

多重折り返し板状逆 F アンテナ

－ エンジンスターターの改良 －

M2004MM039 鈴木 洋佑

指導教員 稲垣 直樹

1 はじめに

ITS(Intelligent Transport Systems : 高度道路交通システム)の進展に伴う各種車載アンテナ, コビキタス通信における超小形アンテナなど, 小形アンテナは無線通信を含む多くの分野で用いられ, 将来は医療用, エネルギー伝送, センサー及び光分野にまで拡張進展されようとしている.

先行研究 [1] において 400MHz 帯特定小電力無線に対応させる小形アンテナを Y 社と共同研究した. 本研究ではエンジンスターターのリモコン用アンテナに携帯電話器などに用いられる板状逆 F アンテナ (PIFA : Planar Inverted-F Antenna)[2] の更なる小形化を目指し, アンテナを内部に折り返した多重折り返し板状逆 F アンテナを提案した.

また提案する多重折り返し板状逆 F アンテナを 400MHz 帯特定小電力無線に限らず, 多種多様な周波数で利用できるように一般化を行った. そしてアンテナの小形化, 電波到達飛距離の拡大と広帯域特性を検討した.

2 研究の目的と方法

Y 社市販の 429MHz 帯エンジンスターターはアンテナが長く利便性が悪い. また無指向性であるため周囲に無駄に電波を放射し電波到達飛距離が短いという問題点が挙げられる. この点に着目し, $\lambda/4$ モノポールアンテナを折り曲げることで低姿勢化し, 機器筐体の実装が容易である PIFA をリモコン用アンテナとして用いる. そこでさらにアンテナの小形化を目指すもので, アンテナを内部に折り返した多重折り返し板状逆 F アンテナを提案する.

アンテナを考案する際に 3 次元電磁界解析シミュレーションソフト FEKO[3] を利用し電磁界解析を行う. そして提案するアンテナの指向性・利得・リターンロスおよびスミスチャートを検証することにより, アンテナとして要求を満たしているかを考察する. また受信側車載アンテナと組み合わせによる送受信総合特性を数値解析による直接解と基準アンテナの理論値を比較し, 電波到達飛距離の拡大を求める. さらに小形アンテナの性能を定量的に評価する必要がある, L.J.Chu によるアンテナを小形化するための評価手法を用いる.

3 多重折り返し板状逆 F アンテナの提案

PIFA の板を開口部で内部に多重に折り返す構造を提案する. 折り返す回数により折り返し板状逆 F アンテナ

(FPIFA : Folded Planar Inverted-F Antenna)[4], 二重 FPIFA (DFPIFA : Doubly Folded Planar Inverted-F Antenna), 三重 FPIFA (TFPIFA : Triply Folded Planar Inverted-F Antenna) と呼ぶ.

3.1 アンテナ構造

折り返す前の板を一边 246.0mm の正方形を基に, 無限グランド平面に対し平行に折り曲げた構造を考え, 中心周波数 300MHz 帯において設計を行った. 次に内部に折り返した板から無限グランド平面, 板から板までの間隔を 1mm に設定する. また折り返す前の板と無限グランド平面の間隔を 15mm に設定し数値解析を行い, 特性比較する. 一例として TFPIFA の構造を図 1 に示す.

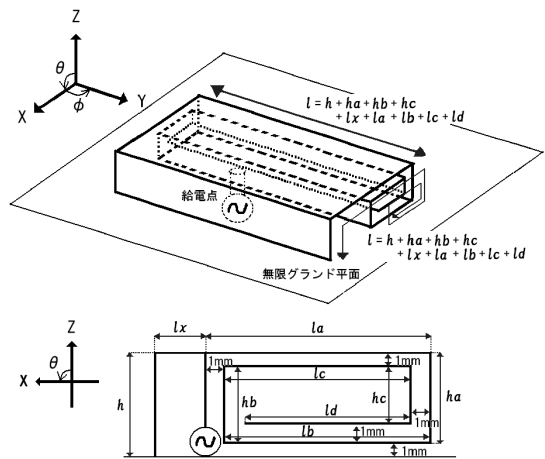


図 1 TFPIFA の構造

3.2 数値解析結果と特性比較

上記のアンテナ構造でこのときの数値解析結果と PIFA, FPIFA, DFPIFA, TFPIFA の特性比較を表 1 と以下に示す.

