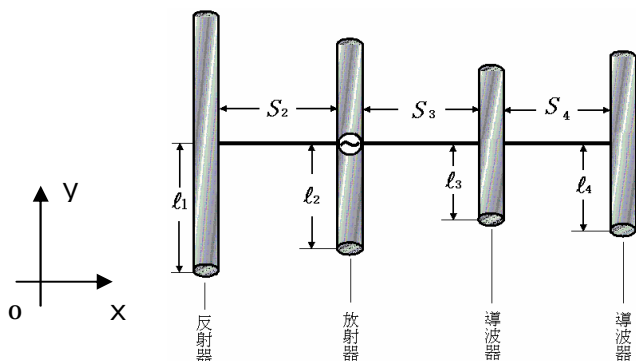


図 1 4 素子八木・宇田アンテナの構造

図 2 に本研究で用いた GA の流れを示す. 最初に初期集団(人口数)の設定を行う. 次に適合関数を評価し、収束条件を満たしていれば終了、それ以外ならば世代を重ねる. 次に、適合関数を解析・計算し、値の高い個体(ビット列)を残す(選択). 本設計では、ルーレット選択を用いた. 次に、新しいビット列を生成するために、交叉を行う. 本設計では、一点交叉を用い、交叉率を 0.8 とした. 最後に、局地解に陥ることを避けるために低い確率でビットを反転させる(突然変異). 本設計では、突然変異率を 0.01 とした. GA はこの繰り返しで最適解を求めるアルゴリズムである.

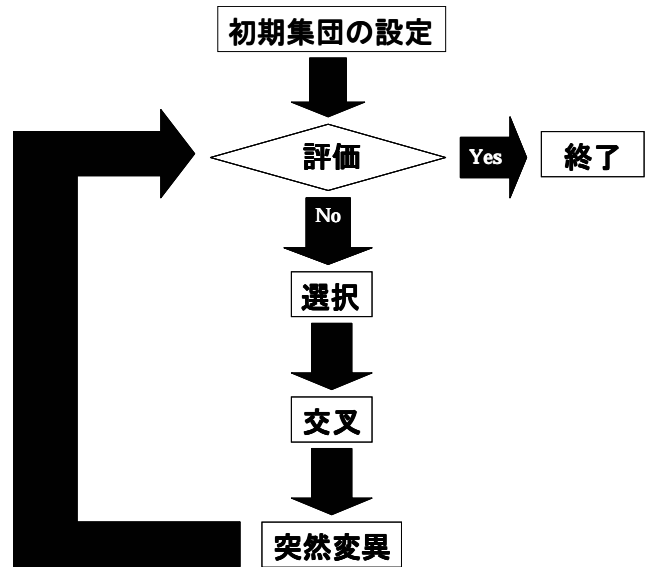


図 2 GA の流れ

2.2 八木・宇田アンテナの特性

2.1 で示した適合関数において、 α の値を 10, 20, 30, 40, 50 とし、人口数を 50、世代数を 1000、素子半径 $0.003 \lambda_0$ としたときの 4 素子八木・宇田アンテナの特性を図 3 に示す. ここで、本報告では GB 積を指向性利得(dBi)と比帯域幅(%)の積と定義し、比帯域幅を $\text{VSWR}2$ 以下の範囲とする.

この結果から、指向性利得は入力抵抗が小さいほど高くなるが、 30Ω 未満であると GB 積が小さくなり、比帯域幅が狭くなるのがわかる. したがって、帯域を広くするためには入力抵抗を 30Ω 以上とする必要がある.

