

PSO による導体板形状を考慮した WiMAX 用 U 字型折返しダイポール アンテナの広帯域特性

グエン・トゥワン・ハン[†] 森下 久[†] 小柳 芳雄^{††} 泉井 一浩^{†††} 西脇 眞二^{†††}

[†]防衛大学校 理工学部電気電子工学科 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

^{††}パナソニックモバイルコミュニケーションズ(株) 〒224-0054 神奈川県横浜市都筑区佐江戸町 600

^{†††}京都大学大学院 工学研究科理工学専攻 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: [†]{em49002,morisita}@nda.ac.jp ^{††}koyanagi.yoshio@jp.panasonic.com ^{†††}izui@prec.kyoto-u.ac.jp

あらまし 既に、USB ドングルでの使用を想定した WiMAX 用 U 字型折返しダイポールアンテナを取り上げ、その広帯域特性について検討した。解析モデルは板状のきょう体 (75 mm×31 mm の導体板) 上の端に配置した U 字型折返しダイポールアンテナである。アンテナ素子直下の導体板を部分的に 88mm² 削除する事により WiMAX の使用周波数帯である 2.3 GHz~2.7 GHz と 3.4 GHz~3.8 GHz (IEEE 802.16 規格) を VSWR≤3 で完全にカバーすると共に帯域約 1560 MHz (VSWR≤3 で 2.25 GHz~3.81 GHz) の広帯域特性が得られることが分かった。本報告では、粒子群最適化手法(Particle Swarm Optimization: PSO)を導体板削除へ適用することで、更なる広帯域特性及び導体板削除面積の低減について検討を行なった。最適化結果では、導体板の削除面積を 28mm² まで低減させる事が出来ると共に、VSWR≤3 で 2110 MHz (2.23 GHz~3.1 GHz と 3.23 GHz~4.47 GHz) の更なる広帯域特性が得られることを確認した。

キーワード 折返しダイポールアンテナ, WiMAX, 広帯域, 粒子群最適化(PSO)

Broadband Characteristic of U-Shaped Folded Dipole Antenna for WiMAX in Consideration of Ground Plane using PSO

Nguyen TUAN HUNG[†] Hisashi MORISHITA[†] Yoshio KOYANAGI^{††}

Kazuhiro IZUI^{†††} Shinji NISHIWAKI^{†††}

[†]Dept. of Electrical & Electronic Eng., National Defense Academy 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686 Japan

^{††}Panasonic Mobile Communications Co., Ltd 600 Saedo-chou, Tsuduki-ku, Yokohama, 224-0054 Japan

^{†††}Dept. of Mechanical Engineering & Science, Graduate School of Engineering, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyou-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: [†]{em49002,morisita}@nda.ac.jp ^{††}koyanagi.yoshio@jp.panasonic.com ^{†††}izui@prec.kyoto-u.ac.jp

Abstract Previously, broadband characteristic of U-Shaped Folded Dipole Antenna for WiMAX, which is assumed to be used inside USB dongle, has been investigated. Analytical model is U-Shaped Folded Dipole Antenna which is placed along the upper end of a limited ground plane (75 mm×31 mm). It is found that when 88mm² of the ground plane under the antenna element is cut partially, two using frequency bands of WiMAX based on IEEE 802.16 standardization (2.3 GHz~2.7 GHz and 3.4 GHz~3.8 GHz) are covered completely, and a broadband characteristic of about 1560 MHz for VSWR≤3 (2.25 GHz~3.81 GHz) is obtained. In this paper, we investigate how to apply Particle Swarm Optimization (PSO) to obtain both the more broadband characteristic and smaller cutting area of the ground plane. The optimization result shows that it is possible to decrease cutting area of the ground plane to 28mm², and a much wider band of about 2110 MHz (2.23 GHz~3.1 GHz and 3.23 GHz~4.47 GHz) for VSWR≤3 is obtained.

Keyword Folded Dipole Antenna, WiMAX, Broadband, Particle Swarm Optimization (PSO)

1. まえがき

次世代通信規格と呼ばれる WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)が急速に発展しているのに伴い、それに用いられるアンテナは小形化のみならず多共振化や広帯域化が求められている[1], [2].