表 1 多重折り返し板状逆 F アンテナの特性比較

アンテナの種類	TFPIFA	DFPIFA	FPIFA	PIFA
展開長 (l)[mm]	154.4	137.1	114.5	246.0
外寸法 (lx+la)[mm]	33.3	37.6	45.7	231.0
帯域幅 [MHz]	0.41	0.45	0.50	6.60
最大利得 [dB]	4.1	5.1	4.7	3.8

● 展開長 (l) と外寸法 (lx+la)

最も小形化を実現する TFPIFA の展開長は約 $\lambda/6$, 外寸法は約 $\lambda/30$ である. PIFA より展開長は約 62.8%, 外寸法は約 14.4% と小形化を実現す

ることができる。

- 帯域幅
-10dB 以下の帯域幅は 500kHz, 450kHz, 410kHz となり, PIFA と比較すると約 7.6%, 約 6.8%, 約 6.2% と狭帯域特性となる。
- 指向性と利得
すべてのアンテナ構造で最大利得は十分に大きい。

3.3 考察

PIFA を利用し, アンテナの開口部を内部に多重に折り返す構造である多重折り返し板状逆 F アンテナにより, アンテナの小形化を実現することができた。展開長は約 46.5%~62.8%, 外寸法は約 14.4%~19.8% と縮小する。最大利得は折り返すことにより劣化せずむしろ大きくすることができたが, 周波数特性は劣化した。よって小形で機器筐体の実装が容易なアンテナ形状であるが, 狭帯域特性となりアンテナ特性の維持または向上に繋がらなかった。

4 エンジンスタートリモコン用アンテナ

中心周波数 429MHz 帯エンジンスタートはアンテナが長く利便性が悪い。さらに先行研究で提案されたアンテナの外寸法は 70.6mm で, この形状ではリモコン本体の大きさ 72mm x 40mm x 20mm とほぼ同じで手に対して電磁波の影響を受けやすかった。そこで DFPIFA, TFPIFA を利用し, リモコン用アンテナの小形化を提案する。このリモコン用アンテナをリモコン用 DFPIFA, リモコン用 TFPIFA と呼ぶ。

4.1 アンテナ構造

リモコン本体に対し平行に折り曲げ, 内部に折り返した板からリモコン本体, 板から板までの間隔を 1mm に設定する。次にアンテナの横幅 (Y 軸) を 40mm, 折り返す前の板とリモコン本体の間隔を 10mm に設定し数値解析を行い, 特性比較する。一例としてリモコン用 TFPIFA の構造を図 2 に示す。

4.2 数値解析結果と特性比較

上記のアンテナ構造でこのときの数値解析結果とリモコン用 DFPIFA, リモコン用 TFPIFA の特性比較を表 2 と以下に示す。

表 2 エンジンスタートリモコン用アンテナの特性比較

アンテナの種類	リモコン用 TFPIFA	リモコン用 DFPIFA	先行研究のアンテナ
展開長 (l) [mm]	120.3	108.7	156.9
外寸法 $(lx+la)$ [mm]	27.2	31.0	70.6
帯域幅 [kHz]	200	320	500
最大利得 [dB]	3.0	2.3	1.6

- 展開長 (l) と外寸法 $(lx+la)$
最も小形化を実現するリモコン用 TFPIFA の展開長は約 $1/6$, 外寸法は約 $1/26$ である。先行研

