

人体をグラウンドとして利用した多重折り返し板状逆 F アンテナと正方形ループアンテナ

2017SC030 近藤諒弥 2017SC041 森下蓮

指導教員：藤井勝之

1 はじめに

近年、車から離れた場所からでもロックを解除することができるキーレスキーが用いられている。2016年に公開されたアメリカ合衆国のミュージカル映画「ラ・ラ・ランド」では顎にキーレスキーを当てた状態で電波を飛ばすことで車の場所を探すシーンがあった [1]。これは、キーレスキーを車に向かって腕を伸ばした状態で電波を飛ばすときよりも、キーレスキーを顎に当てた状態で電波を飛ばしたときの方が電波の飛ぶ距離が伸びるためこのような行動をとったと考えられる [2]。私たちはこのように、キーレスキーの持ち方を変えることで電波の飛距離が変化することに興味を持った。そのため、本研究では人体をグラウンドとして利用し、アンテナの持ち方を変えたときにアンテナの放射特性にどのような違いが生じるか XFDTD(三次元電磁界シミュレータ) のシミュレーション結果を用いて比較する [3]。

2 MFPIFA と正方形ループアンテナ

本章では MFPIFA の成り立ちと正方形ループアンテナ、そして FDTD 法について述べる。

2.1 MFPIFA の成り立ちと正方形ループアンテナ

1/4 波長モノポールアンテナは共振がとりやすいが、一方で突起が大きいため風圧や空気抵抗の観点から低姿勢化が望まれる。単純に素子長を短縮するとインピーダンス不整合が生じる。そのため、1/4 波長モノポールアンテナを素子長を維持したまま地板と水平になるように折り曲げ、低姿勢化したアンテナが図 1 に示す逆 L アンテナである。しかし折り曲げによって低姿勢化すると、放射抵抗が小さくなり容量性リアクタンス成分が増加する。そのため、給電点で整合をとることが難しくなった。そこで逆 L アンテナの放射特性を大きくし、給電部付近に短絡線を設けることで、折り曲げによって増加した容量性リアクタンス成分を打ち消そうとしたアンテナが図 2 に示す逆 F アンテナ (inverted-F antenna) である [4]。このアンテナは寸法を縮小するが、アンテナ特性の一部を犠牲にして小型化を実現しているため、性能の維持または向上という要求に対してアンテナの設計が困難である [5]。

線状の逆 F アンテナの素子を平板で構成したものが板状逆 F アンテナ (PIFA: Planer Inverted-F Antenna) であり、アンテナ素子を内側に折り返すことで小型化を図ったアンテナが多重折り返し板状逆 F アンテナ (MFPIFA: Multiple Folded Planer Inverted-F Antenna) である。

ループアンテナは、アンテナのエレメントが円形や方形で、ループ状に巻いたものでありエレメントの長さが波長に比べて長いものや短いものなど様々である。本研究で使用するループアンテナは、一般的に使われる 1 波長ループアンテナである。ループアンテナは、HF 帯以下の電界強度測定用または方向探知用の受信アンテナとして用いられており、水平面の指向性は 8 の字で垂直面の指向性は無指向である。

本研究では MFPIFA と正方形ループアンテナをアンテナとして用いる。周波数に関しては、MFPIFA は [4] と同様に 429MHz 帯にし、正方形ループアンテナは 315MHz としてシミュレーションを行う。