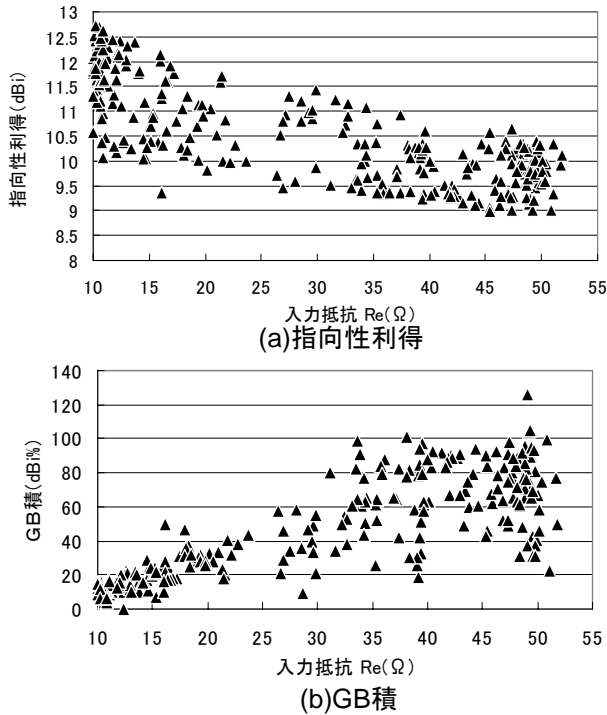


図3 入力抵抗と指向性利得・GB積の関係

また、図4に入力抵抗30Ω以上の範囲で設計したときの指向性利得の度数分布を示す。

ここで、パラメータは人口数であり、◆印は人口数50、□印は人口数100である。

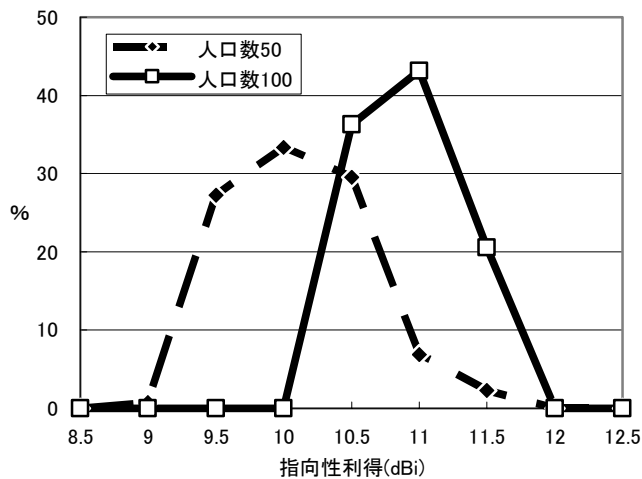


図4 人口数と指向性利得の関係

この結果から、人口数を増加させることで、より高利得な範囲に収束することが明らかとなった。

3. 設計法の検証

2.1で示した適合関数において、 α の値を35,40,45,50

とし、人口数を100、世代数を1000、素子半径を文献[1]と同じ $0.00225\lambda_0$ としたときの4素子八木・宇田アンテナの特性を図5に示す。

ここで、アンテナ長 S は $S = S_2 + S_3 + S_4$ であり、■印は本設計の入力抵抗30Ω以上の4素子八木・宇田アンテナである。また、図中の△は文献[1]に記載されている4素子八木・宇田アンテナであり、入力抵抗46.9Ω、アンテナ長 $0.741\lambda_0$ 、指向性利得9.664dBi、比帯域幅7.93%、GB積76.66dBi%である

この結果から、1)本報告で設計されたアンテナのほうが文献[1]に比べ、指向性利得に関してはアンテナ長に関係なく、ほぼ高利得を得ている。2)GB積に関しては、ほぼ同じアンテナ長で、文献[1]より高い値が存在する、よって、本報告の設計法は有効であるといえる。

