

# チューナブルアンテナのための通信感度調整制御

山根 丈史<sup>1</sup> 高橋 健一<sup>1,a)</sup> 川村 尚生<sup>1</sup> 菅原 一孔<sup>1</sup>

受付日 2012年4月2日, 採録日 2012年10月10日

**概要:** モバイル通信端末の小型化にともない, アンテナの小型化が求められている. 一方で新たな通信規格への対応やスマートフォンを代表とする多機能化により, 幅広い周波数帯で利用可能なアンテナが必要とされている. そこで, 広帯域で高感度化することが可能なチューナブルアンテナが開発された. チューナブルアンテナでは, アンテナの長さを電氣的に切り替えることで, 感度良く通信可能な周波数を変化させることができる. これにより, 幅広い周波数帯域で感度良く通信することを可能としている. そこで, 本稿ではチューナブルアンテナを用いてつねに効率的な通信を行うための感度調整制御手法を提案する. 本提案手法では黄金分割探索法を利用した極値探索による効率的な感度調整を実現する. しかし, 黄金分割探索法だけでは測定誤差による極値探索の失敗が発生する. そこで, 測定誤差が発生したとしても極値探索が成功する範囲の特定を行う. このことで, 極値探索の失敗を防ぎつつ, 感度調整することを可能とする. また, 周波数の変動や外乱の影響により, チューナブルアンテナの感度は変化する. そこで, あらかじめ観測した予測データを利用することで, 周波数の変動や外乱による感度の変化に効率的に対応する仕組みを実現する.

**キーワード:** チューナブルアンテナ, モバイル通信, 通信感度調整, 黄金分割探索法

## A Method to Adjust the Sensitivity of Tunable Antenna

TAKESHI YAMANE<sup>1</sup> KENICHI TAKAHASHI<sup>1,a)</sup> TAKAO KAWAMURA<sup>1</sup> KAZUNORI SUGAHARA<sup>1</sup>

Received: April 2, 2012, Accepted: October 10, 2012

**Abstract:** New wireless communication standards and multifunctionality such as smartphones demand the development of an antenna that can cover wide band frequency but keeping smaller size. As an antenna equipped with their features, tunable antennas have been developed. The tunable antennas enable us to change its frequency characteristic by an electrical signal. In this paper, we propose a method to adjust the electrical signal of tunable antennas for keeping maximum sensitivity. We use the golden section search as a fundamental technique to adjust the sensitivity of a tunable antenna. It, however, fails the search because of measurement errors. Therefore, we first determine the range of that the golden section search succeeds, and then, apply the golden section search on. This will prevent the failure of the search. Further, we use prediction data to follow in the change of the sensitivity of a tunable antenna caused by frequency changes and/or environmental disturbances.

**Keywords:** tunable antennas, mobile communication, automatic sensitivity control, golden section search

### 1. はじめに

近年, 携帯電話の性能向上により, 電話やメールだけでなく Web サイトの閲覧なども可能となった. しかし, これ

により, 通信量が大幅に増え, それにともなうバッテリーの持続時間の低下が問題となってきた. 一般的に携帯電話などのバッテリーの持続時間は, 通信を行わなければ連続待受時間が数百時間と長い. しかし, 頻繁に通信を行えば, バッテリーの持続時間は一気に数時間程度にまで減少する. また, 電波強度が弱い場所では, 通信エラーや感度の低下により, より多くの電力を消費し持続時間が減少する [1]. また, 近年, サービスが開始された新たな携帯電話の通

<sup>1</sup> 鳥取大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Tottori University, Tottori  
680-8552, Japan

<sup>a)</sup> takahashi@ike.tottori-u.ac.jp

信規格である LTE (Long Term Evolution) [2], [3] や、従来の通信規格である GSM, W-CDMA など電波混在を防止するため、それぞれの通信規格で異なる周波数帯が利用される。さらに、通信事業者ごとでも利用周波数帯が異なる。このため、複数の事業者、通信規格で利用できるように、幅広い周波数帯で利用可能なアンテナが求められている。

アンテナは一般的に長さに応じた周波数で動作する。このため、ある長さのアンテナは特定の周波数では感度良く通信できるが、それ以外の周波数では感度が悪化し効率が低下する。一方でモバイル通信端末の小型化にともないアンテナの小型化が求められている。アンテナの小型化により受信感度の良い動作帯域が狭くなり感度が低下する。このため、従来のアンテナでは広帯域を高感度で通信することが難しい。そこで、これらの問題を解消するために、広帯域で高感度化することが可能なチューナブルアンテナ [4], [5] が開発された。チューナブルアンテナでは、アンテナの長さを電氣的に切り替えることで、感度良く通信可能な周波数を変化させることができる。これにより、幅広い周波数帯域で感度良く通信することを可能とし、信号の増幅に必要な消費電力削減効果が期待できる。

チューナブルアンテナは現在、主に携帯電話のワンセグ放送用の内蔵アンテナとして利用されている。ワンセグ放送をはじめとする地上デジタル放送は、470~770 MHz と非常に幅広い周波数帯を利用する。ワンセグ放送ではチャンネルごとに利用する周波数が決まっている。このため、ワンセグでは、チャンネルと 1 対 1 に対応した電気信号に切り替えるだけである程度の感度調整を行うことができる [6]。しかし、携帯電話による通話やデータ通信に使われる周波数は基地局によって割り当てられる。アンテナの特性は外乱の影響によっても変化する。このため、ワンセグで利用されているような単純な制御で感度調整することはできない。また、携帯電話での通信に利用される FDD 方式では送信と受信で利用される周波数が異なる [7]。さらに現時点では LTE や GSM などが混在している状況であり、それらの切替え時に周波数帯の変更が生じる。携帯電話の多機能化への対応のためにも多周波数化が要求されている [8]。このため、チューナブルアンテナを用いてつねに効率的な通信を行うための感度調整制御手法が必要となる。

そこで、本稿では周波数変化や外乱の影響による変化に対応し最適な感度に調整するための手法を提案する。本提案手法では黄金分割探索法 [9] を利用した極値探索による効率的な感度調整を実現する。しかし、黄金分割探索法だけでは測定誤差による極値探索の失敗が発生する。そこで、極値探索の前に、測定誤差が発生したとしても極値探索が成功する範囲の特定を行う。このことで、極値探索の失敗を防ぎつつ、感度調整することを可能とする。また、

周波数の変動や外乱の影響により、チューナブルアンテナの感度は変化する。そこで、あらかじめ観測した予測データを利用することで、周波数の変動や外乱による感度の変化に効率的に対応する仕組みを実現する。

以下、2 章で関連研究について述べ、3 章でチューナブルアンテナについて述べる。4 章で提案手法について述べ、その評価を 5 章で行う。最後に 6 章でまとめとする。