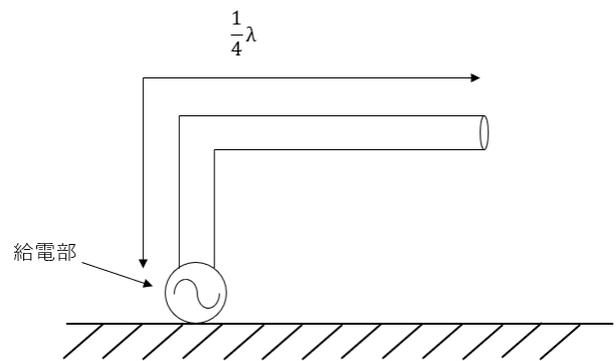


図 1 逆 L アンテナ

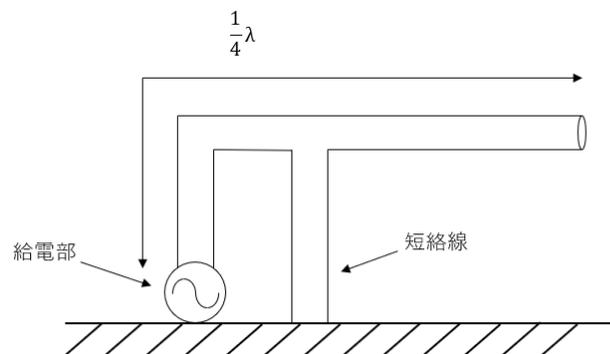


図 2 逆 F アンテナ

2.2 FDTD 法について

FDTD 法とは、マクスウェル方程式を時間軸と空間軸において直接離散化する時間領域の解析手法である。そして、曲線上のモデルに比べて角形や線状のモデルをシミュレーションすることに特化している。私たちは角形と線状のモデルを使ってシミュレーションを行うため、FDTD 法が適しているといえる。また [6] によると、FDTD 法の有用性としてはプログラムコーディングが用意であるとともに単位演算が速いという特徴がある。FDTD 法の演算量はセル数にほぼ比例するため、モーメント法 (MoM) や有限要素法 (FEM) といった他の手法と比較して、大規模な問題を解くのに有利な条件となっている。

3 アンテナのモデルと人体モデル

アンテナは放射特性 430MHz の MFPIFA と、315MHz の正方形ループアンテナを使用し、人体は NICT の数値人体モデルを使用した [7]。MFPIFA のモデルを図 3 に示し、正方形ループアンテナを誘電体のケースで囲ったモデルを図 4 に示す。MFPIFA はアンテナ素子と筐体上面のギャップで給電してあり、筐体及びアンテナ素子は PEC(完全導体:Perfect Electric Conductor) で構成した。正方形ループアンテナは、正方形型ワイヤループアンテナを、比誘電率 4.0、導電率 $0s/m$ の誘電体のケースで囲って構成した。数値人体モデルを図 6 に示す。人体モデルの姿勢に関しては、実際の使用状況を想定して、独立行政法人情報通信研究機構の開発による姿勢変形ソフトウェア (Voxel Human Anatomy Lab) によって姿勢変形を行った [8]。数値人体モデルは組成周波数によって電気定数が変化するため、MFPIFA を用いるときは 429MHz、ループアンテナを用いるときは 315MHz として自由空間で解析を行った。MFPIFA の寸法を表 1、誘電体のケースで囲った正方形ループアンテナの寸法を表 2 に示す。

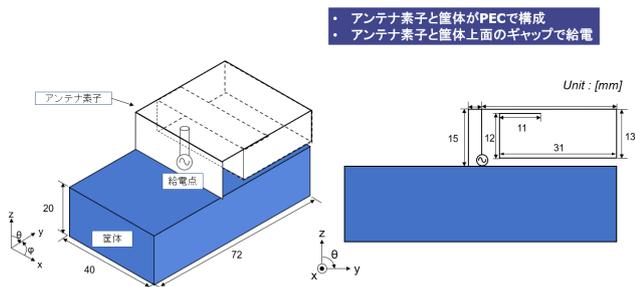


図 3 MFPIFA のモデル

表 1 MFPIFA の寸法

筐体	40mm × 72mm × 20mm
アンテナ素子の展開長	123mm
アンテナ素子の幅	40mm

315MHzの放射設計

Unit : [mm]