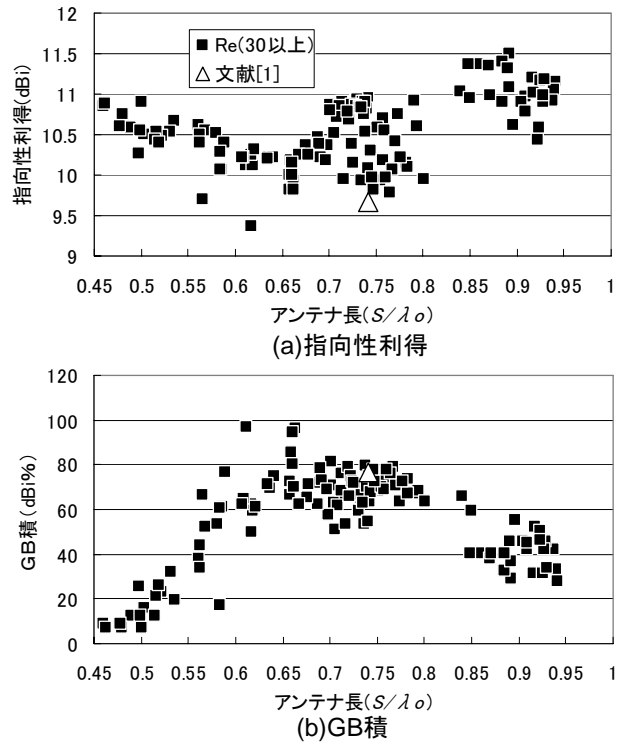


図5 文献との比較

4. シミュレーション結果

4.1 素子半径による八木・宇田アンテナの特性変化

図6に素子半径と指向性利得および比帯域幅の関係を示す。ここで、素子半径に対するシミュレーション結果を■で表している。

この結果から、素子半径を大きくすることで指向性利得および比帯域幅は大きくなる事がわかる。

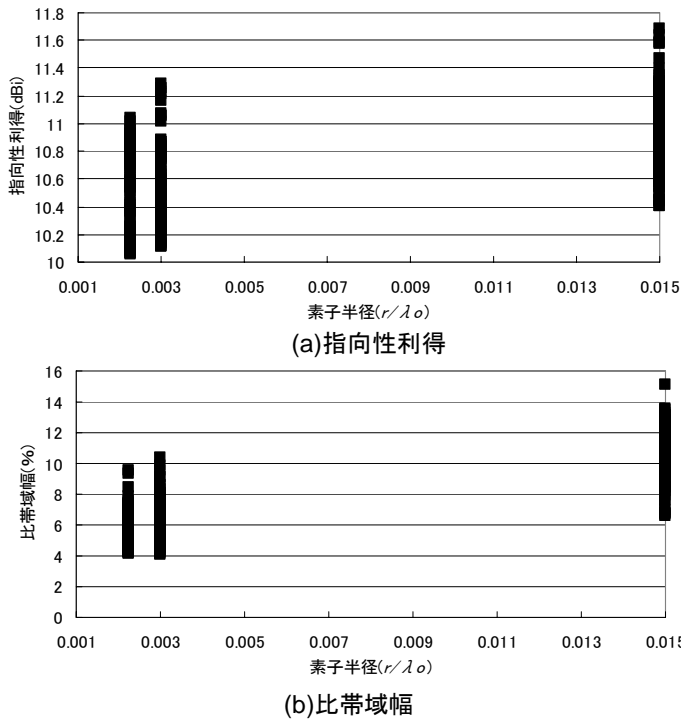


図6 素子半径と指向性利得・比帯域幅の関係

4.2 素子数による八木・宇田アンテナの特性変化

2章で述べた設計手法で、人口数 100, 世代数 1000, 素子半径 $0.015\lambda_0$ として、素子数が 3, 4 および 7 のときの八木・宇田アンテナの特性を図 7 に示す。ここで、■印および□印は 7 素子, ▲印および△印は 4 素子, ●印および○印は 3 素子を表している。

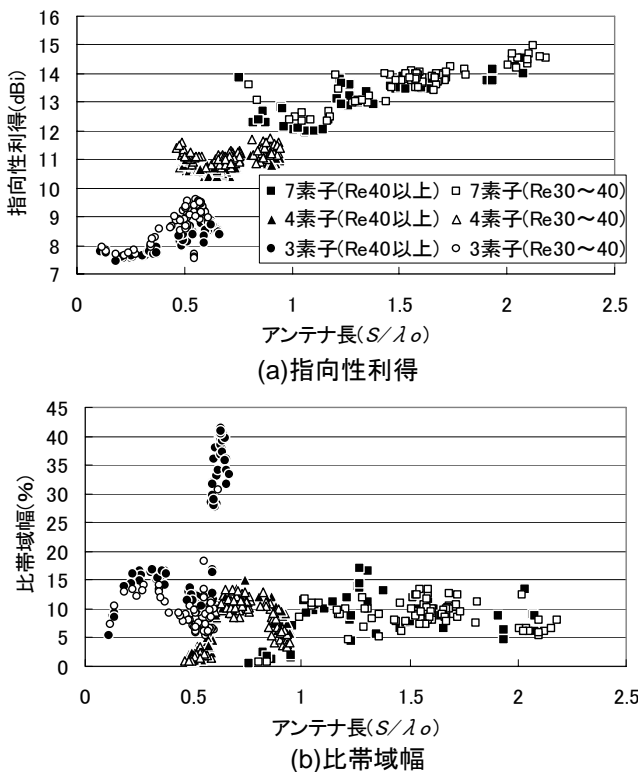


図7 素子数と指向性利得・比帯域幅の関係

この結果から、素子数を増やすことで指向性利得の向上が認められるが、素子数を増加させることで素子間も増加し、結果的にアンテナ長が長くなってしまふ。また、比帯域幅に関しては、特異解の場合を除き素子数に関係なく 20% 未満であることがわかる。