## 2. 関連研究

Sun ら [10] はアンテナのインピーダンスを変化させることで広帯域の周波数に対応可能な仕組みを実現している。しかし、広帯域に対応するために消費電力が大きく必要となるといった問題がある。そこで消費電力を抑えつつ広帯域に対応可能な仕組みとしてチューナブルアンテナ [5], [11] が開発されている。西尾ら [5] は MEMS 可変容量素子を利用することで電力消費を抑えつつチューナブルアンテナを広帯域・高感度化することを提案している。また、大場ら [11] は地上デジタル放送向けに開発されたループ型周波数チューナブルアンテナの小型化を検討している。これらの研究ではチューナブルアンテナ自体の構成方法を検討しており、周波数変化や外乱に対応してどのようにアンテナの特性を切り替えるかについては検討していない。

Huang ら [12] は携帯電話のマルチバンド化に対応することを目的にチューニング回路の構成方法について提案し、2 つの周波数帯に適用した場合の結果について報告している。Firrao ら [13] は手や頭、テーブルといった外乱によるアンテナのインピーダンス変動に自動的に対応するための仕組みを提案し、900 MHz 帯での有効性を確認している。Boireau ら [15] は複数の通信方式でアンテナを共有することを試みている。Razavi [14] は、黄金分割探索法に基づいてアンテナの傾きを変化させていくことで、アンテナの効率を高める手法を提案している。これらはアンテナの感度を改善するが、感度良く通信可能な周波数に調整するものではない。また、チューナブルアンテナを対象としたものでもない。

チューナブルアンテナの感度調整制御方法としては文献 [16], [17], [18] が提案されている。Mckinzie ら [16] は、周波数とインピーダンスを対応付けたルックアップテーブルを持ち、それを利用することで周波数の変化に対応する仕組みを提案している。文献 [17] では、チューナブルアンテナの感度を調整するための方法として、受信信号から計算された信号対干渉雑音比 (SINR) や受信信号強度インジケータ (RSSI) などに従ってアンテナの長さを調整することが提案されている。しかし、その具体的な調整制御手法については書かれておらず、また外乱による影響も考慮に入れていない。

文献 [18] では外乱の影響による受信感度の変化に対処するための手法として、外乱の影響で変化する可能性のある

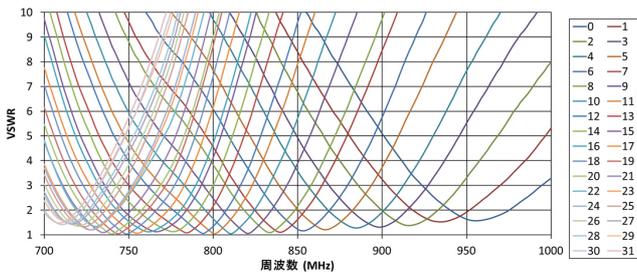


図 1 チューナブルアンテナの特性

Fig. 1 Characteristics of a tunable antenna.

範囲をあらかじめ設定し、その範囲のみを探索することで受信感度の調整を高速化することが提案されている。しかし、外乱の影響で変化しうる可能性のある範囲をどのように設定するかについては示されておらず、周波数変化時の再調整についても考慮されていない。

### 3. チューナブルアンテナ

チューナブルアンテナの方式はいくつか存在し、バリコンコンデンサを用いたラジオなどもチューナブルアンテナと呼べるが、ここでは可変容量素子を用いた方式をチューナブルアンテナと呼ぶ。可変容量素子を用いたチューナブルアンテナでは、可変容量素子の容量値（以下、ロジックと呼ぶ）を変化させることで、アンテナの長さを電気的に変化させることができる。アンテナの長さが増えることで高感度に受信できる動作周波数が変化する。すなわち、ロジックを制御し最適な感度で通信することにより、通信エラーの改善や信号の増幅に必要な消費電力削減が期待できる。

一般的にアンテナの効率<sup>1</sup>は VSWR（定在波比：Voltage Standing Wave Ratio）により表すことができる。VSWR は 1 から ∞ の値をとる。1 だと反射波がない状態であり、最大電力を供給できるため感度が高い。一般的なアンテナの VSWR は λ/4 モードの共振特性が、周波数を横軸にとった場合に単峰性のグラフとなる。チューナブルアンテナではロジックを変化させることで図 1 のようにアンテナの動作周波数を変化させることができる [5], [11]。図 1 からロジックごとに最も感度が良くなる周波数が異なることが分かる。しかし、一般的にアンテナの感度は周囲の環境にも左右される。たとえば、気温の変化や人体の接近などの外乱によって感度が変化する [19]。外乱によるチューナブルアンテナの特性の変化を図 2 に示す<sup>\*1</sup>。このように、同じ周波数であっても、外乱の影響によって、最も感度良く通信できる最適なロジックが異なる。このため、周囲の環境が頻繁に変化する携帯端末での利用を考えると、ロジックと周波数を一意に対応付けることができない。そ

<sup>\*1</sup> ここでは VSWR ではなくアンテナからの反射電力を電圧に変換した値を検出している。VSWR が小さいほど反射電力が少なくなるため、検出電圧が小さいほど感度が高いことを示す。

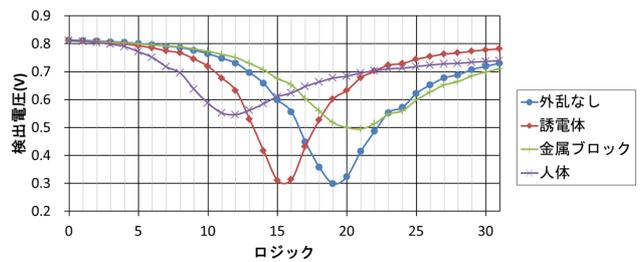


図 2 外乱による最適なロジックの変化

Fig. 2 Change of a suitable logic based on noises.