一方, WiMAX 用アンテナとして USB ドングルでの使用を想定した U 字型折返しダイポールアンテナ (U-shaped Folded Dipole Antenna : UFDA)の広帯域特性が検討されている[3], [4]. USB ドングル内の基板を模擬する 75 mm×31 mm の導体板の上端にアンテナ素子を配置するが, ドングル内でアンテナを構成するためにアンテナ素子の低姿勢化が求められる. しかしながら, 整合を取るには導体板からアンテナ素子までの高さによる影響が大きく, アンテナ素子を低姿勢化した場合, 導体板へ近接するにつれ, 入力インピーダンス特性が大幅に劣化する. そこで, アンテナ素子直下の導体板を部分的に 88mm² 削除することにより, 低姿勢化時における入力インピーダンス特性劣化の改善を確認した[4]. その結果, VSWR≤3 で WiMAX の使用周波数帯(IEEE 802.16 規格)である 2.5 GHz 帯(2.3 GHz~2.7 GHz)及び 3.5 GHz 帯(3.4 GHz~3.8 GHz)を完全にカバーできると共に, 1560 MHz (VSWR≤3 で 2.25 GHz~3.81 GHz)の広帯域特性が得られた.

本報告では, より広帯域特性及び導体板削除面積の低減を目指して, 粒子群最適化手法である PSO (Particle Swarm Optimization)を UFDA の導体板削除問題へ適用する. 文献[4]での計算には, モーメント法を基本とした電磁界シミュレータ IE3D を用いたが, ここでは MATLAB 上で最適化プログラムの実行をする必要があり, IE3D の代わりに MATLAB と接続できる電磁界シミュレータ MW-Studio を使用する.

第 2 章に, アンテナ構成及び導体板の削除設計変数を示す. 第 3 章に, 導体板削除問題への PSO 適用方法[5], [6]及び最適化結果を示す. 第 4 章に最適化結果に対する評価をし, 動作原理の詳細な検討を行なう. 第 5 章をまとめとする.

2. アンテナ構成及び導体板の削除設計変数

2.1. アンテナ構成

図 1 に 75 mm×31 mm の導体板上に配置される UFDA のモデルを示す. UFDA 素子は文献[3]と同様に導体板の上端に沿うように配置し, その導体板の上端からアンテナ素子の給電ストリップに不平衡給電を行なう. 導体板とアンテナ素子を接続させる短絡ストリップと給電ストリップの幅はアンテナ素子の幅に等しく, いずれも 5 mm とする. アンテナ素子の上部と下部の間隔, 素子下部の中心にあるギャップの長さ, 短絡ストリップと給電ストリップの間隔は共に 1 mm である.

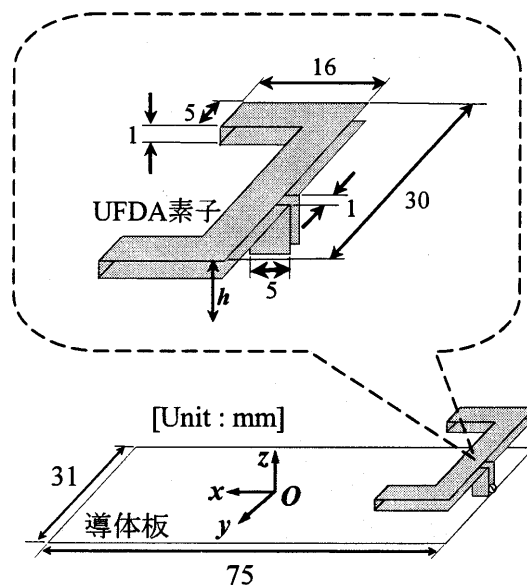


図 1 導体板上の UFDA 素子

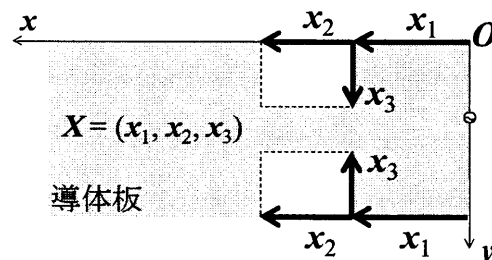


図 2 導体板の削除変数

USB ドングル内の構成において, アンテナ素子の低姿勢化が必要となるため, アンテナ素子上部から導体板までの高さ h を 4.2 mm とする.