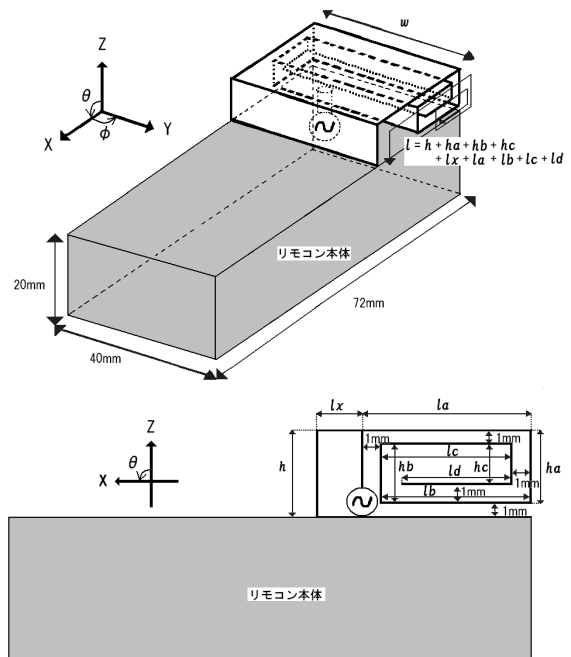


図 2 リモコン用 TFPIFA : 構造

究のアンテナより展開長は約 76.7%, 外寸法は約 38.5% と小形化を実現することができる。

- 帯域幅
-10dB 以下の帯域幅は 320kHz, 200kHz となり, 先行研究のアンテナと比較すると約 64.0%, 約 40.0% と狭帯域特性となる。
- 指向性と利得
すべてのアンテナ構造で最大利得は十分に大きい。一例として数値解析より TFPIFA の電界面指向性を図 3 に示す。

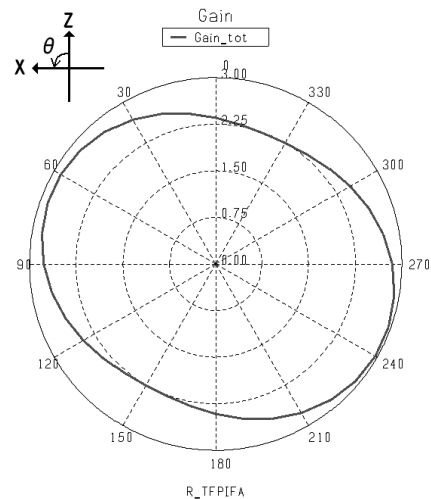


図 3 リモコン用 TFPIFA の電界面指向性 [dB]

4.3 考察

DFPIFA, TFPIFA を利用することによりリモコン用アンテナの小形化を実現することができた。考察するアンテナの外寸法は 31.0mm, 27.2mm と手に対して電磁波の影響を受けにくい寸法である。次にリモコン用 TFPIFA の電界面指向性図より $\theta = 60^\circ, 240^\circ$ の面方向で指向性を持つ。完全に前方を向いていないがリモコン用アンテナとして利用する際に許容範囲内である。

今まではアンテナによりリモコン全体に凹凸ある構造であるが、アンテナを埋め込むことにより握りやすく使いやすい構造を考察する。このときリモコン本体内部の電子部品等による構造上の問題は考慮しないものとする。この考察するアンテナを本体埋め込み型リモコン用 TFPIFA とする。そして FEKO を利用し電磁界解析を行った結果、表 3 よりリモコン用 TFPIFA とほぼ同様の数値解析結果を得た。

表 3 本体埋め込み型リモコン用 TFPIFA の数値解析結果

展開長 (l) [mm]	120.5
外寸法 ($lx + la$) [mm]	27.1
帯域幅 [kHz]	200
最大利得 [dB]	3.0

5 受信側車載アンテナと組み合わせによる送受信総合特性

送信側リモコン用アンテナの送信電力とある距離離れた受信側車載アンテナの受信電力の関係より送受信総合特性を評価する。受信アンテナは共同研究 [5] で考察するパッチアンテナと誘電体共振器アンテナ (DRA: Dielectric Resonator Antenna) を電磁界解析結果の直接解と、基準アンテナにフリスの伝達公式 [6] を併用した理論値を比較し、電波到達飛距離の拡大を立証する。そこで基準とするアンテナの送信側アンテナの利得は -12dB, 受信側アンテナの利得は -8dB である。

5.1 フリスの伝達公式

送信側アンテナから放射された電波が同じ偏波効率 100% のアンテナで受信されるとき電波におけるフリスの伝達公式を式 (1), (2) に示す。このとき P_t [W]: 送信電力, P_r [W]: 受信電力, G_t [linear]: 送信側アンテナの利得, G_r [linear]: 受信側アンテナの利得, $L = (4\pi r/\lambda)^2$ [linear]: 自由空間損失, λ [m]: 波長, r [m]: 送受信距離とする。

$$P_r[W] = \frac{G_t G_r P_t}{L} = \frac{\lambda^2 G_t G_r P_t}{(4\pi r)^2} \quad (1)$$

$$P_r[\text{dBW}] = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2 G_t G_r P_t}{(4\pi r)^2} \right) \quad (2)$$