ここで、最適なロジックに調整し、つねに効率的な通信を行うための制御手法が必要となる。

チューナブルアンテナの特性は図 1 や図 2 に示されているように単峰性のグラフとなる。このため、単峰性のグラフの頂点（以後、ピークと呼ぶ）を求めることで、最適なロジックを求めることができる。また、チューナブルアンテナの仕様上、ピーク探索に用いることができる情報は、どのロジックを選択したかという情報と、そのときの反射電力（検出電圧）のみである。各ロジックのそのときどきの反射電力は、そのロジックへ切り替えて測定してみるまで分からない。アンテナのロジック切替えや反射電力の測定といったハードウェア制御を含む処理は単純な信号処理に比べて電力を消費する。このため、携帯端末のようなバッテリー容量が制限される制御下では少ないロジックの切替えでピークを探索する手法が求められている。そこで、本稿では周波数の変更や外乱によって変化する最適なロジックを、少ないロジックの切替え回数で探索するための手法を提案する。

### 4. 最適なロジックの探索

チューナブルアンテナの特性は単峰性のグラフとなる。そのため、最適なロジックの探索には、最も効率的な極値探索手法の 1 つである黄金分割探索法 [9] を用いる。黄金分割探索法では、2 点の大小関係を比較し、探索範囲を狭めていくことで極値を探索する。しかし、チューナブルアンテナの検出電圧はピークから離れるほど平衡状態に近くなり、測定誤差により大小関係が逆転することがある。この結果、極値探索が失敗し、誤ったロジックをピークとして検出してしまふ。このため、極値探索の前に、測定誤差が発生したとしても黄金分割探索法による極値探索が成功する範囲を特定することが必要となる。

また、周波数の変更や外乱の影響によりピークが変動した場合、ピークロジックの再探索を行う必要がある。ピークの変動は検出電圧の変化で知ることができる。このとき、変化前と変化後の検出電圧の差からピークロジックが存在する範囲をある程度予測することができる。例を図 3 に示す。検出電圧の差が小さい場合には、現在のロジック周辺にピークロジックが存在すると予測できる。検出電圧の差

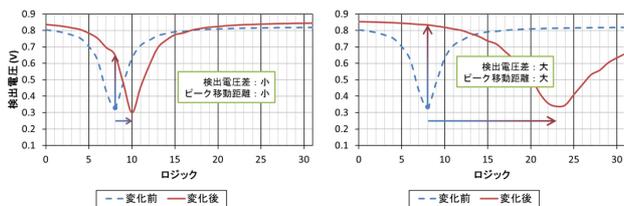


図 3 検出電圧の差によるピークロジックの変化

Fig. 3 Change of a peak logic according to the difference of voltages detected.

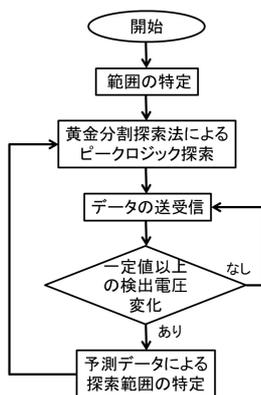


図 4 提案手法のフローチャート

Fig. 4 The flow chart of our proposed method.

が大きい場合には、現在のロジックから離れたロジックにピークロジックが存在すると予測できる。そこで、検出電圧の差からピークロジックが存在する範囲を予測し、その範囲だけをピーク探索の対象とすることにより、ロジック切替え回数を削減する。

本提案手法のフローチャートを図 4 に示す。まず、黄金分割探索法による極値探索が成功する範囲の特定を行う。次に黄金分割探索法によるピークロジック探索により、特定した範囲内で最適な通信感度を持つロジックを見つける。その後、一定値以上の検出電圧の変化が検出されるまで、その最適な通信感度を持つロジックでデータを送受信する。一定値以上の検出電圧の変化が検出されると、予測データによる探索範囲の特定を行い、その範囲を対象にピークロジック探索を行うことで周波数の変更や外乱による変化に対応する。

以降、4.1 節で黄金分割法による極値探索が成功する範囲の特定方法について述べ、4.2 節で黄金分割探索法によるピークロジック探索について述べる。4.3 節では、4.1 節の範囲の特定で測定されたロジックを 4.2 節のピークロジック探索で再利用するための工夫について述べる。最後に、4.4 節で予測データを用いた探索範囲の特定方法について述べる。

#### 4.1 ピークロジックが存在する範囲の特定

極値探索手法だけでは、測定誤差による大小関係の逆転により、ピークロジックの検出が失敗する可能性がある。

そこで、事前にチューナブルアンテナの特性を測定し、測定誤差が発生したとしても検出電圧の大小関係が逆転しない範囲を求める必要がある。

一般的にアンテナの特性は  $\lambda/4$  モードの共振特性が単峰性のグラフとなり、ピークロジックから離れるほど平衡状態に近くなる。すなわち、アンテナの特性グラフの平衡部では測定誤差による検出電圧の大小関係逆転が起りやすく、逆に凸部では大小関係の逆転が起りにくい。そこで、各ロジックについて様々な周波数と外乱発生時について検出電圧を測定し、どれくらいの測定誤差が発生する可能性があるのかをあらかじめ調査する。隣り合ったロジックの検出電圧の差が測定誤差以上であれば測定誤差により大小関係が逆転しない。このため、隣り合ったロジックの検出電圧の差が測定誤差以上となるロジックの範囲を周波数や外乱ごとに求める。この範囲の広がり大きさ（範囲幅）ごとに離れたロジックの反射電力を測定していくことで、グラフの平衡部分ではなく、凸部に含まれるロジックを必ず測定することができる。

また、ピークロジック探索時には周波数や外乱に対する仮定をおくことができず、様々な周波数や外乱を想定したピークロジック探索を行う必要がある。すなわち、どのような周波数や外乱であっても大小関係が逆転しないような値を範囲幅として求める必要がある。そこで、様々な周波数や外乱発生時について求められた範囲幅の中から最小となるものを  $a_0$  とおく。  $a_0$  ほどのロジックに対する反射電力を測定していくことで、すべての周波数や外乱に対してグラフの平衡部分ではなく、凸部に含まれるロジックを必ず測定することができる。ただし、グラフの端にピークが存在する可能性を考慮して、グラフの端からは  $\frac{a_0}{2}$  以下 ( $= a_1$ ) だけ離れたロジックを測定する必要がある。凸部に含まれるロジックの周辺を極値探索の対象範囲とすることで、測定誤差による極値探索の失敗を防ぐことができる。

#### 4.2 黄金分割探索法によるピークロジック探索

黄金分割探索法は凸関数  $f(x)$  の極値を求めるときに用いられるアルゴリズムである。黄金分割探索法では、黄金比を使い探索範囲  $[0, x_3]$  を  $1 : \phi$ ,  $\phi : 1$  ( $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ ) に分割する点  $x_1 (= 0.382 \times x_3)$ ,  $x_2 (= 0.618 \times x_3)$  を求める。  $x_1$  と  $x_2$  の値を比べ、  $f(x)$  が下に凸な関数なら値が大きい方、上に凸な関数なら値が小さい方の外側の範囲 ( $x_1$  なら  $[0, x_1]$ ,  $x_2$  なら  $[x_2, x_3]$ ) を探索範囲から除く。この結果、  $[0, x_2]$ , または  $[x_1, x_3]$  が次の探索範囲となり、同様の処理を再帰的に繰り返すことで極値を見つける。黄金分割探索法では、探索範囲の分割を黄金比によって再帰的に行うため、前回の繰返し時に用いた値を再利用することができる。たとえば、  $[0, x_2]$  が次の探索範囲となった場合、  $x_1$  が  $[0, x_2]$  を  $\phi : 1$  で分割した点となっているため、  $x_1$  を再利用することができる。このため、繰返し時に 1 点の値を

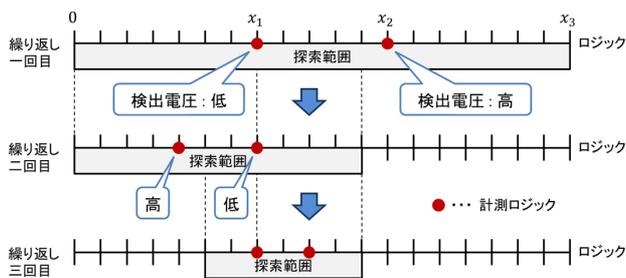


図 5 黄金分割探索法によるピークロジックの探索イメージ

Fig. 5 The overview of the peak logic search based on the golden section search.