2.2. 導体板の削除設計変数

文献[4]で, 導体板の両長辺から中心軸に向かい削除する方法の有効性が確認されたため, ここでは図 2 に示すように導体板を削除するための削除設計変数 $X=(x_1, x_2, x_3)$ を設定する. x_1 は Oy 軸から Ox 方向に向かう削除位置であり, x_2 と x_3 をそれぞれ Ox 方向と Oy 方向の削除距離とする. そのため, 導体板の削除面積 S_{cut} は:

$$S_{cut} = 2x_2x_3 \quad (1)$$

となる.

文献[4]では, 導体板の削除範囲をアンテナ素子直下の部分しか検討していなかったが, ここでは, 給電部付近を除き, 導体板の範囲内でどこでも削除できるように削除設計変数 X の 3 成分 x_1, x_2, x_3 の変化可能領域を次の式(2)~(4)で設定する.

$$0 < x_1, x_2, x_3 \quad (2)$$

$$x_1 + x_2 \leq 75 \quad (3)$$

$$x_3 \leq 14 \quad (4)$$

3. 導体板削除への PSO 適用方法

PSO (Particle Swarm Optimization)は、鳥や魚等のような群れの集団的な行動により、餌を効率よく探索できる動物の習性を模倣するアルゴリズムに基づく粒子群最適化手法と呼ばれている[5], [6]. 群内の一つの粒子が群れの一羽の鳥に相当すると考えられ、探索空間内で各粒子の位置・速度の更新と個人的・集団的探索の効率的なバランスにより最適解を導出する. 最適解 X_{optim} (最適な設計変数)を導出するために、設計変数に対する目的関数を設定する必要がある[6]. 目的関数を最小化させることにより、得られた目的関数の最小値に必ず設計変数が最適解 X_{optim} として導出される.

3.1. 目的関数の設定

本研究では、更なる広帯域特性及び導体板削除面積の低減という2つの目的があり、それぞれの目的に対する目的関数を設定する.

まず、第1目的の広帯域特性を考慮するため、設計変数 $X=(x_1, x_2, x_3)$ に対し、第一目的関数 $F(X)$ を

$$F(X)=w_1 \times \text{VSWR}(f_1)+w_2 \times \text{VSWR}(f_2)+w_3 \times \text{VSWR}(f_3) \quad (5)$$

と設定する. 式(5)にある w_1, w_2, w_3 は関数 $F(X)$ の重み係数で、いずれも $1/3$ とする. f_1, f_2, f_3 は VSWR 値が大きくなりがちな3つの周波数であり、ここで $f_1=2.4$ GHz, $f_2=3.2$ GHz, $f_3=3.95$ GHz と選択する. この設定方法では、 $F(X)$ が最小となるように最適化を行なう. $F(X)$ を最小化することで、 f_1, f_2, f_3 における VSWR 値が下がり、解析周波数帯で VSWR 値が全体的に低減することによって、広帯域特性が得られると考えられる.

一方、導体板の削除面積は式(1)で計算されるため、第2目的である導体板削除面積の低減に対し、第2目的関数 $S(X)$ を S_{cut} の規格値として

$$S(X) = S_{\text{cut}}/S_0 \quad (6)$$

と設定し、規格面積 S_0 を 100 mm^2 とする.

両目的に対する条件を満たす最適解を得るため、 $F(X)$ と $S(X)$ を統合させ、最終的な多目的関数 $G(X)$ [6] を重み付き総和法により次のように設定する.

$$G(X) = w \times F(X) + (1-w) \times S(X) \quad (7)$$

ここで、両目的のバランスを均等に保つため、重み係数 w を 0.5 とする. $G(X)$ が最小化されるにつれ、 $F(X)$ も $S(X)$ も共に最小化され、両目的を満たした最適解が導出されるという最適化構想である.

3.2. 初期設定

式(2)~(4)で決められた x_1, x_2, x_3 の変化可能領域を PSO の各粒子の探索空間とする. その探索空間内にある一つの粒子の位置、つまり一つの $X=(x_1, x_2, x_3)$ の特定の値により、一つの削除された導体板形状が決定される. また、それぞれの粒子の位置に対し、粒子の速度 $V=(v_1, v_2, v_3)$ を次のように定義する.

$$V=(v_1, v_2, v_3)=X/\Delta t=(x_1/\Delta t, x_2/\Delta t, x_3/\Delta t) \quad (8)$$