受信電力の計算は自由空間におけるもので、実際には様々な伝搬損失要因があり単純には計算できないが、概略値及び傾向を把握することができる。

5.2 送受信総合特性の解析と評価

本研究で考察するリモコン用 TFPIFA とパッチアンテナ・DRA を FEKO による電磁解析における受信電力の直接解は、基準アンテナの受信電力の理論値を上回る結果が得た。一例として考察する送受信アンテナと基準アンテナの水平面距離に対する受信電力を表 4, 図 4 に示す。

表 4 受信アンテナの水平面距離 [m] に対する受信電力 [dBW]

受信アンテナ \ 距離 [m]	100	500	1000
パッチアンテナ	-88.5	-102.5	-108.4
DRA	-78.1	-98.2	-104.2
基準アンテナ	-102.3	-116.2	-122.3

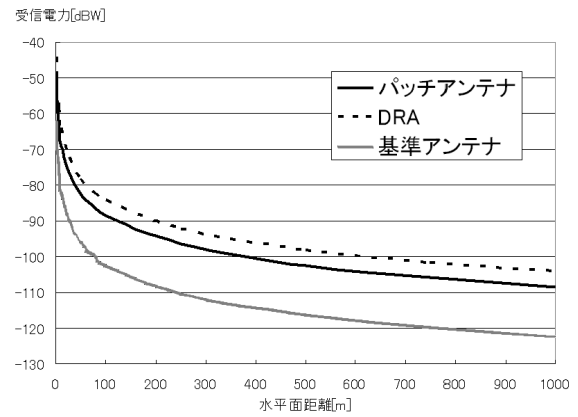


図 4 受信アンテナの水平面距離 [m] に対する受信電力 [dBW]

基準アンテナと比較するとリモコン用 TFPIFA とパッチアンテナを用いた受信電力は約 14.8dB 増加し、DRA を用いた受信電力は約 18.1dB 増加し良い結果を得た。これは送受信距離にすると約 5~8 倍になり電波到達飛距離が拡大することになった。

6 アンテナの理論的境界

小形アンテナの性能を定量的に評価する必要があり、L.J.Chu によるアンテナを小形化するための評価手法を用いる。アンテナを含む球体内の蓄積エネルギーの理論的境界の大きさである下限 Q 値と考察するアンテナの帯域幅から求めるアンテナ Q を比較することで評価する [7]。

6.1 下限 Q 値の理論

下限 Q 値の算出方法は球面座標系で展開される電磁界表現を使い、アンテナを取り組む半径 a の球体内で蓄積されたエネルギーを回路的に導出する。下限 Q 値は式 (3), (4) で表す。

$$Q = \frac{1 + 3(ka)^2}{(ka)^3 \{1 + (ka)^2\}} \quad (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} \quad (4)$$

またアンテナ Q は式 (5) で表す .

$$Q = \frac{\text{共振周波数}}{\text{帯域幅}} \quad (5)$$

下限 Q 値と考案するアンテナ Q を比較することにより , その考案するアンテナが効率良く小形化を実現しているかどうか判断することが出来る .

6.2 考案するアンテナの評価

考案するアンテナ構造が効率良く小形化されているか評価する . 評価するアンテナとして板と無限グランド平面の間隔が 15mm に設定したときの PIFA・FPIFA・DFPIFA・TFPIFA と , リモコン用アンテナである先行研究・リモコン用 DFPIFA・リモコン用 TFPIFA を評価対象とする . 以下に , 評価対象のアンテナの計算結果を表 5 , 図 5 に示す .