求めるだけで探索範囲を  $\frac{2}{1+\sqrt{5}}$  にすることができる。

4.1 節で求めた範囲を黄金分割探索法で極値探索することでピークロジックを見つける。黄金分割探索法によるピークロジックの探索イメージを図 5 に示す。一般的な黄金分割探索法では連続値を扱うため、値が大きい方の点(ロジック)も含めて次の探索範囲とする必要がある。しかし、本研究で対象とするチューナブルアンテナでは、離散的なロジックの中から極値となるロジックを見つけることを目的としている。このため、検出電圧の大きい方のロジックを探索範囲から除くことができる。これにより、繰返しごとに探索範囲を 1 ロジック分少なくすることができ、効率的に探索を行うことができる。

### 4.3 探索範囲の特定時に測定したロジックのピークロジック探索での再利用

測定誤差によるピーク検出の失敗を防ぐために、極値探索を行う対象範囲を定めた後で黄金分割探索法によるピークロジック探索を行う。そこで、極値探索を行う対象範囲の特定で測定したロジックを黄金分割探索法で再利用することを考える。

範囲  $[0, b_3]$  を黄金分割探索法で探索する場合に測定するロジックを  $b_1 (= 0.382 \times b_3)$ ,  $b_2 (= 0.618 \times b_3)$  とする。このとき、対象範囲の特定で測定したロジックを、 $b_1$  または  $b_2$  に対応するロジックとすることで黄金分割探索法で再利用することができる。そこで、範囲  $[0, b_2]$  の範囲幅を測定誤差による極値探索が失敗しない範囲幅  $a_0$  とする。また、範囲  $[0, 0.854 \times b_3 (= 2 \times b_2 - b_1)]$  を探索することを考えると、 $b_2 - b_1$  と  $b_2$  となるロジックも黄金分割探索法の繰返し時に再利用できるロジックとなる\*2。そこで、 $a_1 = b_2 - b_1$ ,  $a_2 = b_1$  とおく。たとえば、 $a_0 = 24$  のとき、 $a_1 = 9$ ,  $a_2 = 15$  となる。

ここで対象範囲特定時に測定したロジックの再利用を考慮したピークロジック探索の仕組みを、探索範囲を  $[x_0, x_6]$  と仮定して説明する。このとき、まず、 $x_0$  から  $a_1$  先のロ

\*2 探索範囲を  $[0, 2 \times b_2 - b_1]$  としたときに  $b_2 - b_1$ ,  $b_2$  が黄金分割探索法の繰返し時に再利用できる理由については付録 A.1 に示す。

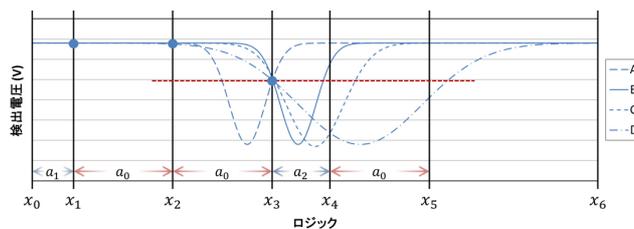


図 6  $x_2 > x_3$  時に想定されるグラフ

Fig. 6 Probable graph patterns when  $x_2 > x_3$ .

ジック  $x_1$  と、さらに  $a_0$  先のロジック  $x_2$  に対する反射電力を測定する。 $x_1$  に対する反射電力が  $x_2$  に対する反射電力より小さければ、有効探索範囲は  $[x_0, x_2]$  と特定できる。このとき、範囲  $[x_0, x_2]$  のロジック数は  $a_1 + a_0 = (b_2 - b_1) + b_2 = (0.618 \times b_3 - 0.382 \times b_3) + 0.618 \times b_3 = 0.854 \times b_3$  であり、かつ、 $x_1 = x_0 + a_1 = x_0 + (b_2 - b_1)$  となるため、 $x_1$  で測定した反射電力を黄金分割探索法で再利用することができる。

$x_1$  に対する反射電力が  $x_2$  に対する反射電力より小さくなければ、以降、さらに  $a_0$  ずつ離れたロジックの反射電力測定を繰り返す。ここで測定を繰り返しているときに  $x_2$  の  $a_0$  先のロジック  $x_3$  の反射電力が  $x_2$  の反射電力より小さくなったとする。このとき、アンテナの特性は図 6 に示す 4 通りの可能性が考えられる。そこで、 $x_3$  から  $a_2$  先となる  $x_4$  の反射電力を測定する。 $x_4$  が  $x_3$  より大きい場合には、図 6 中の A と B のグラフのどちらかになる可能性しかない。このため、範囲  $[x_2, x_4]$  が極値探索での探索範囲となる。このとき、範囲  $[x_2, x_4]$  のロジック数は  $a_0 + a_2 = b_2 + b_1 = b_3$  であり、かつ、 $x_3 = x_2 + a_0 = x_2 + b_2$  となるため、 $x_3$  で測定した反射電力を黄金分割探索法で再利用することができる。 $x_4$  が  $x_3$  より小さい場合には、図 6 中の C と D のグラフのどちらかになる。このとき、 $x_4$  から  $a_0$  先のロジックを  $x_5$  とすると、範囲  $[x_3, x_5]$  にピークロジックが存在すると予測でき、その範囲を黄金分割探索法により極値探索する。このとき、 $x_4 = x_3 + a_2 = x_3 + b_1$  となり、 $x_4$  を黄金分割探索法で再利用することができる。測定を繰り返し、直前のロジックより反射電力が小さくならずに残りの探索範囲が  $\frac{a_0}{0.618}$  以下になった場合は黄金分割探索法による極値探索失敗が発生しないため、その範囲を対象とした極値探索を行う。

このことで、極値探索を行う対象範囲の特定で測定したロジックを黄金分割探索法で再利用でき、測定するロジックの数を減らすことができる。

### 4.4 ピークロジック再調整のための予測データによる探索範囲の特定

周波数の変更や外乱の影響で検出電圧が変化する。このとき、最適な感度で通信できるようにロジックを再調整する必要がある。ここでピークの変動は検出電圧の変化で検

知される．そこで，現在のロジック  $l_{old}$  に対する変化前と変化後の検出電圧の差により，新たなピークロジック  $l_{new}$  が存在する範囲を予測し，その範囲だけをピーク探索の対象とすることでロジックの切替え回数を削減する．