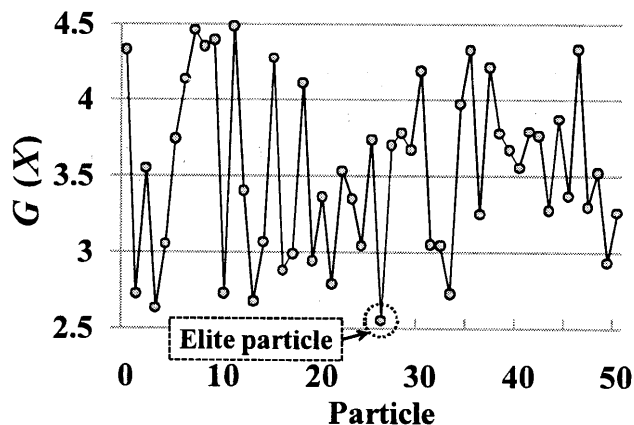


図3 PSOの初期設定

Δt は微分時間であり、ここで Δt を 0.7 とする[4].

それぞれ形成された導体板形状に対し、 $2 \text{ GHz} \sim 4.5 \text{ GHz}$ 帯でインピーダンス特性の解析を行ない、その時の $F(X)$, $S(X)$ と $G(X)$ の値を計算する.

今回の計算には、 $M=50$ 粒子からなる粒子群を用い、 $N=40$ ステップにわたり最適化を行なう. 初期設定で、全粒子の初期位置 $X_1, X_2, \dots, X_{50}$ を探索空間内でランダムに発生させ、それぞれの $G(X_1), G(X_2), \dots, G(X_{50})$ を計算する. 図3に示すように、計算された $G(X_1), G(X_2), \dots, G(X_{50})$ の中で、最も小さい $G(X)$ 値を持つ27番目の粒子を選び、この粒子をエリート粒子と呼び、その位置と速度を $(X_{\text{elite}}, V_{\text{elite}})$ とする. 最適化中、各粒子の位置が位置と速度が更新されるため、エリート粒子が各ステップに再選定される. ただし、一つのステップにおいて一つのエリート粒子をしか選定しない.

3.3. 各粒子の速度と位置の更新

各ステップでのエリート粒子の位置と速度以外に、全粒子に対しても現ステップまで、全粒子それぞれの最良位置を記録する. 例えば、ステップ i ($1 \leq i \leq N=40$) までの計算で j 番目の粒子 ($1 \leq j \leq M=50$) の最良位置を X_{best} とする. ステップ i で、この粒子が位置 $X(\text{old})$ と速度 $V(\text{old})$ を持つとすれば、ステップ $i+1$ においてこの粒子の速度 $V(\text{new})$ が次のように更新される.

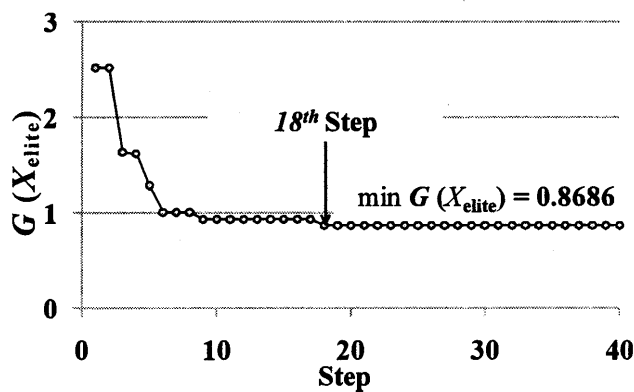
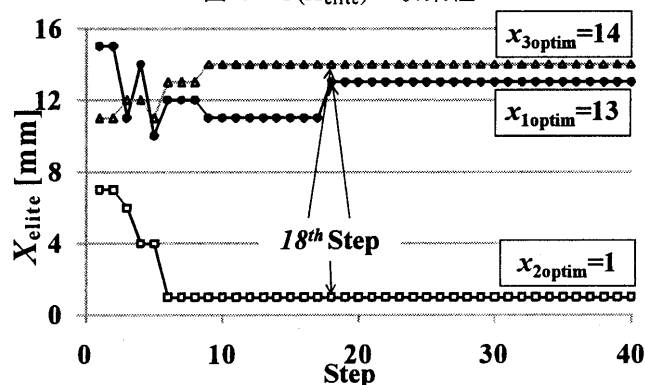
$$V(\text{new}) = w \times V(\text{old}) + c_1 \times r_1 \times [X_{\text{best}} - X(\text{old})] + c_2 \times r_2 \times [X_{\text{elite}}(\text{old}) - X(\text{old})] \quad (9)$$

$X_{\text{elite}}(\text{old})$ はステップ i でのエリート粒子の位置である. また、各パラメータ w, c_1, r_1, c_2, r_2 の値は文献[5]により決定される.