表 5 考案するアンテナの評価結果

アンテナの種類	ka	下限 Q 値	アンテナ Q
PIFA (h=15mm)	1.06	1.72	45.46
FPIFA (h=15mm)	0.39	21.29	600.00
DFPIFA (h=15mm)	0.45	14.75	666.67
TFPIFA (h=15mm)	0.50	11.29	731.71
先行研究	0.37	24.94	858.46
リモコン用 DFPIFA	0.23	88.40	1341.34
リモコン用 TFPIFA	0.22	99.96	2146.15

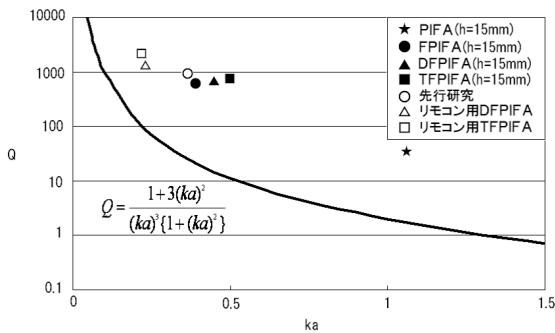


図 5 ka に対する下限 Q 値とアンテナ Q

下限 Q 値と考案するアンテナ Q を比較すると近い数値を得ることができなかった . それは L.J.Chu の算出方法は半径 a の球体内の蓄積エネルギーを回路的に導出している . 考案するアンテナは低姿勢である板状逆 F アンテナを利用しているので , 球体内にアンテナが占める体積の割合が小さいため理論的境界に近づけることが難しいと考えられる .

7 むすび

本研究では多重折り返し板状逆 F アンテナにより , アンテナの小形化を実現することができた . また最大利得も向上し折り返すことにより電波到達距離が拡大することができたが , 周波数帯域が劣化した .

また Y 社と共同研究であるエンジンスターターの特定小電力無線リモコン用アンテナに DFPIFA と TFPIFA のアンテナ構造を利用することで先行研究より小形化を実現することができたが , リモコン用 DFPIFA とリモコン用 TFPIFA も同様に周波数特性が劣化した . しかし送信側アンテナは送信信号が単純なため狭帯域特性でも良いが , リモコンとして使用する際に雑音や人体の影響により中心周波数がずれてしまう可能性がある .

最大利得は折り返すことにより劣化せずむしる大きくなった . これにより受信側車載アンテナのパッチアンテナと DRA を用い , 送受信総合特性の解析と評価をした . その結果 , 考案するリモコン用 TFPIFA とパッチアンテナ・DRA における受信電力の直接解は基準アンテナの受信電力の理論値を上回り , 電波到達距離が拡大することができた .

小形で機器筐体の実装が容易なアンテナ形状であるが , 狭帯域特性となりアンテナ特性の維持または向上することができなかった . 多重折り返し板状逆 F アンテナは用途に応じて適宜取舍選択をする必要がある .

多重折り返し板状逆 F アンテナは無限グランド平面やリモコン本体に平行に内部に折り返しているため , 低姿勢であるアンテナ構造を実現している . しかし , 下限 Q 値はアンテナを取り囲む球体内の蓄積エネルギーの理論的境界値であるため低姿勢の多重折り返し板状逆 F アンテナでは狭帯域特性となる . そこでアンテナ構造を円状または半円状に内部に折り返すなどの工夫によりアンテナ Q を理論的境界値に近づけるのが今後の課題である .

参考文献

- [1] 登坂展与, 吉田朋子, “特定小電力無線に関する研究”, 南山大学 2004 年度卒業論文 (2005).
- [2] 佐藤源定, 川上春夫, 田口光雄, 現代アンテナ工学, 総合電子出版 (2004.4).
- [3] FEKO, <http://www.feko.info/>.
- [4] Hee-Moo Heo, Jong-Myung Woo, “Miniaturization of Microstrip Antenna using Folded Structure”, Proceedings of ISAP'04, Sendai, JAPAN, pp.985-988 (2004).
- [5] 平松孝仁, 岩橋大輔, “特定小電力無線のための誘電体アンテナに関する研究”, 南山大学 2005 年度卒業論文 (2006).
- [6] 佐藤政次, 光・無線通信システム, 株式会社オーム社 (1998.11).
- [7] L.J.Chu, “Physical Limitations of Omni-Antennas,” J.Appl.Phys., Vol.19, 1163-1175 (1948).