4.4.1 予測データの作成

$l_{new}$  が存在する範囲を予測するためのデータは，あらかじめ様々な条件下での反射電力を測定し，検出電圧の差の範囲とピークロジックの移動幅の関係をまとめたものとして準備する．予測データは，検出電圧の差の範囲を細かく設定すればするほど，ピークロジックの移動幅を限定することができる．しかし，チューナブルアンテナの制御 IC によって扱えるデータ量が限られる．このため，範囲を設定するための閾値やロジックごとに予測データを準備するか否かによって，予測データ量を調整する必要がある．そこで，本稿では以下の4つの予測データを準備した (図 7)．

- (1) 探索範囲が変化するすべての検出電圧を閾値とし，ロジックごとに別々に準備
- (2) 探索範囲が変化するすべての検出電圧を閾値とし，全ロジックでまとめたものを準備
- (3)  $l_{old}$  が探索範囲に含まれなくなる検出電圧だけを閾値とし，ロジックごとに別々に準備
- (4)  $l_{old}$  が探索範囲に含まれなくなる検出電圧だけを閾値とし，全ロジックでまとめたものを準備

表 1 に予測データの特徴と作成されたデータ量を示す．

4.4.2 予測データによる探索範囲の特定

準備した予測データをもとに，探索範囲を限定しピークロジックの探索を行う．このとき，探索範囲は1つにまとまっている場合と2つに分かれている場合がある．

4.4.2.1 予測範囲が1つの場合

測定ロジックの差が小さく，予測範囲に  $l_{old}$  が含まれる

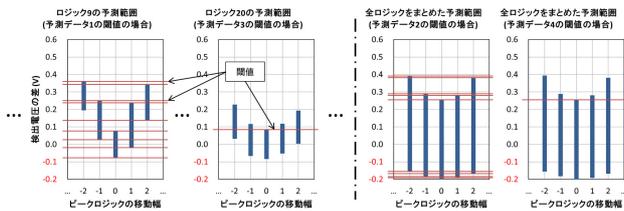


図 7 検出電圧の差とピークロジックの関係

Fig. 7 Correlations between peak logics and the difference of voltages detected.

表 1 予測データ

Table 1 Predictive data.

	閾値	ロジック	データ量
予測データ 1	すべての検出電圧	ロジックごと	49.6 KB
予測データ 2	すべての検出電圧	全ロジックで1つ	1.64 KB
予測データ 3	1つの検出電圧のみ	ロジックごと	1.43 KB
予測データ 4	1つの検出電圧のみ	全ロジックで1つ	0.11 KB

場合，予測範囲が1つとなる．このとき，測定ロジックの差が小さいため  $l_{old}$  はグラフの平衡部分ではなく，凸部に含まれる．また， $l_{old}$  は予測範囲の中央付近に存在する．そこで，予測範囲が1つの場合は，まず， $l_{old}$  より小さいロジック番号 (以降，左と呼ぶ) で予測範囲内にあるロジックの数と大きいロジック番号 (以降，右と呼ぶ) で予測範囲内にあるロジックの数を調べる．ここで，右側のロジック数の方が多かったと仮定する．このとき， $l_{old}$  の右隣のロジック  $l_{right}$  の反射電力を測定する． $l_{right}$  の反射電力が  $l_{old}$  の反射電力より大きければ， $l_{old}$  の左側にピークロジックが存在する． $l_{right}$  の反射電力が  $l_{old}$  の反射電力より小さければ， $l_{right}$  より右側にピークロジックが存在する．これにより，1つのロジックに対する反射電力の測定だけで探索範囲を半分以下に狭めることができる．探索範囲を半分以下に狭めた後は 4.3 節までに定めた方法で，ピークロジックを見つける．また，グラフの凸部で隣り合った2つのロジックの検出電圧が等しくなるのはピークロジックしか考えられない．このため， $l_{right}$  の反射電力が  $l_{old}$  の反射電力と等しければ， $l_{right}$  をピークロジックと判定する．

4.4.2.2 予測範囲が2つの場合

予測範囲が2つに分かれている場合，まず，どちらの範囲にピークロジックが存在するか特定する必要がある．そこで，2つの予測範囲内のロジックを交互に測定しながらピークロジックが存在する側を特定する．測定するロジックは，それぞれの予測範囲を 4.3 節までに定めた方法で  $l_{old}$  に近い方から探索するときに測定するロジックとする．ここで2つの予測範囲のうち， $l_{old}$  の左に存在する範囲を B，右に存在する範囲を C とする．また，それぞれの範囲を探索するときに測定するロジックを， $l_{old}$  に近い方からそれぞれ  $b_1, b_2, b_3, \dots, c_1, c_2, c_3, \dots$  とする (図 8)．

このとき，まず初めに， $b_1$  の反射電力を測定する．測定の結果，

- (1-1)  $b_1$  の反射電力が  $l_{old}$  の反射電力より小さければ，図 8 のグラフ 1-1a または 1-1b になる場合しか考えら

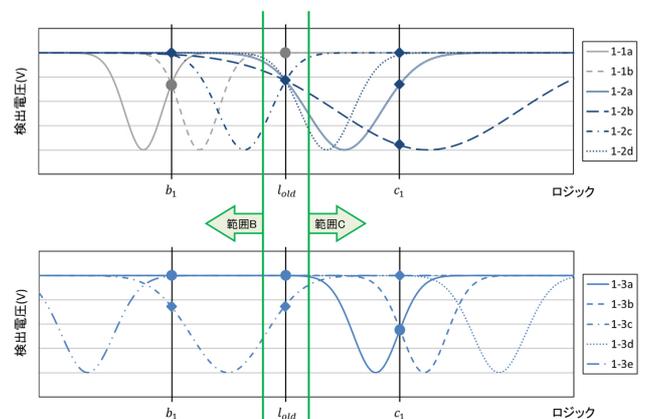


図 8 予測範囲が2つの場合

Fig. 8 Situations where predictive data consists of two area.