速度を更新し次第、 j 番目の粒子のステップ $i+1$ における新しい位置 $X(\text{new})$ を

$$X(\text{new}) = X(\text{old}) + V(\text{new}) \quad (10)$$

とする. 群内の全粒子に対し、同様に式(9)~(10)より速度と位置の更新を行ない、ステップ $i+1$ における各粒子の位置を $X_1(\text{new}), X_2(\text{new}), \dots, X_{50}(\text{new})$ とする.

図4 $G(X_{\text{elite}})$ の収束性図5 X_{elite} の収束性

3.1. 各ステップにおけるエリート粒子

更新された $X1(\text{new})$, $X2(\text{new})$, ..., $X50(\text{new})$ に対し, 50通りの削除された導体板形状が新たに形成される. 初期設定と同様に, それぞれの場合のインピーダンス特性を解析し, $G(X1)\text{-new}$, $G(X2)\text{-new}$, ..., $G(X50)\text{-new}$ を計算し, その中で $G(X)\text{-new}$ の最小値である $G(X_{\text{elite}})$ を有する導体板形状を再選定し, エリート粒子とする. このように, 各ステップにわたり目的関数 $G(X_{\text{elite}})$ の最小化により, 最後のステップで選定されたエリート粒子の位置 X_{elite} が最適解 X_{optim} として得られる.

各ステップにおける $G(X_{\text{elite}})$ の収束性を図4に示す. 図4より, $G(X_{\text{elite}})$ が最小化され18番目のステップから最小値である0.8686へ安定に収束することが分かる. $G(X_{\text{elite}})$ の収束に伴い, 各ステップにおけるエリート粒子の位置 $X_{\text{elite}} = (x_{1\text{elite}}, x_{2\text{elite}}, x_{3\text{elite}})$ も18番目のステップから収束する. 図5に X_{elite} の収束性を示す. 18~40番目で得られた X_{elite} が最適解 X_{optim} となり, 最適解の各成分がそれぞれ $x_{1\text{optim}} = 13$ mm, $x_{2\text{optim}} = 1$ mm, $x_{3\text{optim}} = 14$ mm となる.

X_{elite} の収束により, 各ステップにおけるエリート粒子の位置による導体板削除面積と VSWR 特性が決定される. それぞれを図6と図7に示す. 図6より, エリート粒子による導体板削除面積がステップ6~8で最小値である 26 mm^2 まで最小化されるが, ステップ9から最適値である 28 mm^2 に収束することが分かる.