一般的に、指向性利得が高くなると比帯域幅は狭くなるが、3 素子でアンテナ長が $0.6\lambda_0 \sim 0.7\lambda_0$ の範囲において比帯域幅が 30% を超える特異解があることがわかる。

また、7 素子において素子長と素子間隔でパラメータが 13 個もあり、他の 3 素子や 4 素子に比べて収束しきれず、バラつきがあることがわかる。これを収束させるためには人口数や世代数を増加させることで改善できると考えられるが、どちらの場合も設計するのにかなり時間を要する。

4.3 3素子の特異解について検証

4.2 より 3 素子の比帯域幅において特異解が存在することがわかった。そこで、どのような場合に比帯域幅が広がるのかを検証するために、図 8 にアンテナ長と比帯域幅の関係、図 9 に反射器と放射器間および放射器と導波器間に対する比帯域幅の関係を示す。

ここで、◆印は入力抵抗 40Ω 以上, □印は入力抵抗 30Ω 以上 40Ω 未満の値である。

図 8 よりアンテナ長が約 $0.6\lambda_0 \sim 0.7\lambda_0$ の範囲で、入力抵抗が 40Ω 以上であれば比帯域幅 30% を確保できるが、図 7 よりアンテナ長を約 $0.6\lambda_0$ より長くすると指向性利得が下がるため、あまりアンテナ長は長くできない。よって、アンテナ長は $0.6\lambda_0 \sim 0.65\lambda_0$ の範囲で設計すれば、比帯域幅 30%, 指向性利得 8.5dBi 以上を確保できる。

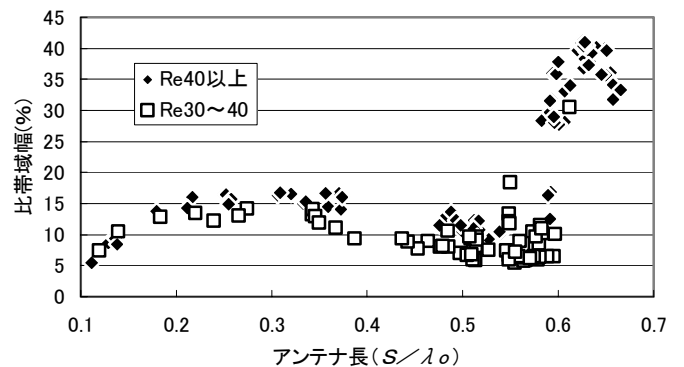


図8 アンテナ長と比帯域幅の関係

また、図 9 の放射器と導波器間に対する比帯域幅の関係から、 $0.3\lambda_0 \sim 0.45\lambda_0$ の範囲で、入力抵抗 40Ω 以上で設計すればよいことがわかる。このことから、アンテナ長との関係より残りの反射器と放射器間は $0.15\lambda_0 \sim 0.35\lambda_0$ の範囲で設計すればよいが、図 9 の反射器と放射器間に対する比帯域幅の関係から $0.2\lambda_0$ 未満では比帯域幅 20% 以下となってしまう。

以上のことから、3 素子八木・宇田アンテナにおいて、比帯域幅 30% 以上を確保するには、入力抵抗を 40Ω 以上、反射器と放射器間を $0.2\lambda_0 \sim 0.35\lambda_0$ の範囲、放射器と導波器間を $0.3\lambda_0 \sim 0.45\lambda_0$ の範囲で、アンテナ長を $0.6\lambda_0 \sim 0.65\lambda_0$ の範囲で設計すればよい。