れず、範囲 B にピークが存在すると判断できる。

(1-2)  $b_1$  の反射電力が  $l_{old}$  の反射電力より大きければ、図 8 のグラフ 1-2a~1-2d になる場合しか考えられず、そのいずれかになる。

(1-3)  $b_1$  の反射電力が  $l_{old}$  の反射電力と同程度であればグラフ 1-3a~1-3e になる場合しか考えられず、そのいずれかになる。

(1-2), (1-3) であれば次に  $c_1$  の反射電力を測定する。

(1-2) のときに  $c_1$  の反射電力を測定した場合について考えると、

(1-2-1)  $c_1$  の反射電力が  $l_{old}$  より小さいか、同程度であれば、グラフ 1-2a または 1-2b になるため、範囲 C にピークが存在すると判断できる。

(1-2-2)  $c_1$  の反射電力が  $l_{old}$  より大きければ、グラフ 1-2c または 1-2d のいずれかになる。

(1-2-2) の場合、 $l_{old}$  から  $b_1$  と、 $l_{old}$  から  $c_1$  の幅が等しいとは限らない。このため、 $b_1$  と  $c_1$  の大小関係で範囲を特定することはできない。そこで、範囲 B または範囲 C のどちらかの中で最も  $l_{old}$  に近いロジック  $l_{near}$  の反射電力を測定する。このとき、 $l_{near}$  が  $l_{old}$  より小さければ  $l_{near}$  を含む範囲にピークロジックが存在すると判断でき、それ以外の場合は  $l_{near}$  を含まない範囲にピークロジックが存在すると判断できる。

次に (1-3) のときに  $c_1$  の反射電力を測定した場合について考える。このとき、

(1-3-1)  $c_1$  の反射電力が  $l_{old}$  より小さければ、グラフ 1-3a または 1-3b のいずれかになるため、範囲 C にピークが存在すると判断できる。

(1-3-2)  $c_1$  の反射電力が  $l_{old}$  より大きければ、グラフ 1-3c になるため、範囲 B にピークが存在すると判断できる。

(1-3-3)  $c_1$  の反射電力が  $l_{old}$  と同程度であれば、範囲  $[b_1, c_1]$  は平衡状態であると判断でき、ピークロジックは  $c_1$  より右 (グラフ 1-3d) か  $b_1$  より左 (グラフ 1-3e) に存在する。

(1-3-3) の場合、 $l_{old}$  より小さい値が測定されるまで  $b_2, c_2, b_3, c_3, \dots$  と測定を繰り返す。小さい値が測定されると、測定された側がピークロジックを含む範囲と判断できる\*3。ピークロジックを含む範囲を確定できた後は 4.3 節までに定めた方法に従ってピークロジックを見つける。

## 5. 実験

本提案手法を評価するために、実験回路によって取得したデータを用いたシミュレーション実験を行った。チューナブルアンテナとしては図 1 に示した特性を持つ 32 段階

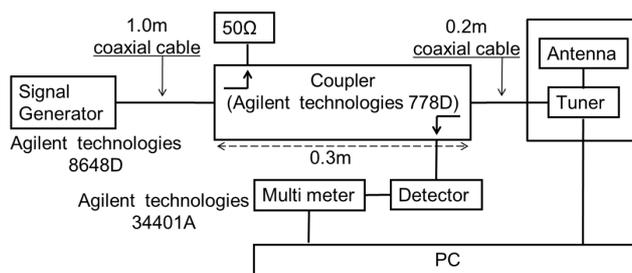


図 9 実験回路

Fig. 9 The experimental circuit.

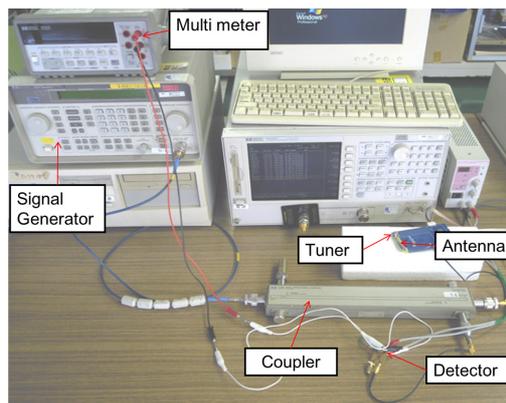


図 10 実験機器

Fig. 10 The experimental equipments.

のロジック切替えにより、700~960 MHz 帯で送受信可能なものを用いた。シミュレーション実験で用いるデータを取得するための実験回路を図 9 に、実験で利用した機器を図 10 に示す。

チューナブルアンテナとカプラ (両端幅 0.3m) を 0.2m の同軸ケーブルで接続し、アンテナからの反射電力をディテクタで電圧に変換、マルチメータでその値を測定する。カプラとシグナルジェネレータは 1.0m の同軸ケーブルで接続されており、シグナルジェネレータから発生された任意の高周波を全長 1.5m の同軸線路を介してアンテナに与えることができる。マルチメータはパソコンに接続され、測定した値をパソコンで取得することができる。ここで取得した値をシミュレーション実験で用いるデータとして利用する。シミュレーション実験で用いるデータとしては、32 段階のそれぞれのロジックに対して、700 MHz から 960 MHz の間から選択した 64 の周波数をシグナルジェネレータからアンテナに与え、外乱なし、人体を 1, 2, 5, 10 cm 近づけた場合の検出電圧を取得した。これらのデータには測定誤差が含まれている可能性がある。そこで、これらのデータから最小二乗法により多項式近似曲線を求め、求めた近似曲線を測定誤差を含まないグラフと見なして、平衡部分の検出電圧にどれくらい測定誤差が発生しているかを推定した。この結果から  $a_0, a_1, a_2$  を求めると、 $a_0 = 24, a_1 = 9, a_2 = 15$  となった。

これらのデータを用いて、初回探索時と再調整時のピーク

\*3  $b_1, c_1$  測定時には範囲 B と範囲 C の両側に平衡状態でない部分を含む可能性があり、このために複雑な場合分けを行っている。しかし、 $b_2, c_2, b_3, c_3, \dots$  の測定時には、どちらか片方の範囲が必ず平衡状態となるため、このような場合分けが必要ない。

ロジック発見までのロジック切替え回数を測定した。ピークロジックを再調整するときの原因としては、周波数変化時と外乱発生時が考えられる。そこで、初回探索時とそれぞれの場合における再調整時のピークロジック発見までのロジック切替え回数を評価した。また、周波数変化と外乱発生によるピークロジックの再調整が発生する割合を変化させ、ピークロジック発見までのロジック切替え回数を評価した。

5.1 周波数変化時

初回探索時と周波数変化時のピークロジック発見までのロジック切替え回数を表 2 に示す。ただし、周波数はランダムに変化するものとした。

実験の結果、初回探索時は 6 回または 7 回のロジック切替え、平均では 6.875 回のロジック切替えでピークロジックを発見することができた。周波数変化による再調整時には、どの予測データを利用して初回探索時よりも良い結果となった。また、予測データのデータ量が多ければ多いほど、ロジック切替え回数を削減できた。反射電力の比較は  $a_0$  以下しか離れていないロジックでしか行われないため、すべての場合においてピークロジックを誤検出することにはなかった。

5.2 外乱発生時

初回探索時と外乱発生時のピークロジック発見までのロジック切替え回数を表 3 に示す。ただし、外乱は人体を 1, 2, 5, 10 cm 近づけた場合の中からランダムに選ぶこととした。

実験の結果、周波数変化時の再調整と同様に、どの予測データを利用して初回探索時より良い結果となった。ま

表 2 ロジック切替え回数 (周波数変化時)

Table 2 A number of logic switches in the case of frequency changed.