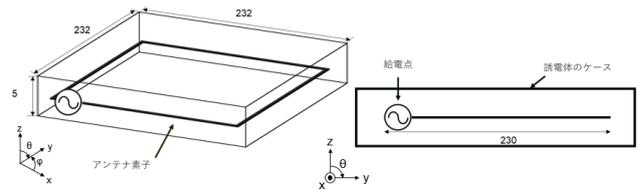


図 4 正方形ループアンテナのモデル

表 2 正方形ループアンテナの寸法

エレメント長	230mm × 230mm
誘電体のケース	232mm × 232mm × 10mm

4 シミュレーションについて

MFPIFA を片手で持った人体モデル、MFPIFA を両手で持った人体モデル、MFPIFA を顎に付けた人体モデルを図 5 に示す。本研究では人体をグラウンドとして利用し、MFPIFA と正方形ループアンテナを図 5 のように 3 つの姿勢で持ったときに、アンテナの放射特性にどのような違いが生じるか XFDTD(三次元電磁界解析シミュレータ) のシミュレーション結果を用いて比較する。

実際に家の車の鍵 (N-BOX) を使用して、図 5 のように 3 つの姿勢での電波の飛距離を計測した。実測の様子を図 6 に示す。シミュレーションは XFDTD で行い、シミュレーション条件を表 3 に示す。

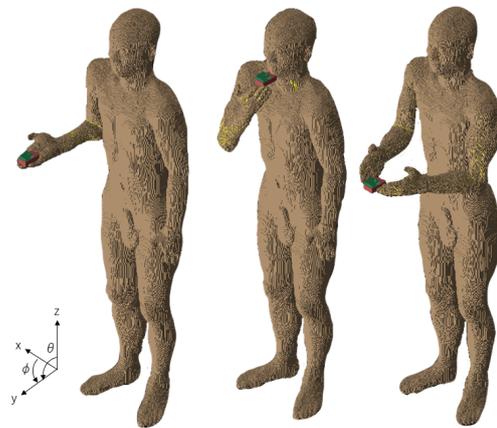


図 5 人体モデル [7,8]

表 3 シミュレーション条件

パラメータ	設定
境界条件	PML7 層
セルサイズ (アンテナ近傍)	1 × 1 × 1mm
セルサイズ	不均一セル
大地の模擬	なし



図6 実測風景

5 アンテナ用語とシミュレーションソフト

本節では、アンテナ電波の放射に関する用語とXFDTD(三次元電磁界シミュレータ)について述べる。

5.1 指向性

アンテナから放射される電波は、一般に放射する方向によって強弱を生じる。その性質を指向性または指向特性という。最大放射方向と任意の方向との同一距離における電界強度をそれぞれ E_0 、 E とし、その任意の方向の指向性係数を D とすると D は式 (1) のように表される [9]。

$$D = E/E_0 \quad (1)$$

5.2 反射係数

反射波を生じる線路で、入射波電圧・電流を \dot{V}_f 、 \dot{I}_f とし反射波電圧・電流を \dot{V}_r 、 \dot{I}_r とすると電圧および電流の反射の程度を表す反射係数は (2)、(3) で表される。

$$\Gamma_V = \dot{V}_r/\dot{V}_f \quad (2)$$

$$\Gamma_I = \dot{I}_r/\dot{I}_f \quad (3)$$

ここで、 Γ_V を電圧反射係数、 Γ_I を電流反射係数という [9]。

5.3 XFDTD

FDTD 法 (時間領域差分:Finite Difference Time Domain) を用いた、米国 Remcom 社製の三次元フルウェーブ電磁界解析ソフトウェアである。

6 実測およびシミュレーションの結果と考察

家の車の鍵 (N-BOX) を使用して、図 5 のように 3 つの姿勢での電波の飛距離を計測したときの結果を表 5 に示す。実測の結果より、シミュレーションでは顎・両手・片手の順に利得が大きくなると予想をした。