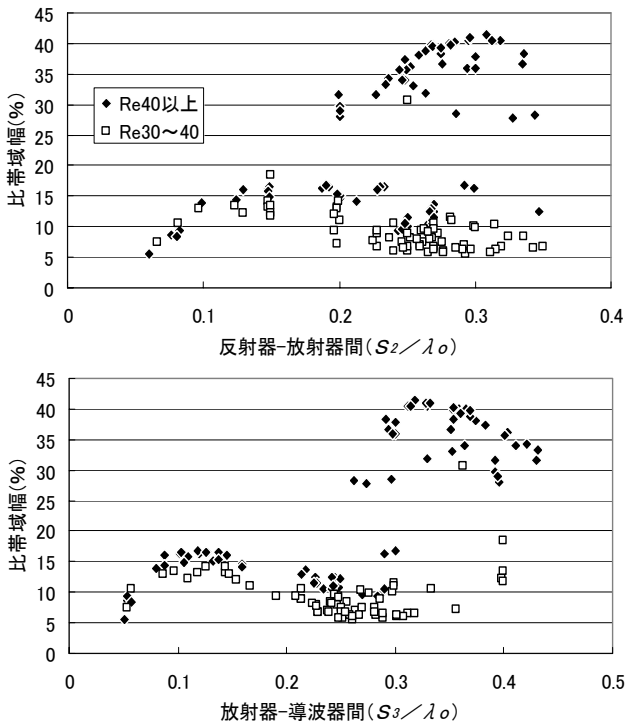


図 9 素子間隔と比帯域幅の関係

4.4 特異解の特性

図 8 より、アンテナ長 $0.6\lambda_0$ 付近の通常解と特異解とでは比帯域幅が大きく違うことがわかる。そこで、図 10 にアンテナ長と指向性利得が、ほぼ同じである通常解と特異の Smith チャートおよび周波数特性を示す。ここで、---線は通常解、—線は特異解である。

また、それぞれのアンテナの素子長、素子間隔、指向性利得、比帯域幅を表 1 に示す。

図 9 より、特異解は 3.5GHz から 4.0GHz の間に再び VSWR が下がることによって、全体的に比帯域幅が広くなることがわかる。このことは、Smith チャートからもわかる。

	反射器 放射器間(S_2)	放射器 導波器間(S_3)	アンテナ長 (S)	指向性利得(dBi)
通常解	$0.34706\lambda_0$	$0.25412\lambda_0$	$0.59118\lambda_0$	8.837
特異解	$0.26333\lambda_0$	$0.32922\lambda_0$	$0.59255\lambda_0$	8.779
	反射器(l_1)	放射器(l_2)	導波器(l_3)	比帯域幅(%)
通常解	$0.45844\lambda_0$	$0.4255\lambda_0$	$0.38784\lambda_0$	12.559
特異解	$0.47726\lambda_0$	$0.4145\lambda_0$	$0.37844\lambda_0$	31.815

表 1 通常解と特異解のパラメータ

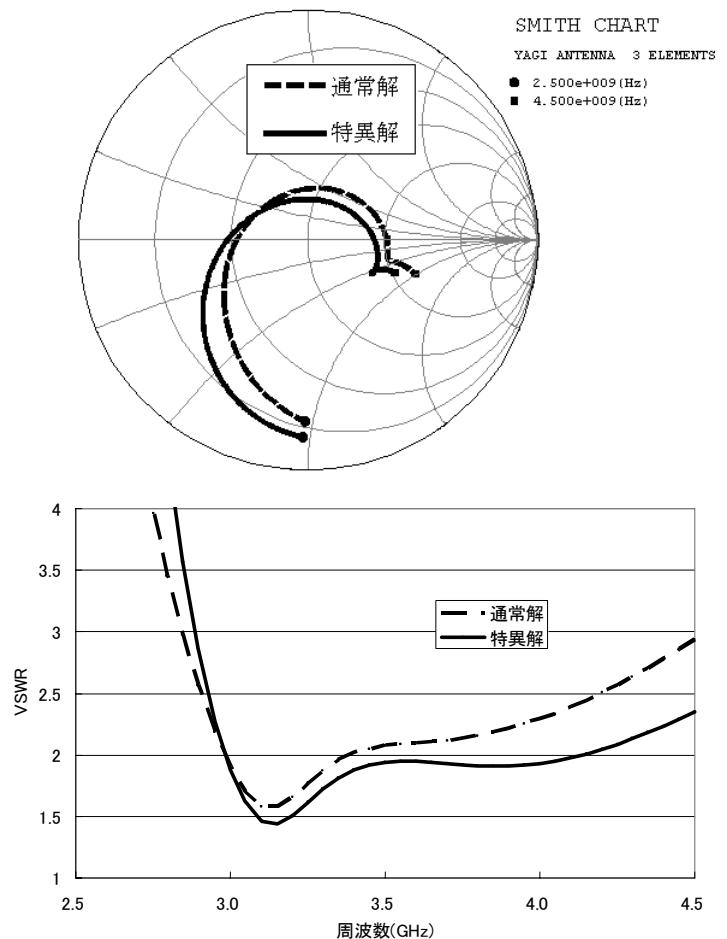


図 10 通常解と特異解の比較

さらに、図 11 に通常解と特異解の磁界面での放射指向性を示す。ここで、---線は通常解、—線は特異解である。

この結果から、メインローブおよびバックローブは、ほぼ同じであるが、特異解のほうが、通常解に比べ第 2 サイドローブが大きいことがわかる。なお、電界面ではあまり変化は見られなかった。