	MIN	MAX	AVG	
初回探索時	6	7	6.875	
周波数変化時	予測データ 1	0	8	4.964
	予測データ 2	2	9	6.045
	予測データ 3	1	9	6.348
	予測データ 4	2	9	6.532

表 3 ロジック切替え回数 (外乱発生時)

Table 3 A number of logic switches in the case of noise caused.

	MIN	MAX	AVG	
初回探索時	6	7	6.875	
外乱発生時	予測データ 1	0	6	2.236
	予測データ 2	0	6	3.965
	予測データ 3	1	8	3.026
	予測データ 4	2	8	5.029

た、周波数変化時よりもロジック切替え回数が少なかった。これは、外乱発生によるピークロジックの移動幅が周波数変化による移動幅よりも小さいためだと考える。予測範囲にグラフの平衡部分が含まれると予測範囲が広くなり、ピークロジック発見までのロジック切替え回数が多くなる。しかし、外乱発生による変動では、ピークロジックの移動幅が小さく、予測範囲にグラフの平衡部分が含まれることが少ない。この結果、周波数変化時よりもロジック切替え回数が減少している。また、予測データ 2 と予測データ 3 で平均ロジック切替え回数が逆転している。このことから、外乱発生によるピークロジックの再調整が多い場合には、予測データ 2 よりも予測データ 3 を利用した方が効率的であることが分かる。

5.3 周波数変化と外乱発生の発生割合変化時

ピークロジックの変化は周波数変化時と外乱発生時に起こる。そこで、両者の発生割合を変化させ、再調整時のロジック切替え回数を調査した。周波数はランダムに変化するものとし、外乱は人体を 1, 2, 5, 10 cm 近づけた場合の中からランダムに選ばれるものとする。実験結果を図 11 に示す。

実験結果より、周波数変化の発生に比べて外乱発生の割合が多ければ多いほど、平均ロジック切替え回数が減少することが分かる。また、周波数変化と外乱発生の割合が 8:2 であれば予測データ 3 より予測データ 2 を用いた場合の方が少ないロジック切替え回数でピークロジックを見つけられるが、7:3 の場合には逆転し予測データ 3 を用いた場合の方がピークロジック発見までのロジック切替え回数が少なくなっている。携帯電話などのモバイル端末での利用を考えると、基地局の変更による周波数変化よりも、外乱発生の頻度の方が高いと考えられる。このため、検出電圧の差とピークロジックの関係を全ロジックでまとめたものから閾値を細かく設定するよりも、ロジックごとに分けたものから閾値を大まかに設定する方が効率の良い予測データとなることが分かる。

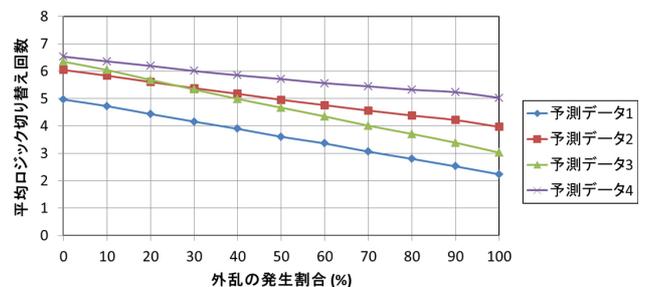


図 11 周波数変化と外乱発生の発生割合の違いによるロジック切替え回数の変化

Fig. 11 A number of logic switches in difference of occurrence rates between frequency changed and noise caused.

## 6. まとめ

本稿ではチューナブルアンテナのための感度調整制御手法を提案した。本提案手法ではチューナブルアンテナの特性を考慮することで測定誤差による極値探索の失敗を防ぎつつ、効率的なピークロジック探索を実現した。また、探索範囲を予測するためのデータを準備することで、極値探索だけを利用した場合に比べ、大幅にロジック切替え回数を削減することができた。ピークロジック探索までのロジック切替え回数を削減することで感度調整にかかる時間を短縮し、また、きめ細かな感度調整により送受信信号の増幅に必要な消費電力を削減する効果が期待できる。今後の課題として電力消費量削減効果や最適なロジックに切り替えるまでの時間を確かめることがあげられる。

**謝辞** アンテナの VSWR や反射電力の測定にご協力いただきました日立金属株式会社鳥取工場の皆様と、調査・実験に協力していただいた鳥取大学の綿谷君に謹んで感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 千葉耕司, 村田 充, 岡田 隆: 携帯電話キーデバイスの開発と最新動向, シーエムシー出版 (2007).
- [2] 蓬田宏樹, 竹居智久: LTE で始まるハードな戦い 次世代端末プラットフォームを奪え, 日経エレクトロニクス 2010 年 9 月 6 日号, pp.25-47 (2010).
- [3] 3GPP: LTE, 3GPP (オンライン), 入手先 (<http://www.3gpp.org/article/lte>) (参照 2012-03-22).
- [4] Mak, A.C.K., Rowell, C.R. and Murch, R.D.: Reconfigurable Multiband Antenna Designs for Wireless Communication Devices, *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, Vol.55, No.7, pp.1919-1928 (2007).
- [5] 西尾真貴, 堤由佳子, 尾林秀一: 高効率な内蔵アンテナを実現するチューナブルアンテナ技術, 東芝レビュー, Vol.66, No.4, pp.16-19 (2011).
- [6] 佐多正博: 5. ワンセグサービスマ受信端末, 映像情報メディア学会誌, Vol.60, No.2, pp.134-137 (2006).
- [7] 小岩正明, 井上文義, 岡田 隆: マルチバンド移動端末の開発, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol.14, No.2, pp.31-37 (2006).
- [8] 南日俊彦: 進化する第 3 世代携帯電話への取り組み, 東芝レビュー, Vol.60, No.9, pp.2-7 (2006).
- [9] Kiefer, J.: Sequential minimax search for a maximum, *Proc. American Mathematical Society*, Vol.4, No.3, pp.502-506 (1953).
- [10] Sun, Y. and Fidler, J.K.: High-Speed Automatic Antenna Tuning Units, *Proc. 9th International Conference on Antennas and Propagation*, pp.218-222 (1995).
- [11] 大場 功, 鈴木裕道, 峯邑隆司, 天野 隆: 携帯端末向け地上デジタル放送用 T 型アンテナの一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, アンテナ・伝播 105(262), pp.85-90 (2005).
- [12] Huang, L., Schroeder, W.L. and Russer, P.: Theoretical and Experimental Investigation of Adaptive Antenna Impedance Matching for Multiband Mobile Phone Applications, *Proc. Wideband and Multi-band Antennas and Arrays*, pp.13-17 (2005).
- [13] Firrao, E.L., Annema, A.J. and Nauta, B.: An Auto-

matic Antenna Tuning System Using Only RF Signal Amplitudes, *IEEE Trans. Circuits and Systems II: Exp. Briefs*, Vol.55, No.9, pp.833-837 (2008).