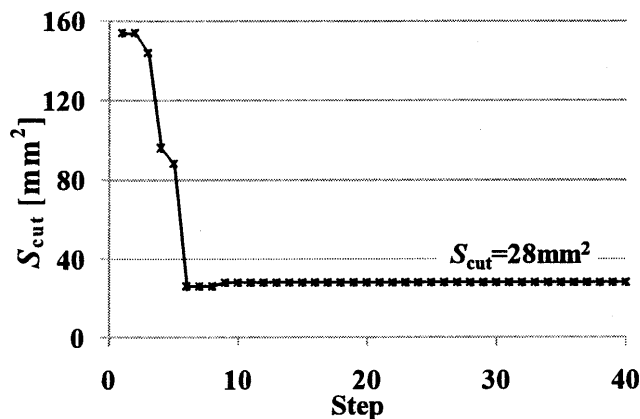


図6 各ステップにおけるエリート粒子の導体板削除面積

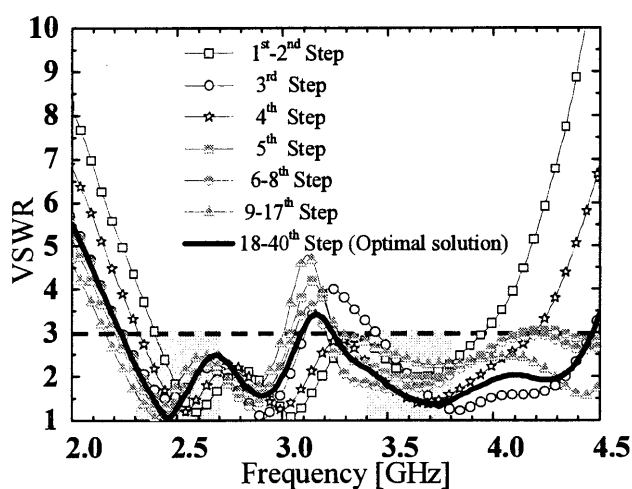


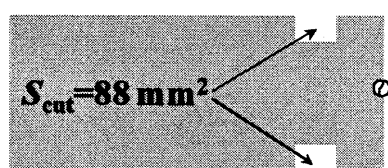
図7 各ステップにおけるエリート粒子の VSWR 特性

その理由は, 図7に示すように, ステップ6~8のエリート粒子 ($x_{1\text{elite}} = 13$, $x_{2\text{elite}} = 1$, $x_{3\text{elite}} = 13$) よりステップ18~40のエリート粒子(最適解)のほうの VSWR 値が 2 GHz~4.5 GHz 帯で全体的に低減されているため, 最適解の導体板削除面積のほうが有効であると考えられるからである. また, ステップ9~17のエリート粒子 ($x_{1\text{elite}} = 11$, $x_{2\text{elite}} = 1$, $x_{3\text{elite}} = 14$) は, 最適解と削除位置 x_1 だけ異なり, 削除距離 x_2 , x_3 が最適解と同値であるため削除面積も 28 mm^2 となる. しかし, 2 GHz~4.5 GHz 帯, 特に WiMAX の使用周波数帯では, 最適解の VSWR 値が全体的に最も低減され, 更に広帯域特性も得られることが確認されている.

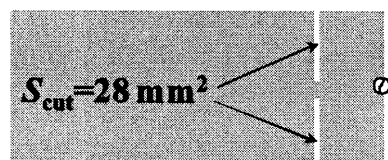
4. 最適化結果の評価と考察

4.1. 導体板削除面積と入力インピーダンス特性

得られた最適解の位置である X_{optim} による導体板の最適形状を図8(b)に示す. また, PSO を用いない場合の導体板の削除した形状[4]を図8(a)に示す. PSO を用いない場合に比べ, PSO を用いた場合の最適形状では, 導体板の削除面積が約 32% ($= 28/88 \times 100\%$) まで低減さ



(a) PSO を用いない場合



(b) PSO を用いた場合

図 8 導体板(GP)の形状

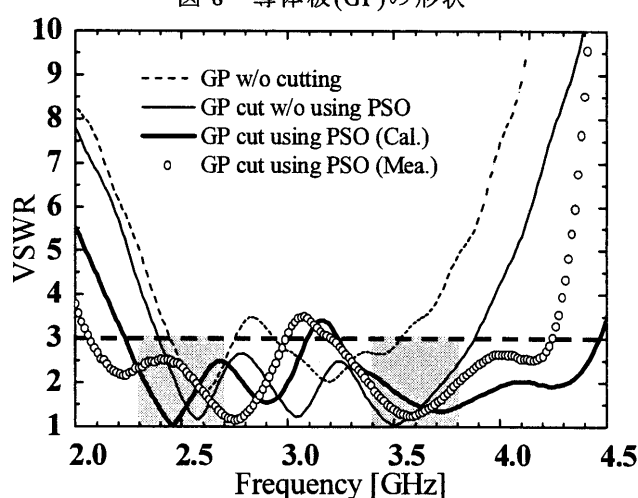
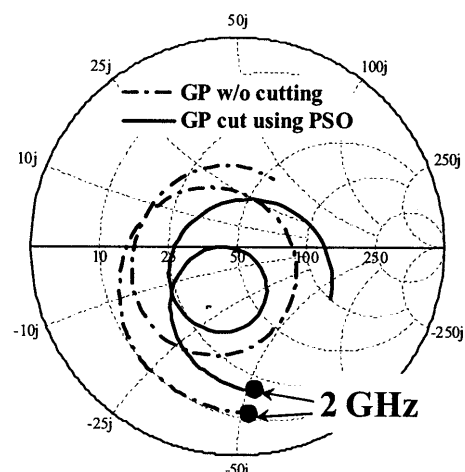