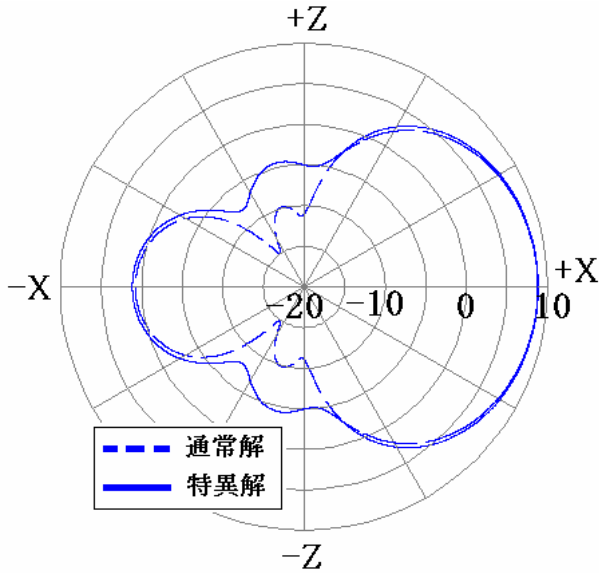


図 1.1 特異解と通常解の磁界面での放射指向性

5. むすび

本報告では、GA を用いた設計法に注目し、高利得を得られるように素子長と素子間隔をパラメータに八木・宇田アンテナを最適設計した。

本報告でははじめに、GA を用いた八木・宇田アンテナの設計手法を示し、入力抵抗が小さければ高利得が得られるが、 30Ω 以上で設計しなければ、GB 積が小さすぎて実用的ではないことを示した。また、人口数を増加させることで、より高利得を得られる範囲で収束させることができ、従来のアンテナと指向性利得および GB 積で比較し、本設計の妥当性を示した。さらに、素子半径が変化するときの指向性利得と比帯域幅の関係を示し、素子半径を大きくすることで指向性利得と比帯域幅はともに向上することが確認できた。

次に、素子数が 3, 4, 7 と変化するときの指向性利得および比帯域幅の関係を示した。素子数を増加させることで指向性利得は向上するが、比帯域幅はあまり変化しないことがわかった。また、7 素子は他の素子に比べて収束しきれず、バラつきが見られた。これは素子長と素子間隔でパラメータが 13 個もあるためであると考えられる。さらに、3 素子において特異解が存在することが明らかとなり、この特異解は、比帯域幅 30%、指向性利得

8.5dBi 以上を確保できていて、入力抵抗を 40Ω 以上とし、反射器と放射器間を $0.2\lambda_0 \sim 0.35\lambda_0$ の範囲、放射器と導波器間を $0.3\lambda_0 \sim 0.45\lambda_0$ の範囲で、アンテナ長を $0.6\lambda_0 \sim 0.65\lambda_0$ の範囲で 3 素子八木・宇田アンテナを設計すれば得られることがわかった。

最後に、通常解と特異解の比較として、スミスチャート、周波数特性、磁界面での放射特性を示した。特異解は、通常解と異なり高い周波数で再び VSWR が小さくなることによって、全体的に比帯域幅が広がっていることが明らかとなった。また、放射特性からメインローブとバックローブには差は見られないが、第 2 サイドローブにおいて、特異解のほうが通常解よりも大きいことが明らかとなった。

今後、GA を重み係数にも適用し、収束性に優れたアルゴリズムを考えるとともに、素子数を増加させたときのバラつきを少なくすることが課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重なご助言を頂いた、(株)NTTドコモ 長 敬三博士に感謝する。

参考文献

- [1] Eric A. Jones and William T. Joines, "Design of Yagi-Uda Antennas Using Genetic Algorithms," IEEE Trans. Antennas Propagat. vol.45, pp. 1386-1392, Sep.1997.
- [2] Edward E. Althuler, Derek S. Linden, and Richard A. Wing, "Yagi antenna design using a genetic algorithm," Communications Quarterly, pp.11-18, Win.1998.
- [3] 糺谷卓也, 辻陽介, 桑原義彦, "擬似八木アンテナアレーの遺伝的アルゴリズムによる設計" 信学論(B), vol.J86-B, No.2, pp.209-218, Feb.2003.
- [4] 丸山珠美, 堀俊和, "多目的最適化のための改良目的関数を用いた GA-ICT 法の提案とそれを用いた等ビーム 2 周波共用アンテナの設計" 信学技報, AP2001-35, vol.101, no.119, pp.9-14, Jun.2001.