図 7 に 430MHz の MFPIFA 単体の反射係数と、図 5 のように 3 つの姿勢で MFPIFA を持ったときの反射係数を示す。MFPIFA は 430MHz の放射設計で作製して、およそ 430MHz でピーク値となっているため MFPIFA 単体のシミュレーション結果は良好である。片手と両手に関しては-10dBa を下回っているが、実測で電波の飛距離が最も長かった顎はおよそ-5dBa となっている。原因としては、MFPIFA は狭帯域のため良好な整合状態が取れなかったと考えられる。図 8 に 315MHz のループアンテナ単体の反射係数と、図 6 のように 3 つの姿勢でループアンテナを持ったときの反射係数を示す。図 8 からは顎、両手、片手の順にピーク値が大きくなっていることが分かる。これは MFPIFA が狭帯域なのに対しループアンテナが広帯域のため、良好な整合状態が取れたからだと考えられる。図 9 に 430MHz の MFPIFA 単体の指向性と、図 5 のように 3 つの姿勢で MFPIFA を持ったときの指向性を示す。結果をみると 90° の向きに最も利得が高いのは MFPIFA 単体であることが分かる。図 10 に 315MHz のループアンテナ単体の指向性と、図 5 のように 3 つの姿勢でループアンテナを持ったときの指向性を示す。片手・両手・顎いずれも 90° の向きではループアンテナ単体よりも利得が高くなっていることが分かる。実測の結果 (表 4) では顎にアンテナを当てたときが最も電波の飛距離が長かったが、シミュレーション結果では両手の場合が最も利得が高いという結果が得られた。

表 4 実測の結果

キーレスキーの持ち方	電波の飛距離
片手で持ったとき	46.8m
両手で持ったとき	56.6m
顎に当てたとき	62.0m

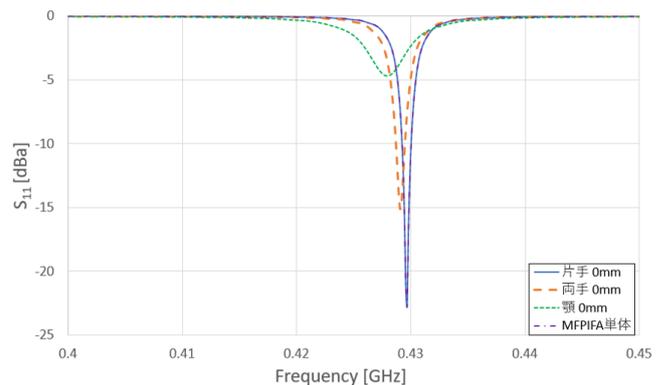


図 7 MFPIFA 単体と 3 つの姿勢での MFPIFA の反射係数

7 おわりに

本研究では人体をグラウンドとして利用し、図 5 のように 3 つの姿勢でアンテナ (MFPIFA とループアンテナ)