図 9 VSWR 特性

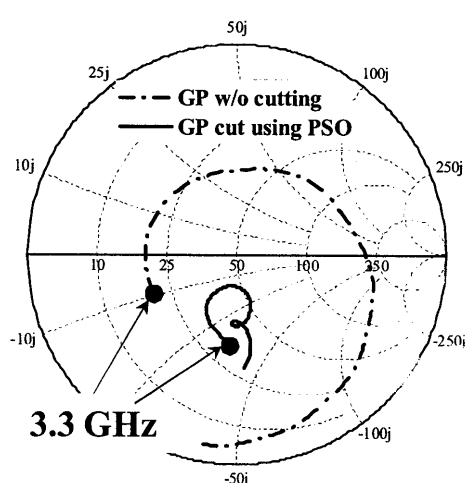
せる事ができたと確認されている。

導体板を削除しない場合と削除した場合の VSWR 特性を図 9 に示す。図 9 より、PSO を用いた場合の最適形状は、 $VSWR \leq 3$ となる帯域が導体板を削除しない場合より約 1200 MHz、PSO を用いない場合より約 620 MHz 広がったことが分かる。また、PSO を用いた場合の最適形状の場合、実験値と計算値による広帯域特性の同様の傾向が見られる。実験値では、 $VSWR \leq 3$ となる周波数帯が、計算値より低周波側へ約 200 MHz ずれているが、計算値と同様に 1980 MHz (2.06 GHz~3 GHz と 3.2 GHz~4.24 GHz) の広帯域特性が得られている。WiMAX の使用周波数帯は、計算値でも実験値でも $VSWR \leq 3$ で完全にカバーされている。

図 10 のスミスチャートに 2 GHz~3.1 GHz 及び 3.3 GHz~4.5 GHz における導体板削除前後のインピーダンス特性を示す。両周波数帯において、導体板を最適な削除方法で削除することにより、スミスチャート上の回転半径が小さくなり、リアクタンス成分が低減されると共に、抵抗成分が 50Ω 付近に近づいてくる。特に 3.3 GHz~4.5 GHz 帯では、削除前のインダクタンス成



(a) 2 GHz~3.1 GHz



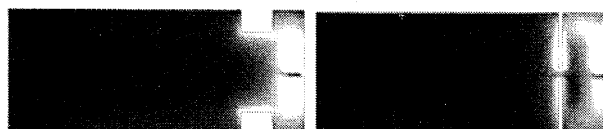
(b) 3.3 GHz~4.5 GHz

図 10 スミスチャート

Unit : A/m
0 2 4 6 8 10



(a) 2.45 GHz



(b) 2.91 GHz



(c) 3.7 GHz

図 11 電流分布特性

— E_{θ} (GP cut w/o using PSO) — E_{θ} (GP cut using PSO)
 - - - E_{ϕ} (GP cut w/o using PSO) - - - E_{ϕ} (GP cut using PSO)

[Unit: dBi]