- [14] Razavi, R.: Self-Optimisation of Antenna Beam Tilting in LTE Networks, *Proc. Vehicular Technology Conference*, pp.1-5 (2012).
- [15] Boireau, O., Townsend, K., Koplemanet, A., et al.: Antenna sharing techniques, US Patent. 7873385 (2011/1/18).
- [16] Mckinzie, W.E., Mendolia, G. and Manssen, K.: Adaptively Tunable Antennas Incorporating an External Probe to Monitor Radiated Power, US Patent. 8125399 (2012/2/28).
- [17] クアアルコム・インコーポレイテッド: 無線機器の適応チューナブルアンテナ, 特開 2011-517519 (2011/06/09).
- [18] 日立電線株式会社: 受信装置, 公開 2011-139202 (2011/07/14).
- [19] 佐藤和夫, 西川訓利, 鈴木徳祥, 小川 明: 人体近傍に置かれた携帯無線機用アンテナの特性解析, 電子情報通信学会論文誌, Vol.79, No.11, pp.892-900 (1996).

## 付 録

### A.1 $[0, 2 \times b_2 - b_1], b_2 - b_1, b_2$ とした理由

黄金分割探索法による探索範囲を  $[0, b_3]$  とする (図 A.1). このとき, 範囲  $[0, b_3]$  を黄金比で分割した点は,

$$b_1 = \frac{1}{1 + \phi} \times b_3$$

$$b_2 = \frac{\phi}{1 + \phi} \times b_3$$

となる. ここで, 繰返し時の範囲  $[0, b_2]$  が探索範囲となつたとすると, 範囲  $[0, b_2]$  を黄金比で分割した点は,  $b_1$  と

$$b_4 = \frac{\phi}{1 + \phi} \times \frac{1}{1 + \phi} \times b_3$$

となる. そこで繰返し時に点  $b_1$  または  $b_2$  を再利用するのではなく,  $b_2$  または  $b_4$  を再利用することを考える. 点  $b_4$  は範囲  $[0, b_2]$  を黄金比で分割した点となっているので, 範囲  $[0, b_2]$  が繰返し時の探索範囲であれば再利用可能なのは明らかである. 次に点  $b_2$  の再利用を考える. 点  $b_2$  を再利用するためには範囲  $[b_4, X]$  を黄金比で分割した点が  $b_2$  となる必要がある. 点  $X$  は,

$$b_4 + |[b_4, X]| \times \left( \frac{\phi}{1 + \phi} \right) = b_2$$

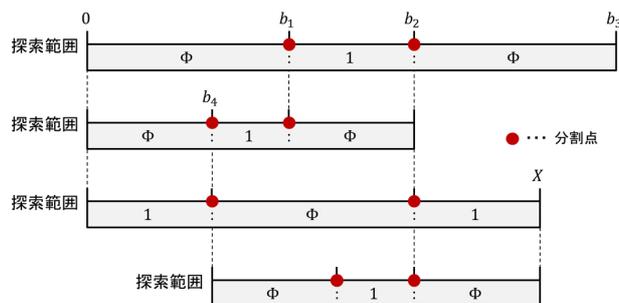


図 A.1 黄金比での分割点

Fig. A.1 Points divided by golden ratio.

$$|[b_4, X]| = X - b_4$$

となることから,

$$b_4 + (X - b_4) \times \left( \frac{\phi}{1 + \phi} \right) = \frac{\phi}{1 + \phi} \times b_3$$

となり, これを解くと,

$$X = \frac{\phi \times (2 + \phi)}{(1 + \phi)^2} \times b_3$$

が得られる. 黄金比の性質,  $\phi^2 = \phi + 1$ ,  $\frac{1}{\phi} = \phi - 1$  を利用し, 式を展開すると,

$$\begin{aligned} X &= \frac{\phi \times (2 + \phi)}{(1 + \phi)^2} \times b_3 = \frac{2 + \phi}{(1 + \phi) \times \phi} \times b_3 \\ &= \frac{\frac{2}{\phi} + 1}{1 + \phi} \times b_3 = \frac{2 \times \phi - 1}{1 + \phi} \times b_3 \\ &= 2 \times \frac{\phi}{1 + \phi} \times b_3 - \frac{1}{1 + \phi} \times b_3 = 2 \times b_2 - b_1 \end{aligned}$$

となる. また,

$$\begin{aligned} b_4 &= \frac{\phi}{1 + \phi} \times \frac{1}{1 + \phi} \times b_3 \\ &= \frac{\phi \times (2 + \phi)}{(1 + \phi)^2} \times b_3 - \frac{\phi \times (1 + \phi)}{(1 + \phi)^2} \times b_3 \\ &= X - b_2 = b_2 - b_1 \end{aligned}$$

となる. これにより, 探索範囲が  $[0, 2 \times b_2 - b_1]$  のとき,  $b_2 - b_1$ ,  $b_2$  を黄金分割探索法の繰返し時に再利用することができる.



川村 尚生 (正会員)

昭和 40 年生. 平成 6 年神戸大学大学院自然科学研究科博士課程単位取得退学. 同年鳥取大学工学部知能情報工学科助手, 現在, 同大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻教授. エージェントシステム, 社会情報システムに関する研究に従事. 博士 (工学). 電子情報通信学会会員.



菅原 一孔 (正会員)

昭和 31 年生. 昭和 56 年東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻修士課程修了. 同年神戸市立工業高等学校電気工学科講師. 同校助教授を経て, 平成 6 年鳥取大学工学部電気電子工学科助教授, 現在, 同大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻教授. 計算機工学に関する研究に従事. 工学博士. IEEE, 電子情報通信学会各会員.



山根 丈史 (正会員)

昭和 63 年生. 平成 24 年鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻修士課程修了. 修士 (工学). 現在, 鳥取大学大学院工学研究科研究補助. アンテナ, 公共交通機関利用援助システム等に興味を持つ.



高橋 健一 (正会員)

昭和 51 年生. 平成 16 年九州大学大学院システム情報科学府博士課程修了. 博士 (工学). 同年財団法人九州システム情報技術研究所 (現, 九州先端科学技術研究所) 入所. 平成 23 年より, 鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻准教授. 情報セキュリティ, エージェントシステム, ユビキタス技術等の研究に従事. 電子情報通信学会, 電気学会各会員.