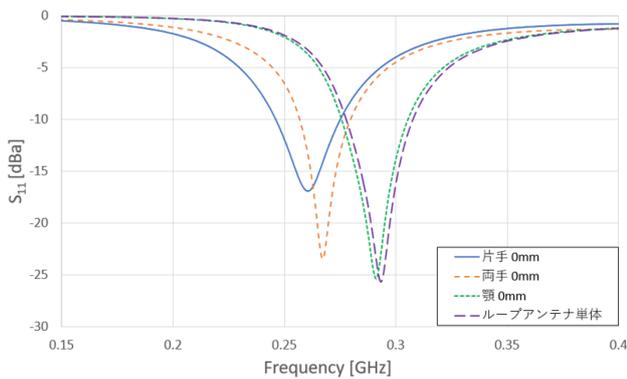


図 8 ループアンテナ単体と 3 つの姿勢での反射係数

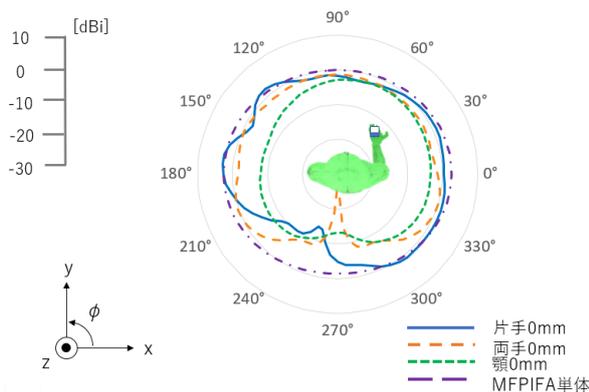


図 9 MFPIFA 単体と 3 つの姿勢での MFPIFA の指向性

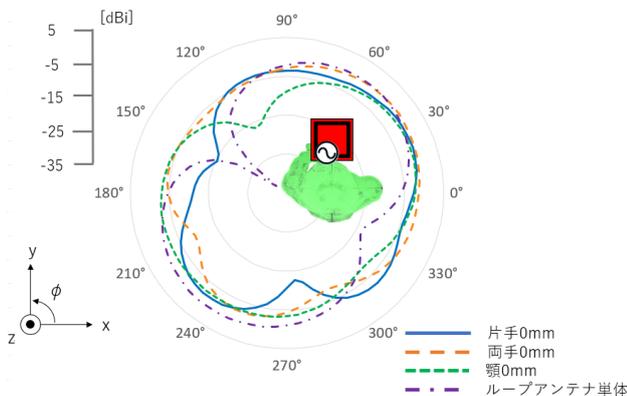


図 10 ループアンテナ単体と 3 つの姿勢での指向性

を持ったときの、アンテナの放射特性の違いを比較した。MFPIFA を片手・両手・顎に当てたときのシミュレーション結果 (反射係数と指向性) では、MFPIFA が狭帯域であり良好な整合状態が取れなかったために実測のような結果は得られなかったと考えた。そして、MFPIFA の狭帯域という短所を補った広帯域のループアンテナでも同様のシミュレーションを行った。結果は顎・両手・片手の順に反射損失が小さくなり、実測のような結果を得ることができ

た。しかし、アンテナから見て車の向きへの利得は、顎・両手・片手の順に高くはならなかった。

今回はループアンテナの給電部をどこにするか考慮せずに作製したため、それが原因でアンテナの放射効率が良くなかったと考えた。そのため、給電部をどこにするか検討した上でシミュレーションを行う必要があると考えた。

8 謝辞

本論文を制作するにあたり、終始丁寧かつ熱心な御指導を賜りました藤井勝之准教授および奥村康行教授に心よりの感謝致します。そして、中間発表において数多くの貴重な助言を下されました河野浩之教授にも感謝いたします。また、日頃より多くの御助言下されました奥村・藤井研究室の修士の先輩方、および研究を支えて下さった同研究室の方々に深く感謝致します。最後に、ここまで育てて下さった両親を含め御指導、御助言いただきました多くの方々に改めて感謝致します。

参考文献

- [1] デイミアン・チャゼル (監督・脚本), 2017, “ラ・ラ・ランド”, “<https://gaga.ne.jp/lalaland/sp.html>, 参照 Jan.20, 2021 .
- [2] Remcom, “XFdtd 3D Electromagnetic Simulation Software”, “<https://ja.remcom.com/examples/keyless-entry.html>, 参照 Jan.5, 2021 .
- [3] Remcom, “XFdtd 3D Electromagnetic Simulation Software”, “<https://www.remcom.com/xfdttd-3d-em-simulation-software>, 参照 Jan.5, 2021 .
- [4] 武藤哉汰, “人体近傍における 429MHz 帯多重折り返し板状逆 F アンテナの特性評価”, “南山大学 2019 年度卒業論文”, pp.4-11, 2020 .
- [5] 桑山真一, 長島圭樹, “非平面グラウンド上の逆 F アンテナに関する研究”, “南山大学 2006 年度卒業論文”, 2007 .
- [6] 猿橋正之, 辺見茂, 鴻巣理, “FDTD 法による電磁波シミュレーションの有用性”, “計算工学講演会論文集”, May 2008.
- [7] 長岡智明, 櫻井清子, 国枝悦夫, 渡辺聡一, 本間寛之, 鈴木保, 河合光正, 酒本勝之, 小川幸次, 此川公紀, 久保田勝己, 金鳳洙, 多氣昌生, 山中幸雄, 渡辺敏: 日本人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発, 生体医工学 Vol.40, No.4, pp.45-52, 2002.
- [8] Tomoaki Nagano, Soichi Watanabe, “Postured voxel-based human models for electromagnetic dosimetry” Physics in Medicine and Biology, vol.53, no.24, pp.7047-7061, 2008.
- [9] 吉川忠久, “無線工学 B”, 東京電機大学出版局, 東京, 2008 .