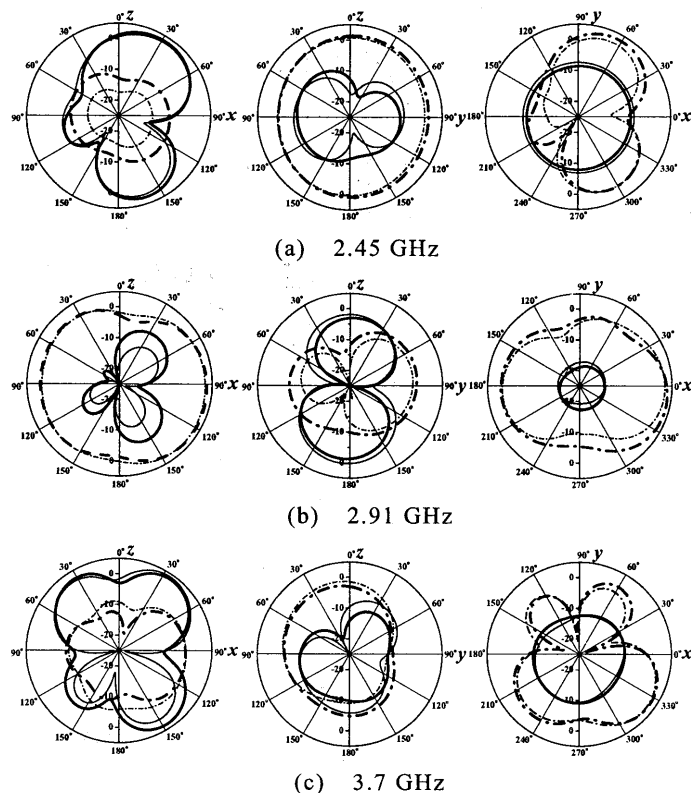


図 12 放射特性

分が削除後に完全にキャパシタンス成分へ変換され、スミスチャート上の回転半径が非常に小さくなったことが、広帯域特性の要因だと分かる。

4.1. 電流分布特性

図 11 に PSO を用いない場合と PSO を用いた場合の最適形状の 3 周波数における導体板上の電流分布を示す。いずれの場合も給電点付近の電流が強く励起していることが確認される。導体板を削除したことで、削除付近の電流が大きくなるが、PSO を用いた場合の最適形状の場合、この電流が更に大きくなる。また、2.45 GHz と 2.91 GHz では、電流が導体板両側の削除付近に均等に分布しているが、3.7 GHz では給電側の電流が反対側より強く流れている。しかしながら、削除付近に電流が増加してもアンテナ素子直下の導体板部分以外では電流が弱く、PSO を用いた場合でも PSO を用いない場合と殆ど変わらないことが分かる。

4.2. 放射特性

図 12 に PSO を用いない場合と PSO を用いた場合の最適形状の 3 周波数における放射特性を示す。文献[3]では、導体板の削除がアンテナの放射特性に大きく影響しないことが確認された。今回 PSO を用い導体板を削除した場合、2.91 GHz と 3.7 GHz では xz 面の E_{θ} 成分が PSO を用いない場合より多少上昇したが、全体

的に 3 周波数共に放射特性が大きく変わらないことが確認される。

5. まとめ

本報告では、USB ドングルでの使用を想定した WiMAX 用 U 字型折返しダイポールアンテナについて粒子群最適化手法 PSO を用いて最適化の検討を行なった。最適化の目的は、WiMAX 使用周波数帯を含める更なる広帯域特性かつ導体板削除面積低減の 2 つである。まず、既に確認されていた導体板削除の有効性に基づき、導体板の削除設計変数の設定を行なった。両目的を同時に実現するため、それぞれの目的に対する目的関数を設け、それらを結合させた多目的関数を設定した。PSO のアルゴリズムを利用し、導体板削除問題へ適用する方法を示した。多目的関数の収束により得られた最適化結果の最適化目的に対する適応性を評価し、目的関数の設定の妥当性を確認した。また、この時の導体板最適形状と PSO を用いず削除した既提案アンテナの場合と比較した結果、PSO を用いた場合、 $VSWR \leq 3$ となる帯域が既提案アンテナより 620 MHz 広くなることが分かった。更に PSO を適用することで、導体板の削除面積が既提案アンテナの約 32% まで低減することが可能となった。

今後、PSO をアンテナ素子に適用し、所望周波数帯に対して最適な形状を得られるように行なっていく予定である。

文 献

- [1] W. S. Chen, and K. Y. Ku, "Band-Rejected Design of the Printed Open Slot Antenna for WLAN/WiMAX Operation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.56, No.4, pp.1163-1169, Apr. 2008.
- [2] S. Seo, S. Hyeon, Y. Yun and S. Choi, "Implementation of Smart Antenna WiBro/WiMAX Radio Access Station," 信学技報 IEICE Technical Report, SR2007-33, Jul. 2007
- [3] 梶谷 篤史, 金 ヨンホ, 森下 久, 小柳 芳雄, "給電部を考慮した携帯端末用 U 字型折返しダイポールアンテナの特性," 信学論(B), Vol. J92-B, No. 3, pp. 567-575, Mar. 2009.
- [4] N. T. Hung, S. Watanabe and H. Morishita, "Fundamental study on U-shaped folded dipole antenna for WiMAX," Proceedings of the 5th EuCAP, pp.1397-1400, Apr. 2011.
- [5] G. Venter, and J. S. Sobieski, "Particle Swarm Optimization," AIAA JOURNAL, Vol. 41, No. 8, pp. 1583-1589, Aug. 2003.
- [6] 泉井 一浩, 西脇 眞二, 吉村 允孝, 中村 真彦, J. E. Renaud, "Particle Swarm Optimization と SLP のハイブリッド化による機械システムの多目的最適化", 日本機械学会論文集(C), Vol.75, No.752, pp. 1161-1170, Apr. 2009.
- [7] ゲン・トゥワン・ハン, 森下 久, 泉井 一浩, 西脇 眞二, "PSO を用いた U 字型折返しダイポールアンテナの形状最適化," 2011 信学会総大会, B-1-74, Mar. 2011.