

令和元年6月24日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06370

研究課題名(和文)折返し構造を有するアンテナの小形化率の解明

研究課題名(英文)Study on the miniaturization factor of small antennas with folded structure

研究代表者

野口 啓介 (Noguchi, Keisuke)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：10278103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォンやタブレット端末などのモバイル無線端末に搭載される小形アンテナを取扱い、その高機能・高性能化をねらいとして、折返し構造を設けたアンテナの小形化率について検討している。本研究では、小形広帯域化、高機能化が可能な折返し構造を有する小形アンテナについて、その放射抵抗、Q値を明らかにし、帯域と放射効率の積(B積)による小形化率について明らかにしている。アンテナ例として折返し構造を有する逆L形アンテナを設計し、そのアンテナ特性とB積による小形化率を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り上げているアンテナの小形広帯域化、高機能化は、社会のインフラとして重要な移動通信の発展に寄与し、小形アンテナの動作原理にもとづく設計理論とその適用例を示したことは実用的にも学術的にも意義が大きいものと考えられる。折返し構造を有する小形アンテナについて具体的な設計方法を示すと同時に、帯域と放射効率の積(B積)による小形化率について明らかにしたことは、無線モジュールの小形化にもつながり、今後のIoTの発展に寄与できるものと思われる。

研究成果の概要(英文)：Small antennas mounted on mobile equipment such as smart phone and tablet PC have been widely used in the world, and improvement of their performance is strongly demanded. An antenna which the size is smaller than the resonant wavelength is called as an electrically small antenna (ESA). Since the quality factor of ESA becomes extremely high as its smaller size, broadbanding of ESA is required. Theoretical limitation between antenna size and quality factor is shown as low bound Q, which is applied to evaluate practical small antennas. In this research, small antennas with folded structure is focused and a folded inverted-L antenna (FILA) as a design sample is studied. After design of compact broadband FILA is investigated, bandwidth and radiation efficiency product as miniaturization factor are evaluated.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：小形アンテナ 移動通信 広帯域化 小形化率 理論限界値 B積

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スマートフォンや無線 LAN、タブレット端末などのモバイル機器を使用する無線通信システムは世界的規模で発展しており、普及が目覚ましい。そのようなモバイル無線端末は、幅広い周波数帯域で動作する広帯域特性、あるいは複数の周波数帯で動作するマルチバンドの特性が必要とされている。これらの特性は、一つの無線端末に複数の機能を盛り込み、より付加価値の高いサービスをユーザに提供するために今後益々必要となってくる。これまでも地上デジタル放送、GPS、インターネット接続などのサービスが一つの無線端末で実現され、機能の集積、融合が進み、付加価値の高いモバイル無線通信システムがユーザに提供されてきた。

無線端末と小形アンテナの広帯域化、マルチバンド化については、従来多くの研究がなされており、国内外において小形化技術、広帯域・マルチバンド化技術が数多く提案されてきた。しかしながら、従来の研究の多くは数値解析を主体としたパラメトリックスタディによるものであり、一般化された小形化の理論検討および小形化の割合（小形化率）の研究発展が必要であった。

海外で行われた調査研究において、折返し構造を有する小形アンテナでの複合モードを用いた設計の有効性が示された。その論文では過去に公開された 100 以上の小形アンテナの研究論文からアンテナの波長寸法に対する帯域幅 (B) と放射効率 ( ) との積 (B 積) を求め、理論限界値との比較が行われ、複合モードによる二重共振 (図 1 に示す) を持つ小形アンテナの設計が有効であり、理論限界値に最も近い B 積の値が得られたことが示された。このような理論限界値との比較検討は、研究開始時点においてまだ行われて間もない状況にあり、さらなる研究が必要であった。

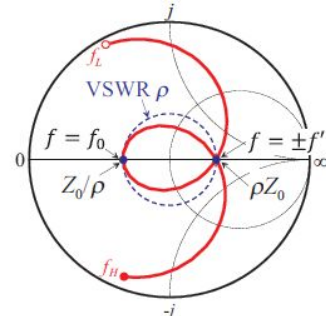


図 1 二重共振特性

### 2. 研究の目的

スマートフォンやタブレット端末などのモバイル無線端末に搭載される小形アンテナを取扱い、その高機能・高性能化をねらいとして、折返し構造を設けたアンテナの小形化率について解明する。モバイル無線端末には使用周波数の波長に比べて 10 分の 1 以下の小形アンテナが内蔵されており、複数のシステムに対応するための高機能化、高利得・高効率を実現する高性能化が大きな課題であった。本研究では、従来の逆 F 形アンテナに比べて小形広帯域化、高機能化が可能な折返し構造を有する小形アンテナについて、その放射抵抗、Q 値を明らかにし、帯域と放射効率の積 (B 積) および電気的体積などの小形化率について明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 折返し構造を有する小形アンテナの解析と小形化率

現在保有する電磁界シミュレータを用いて、折返し構造を有する小形アンテナの数値解析を行い、小形化率を評価した。小形化の手法であるヘリカル、メアングライン、逆 L 形など、様々な形状を持つ小形アンテナを取扱い、それらに折返し構造を設けることによる複合モードの有効性を検討した。折返し構造を有する小形アンテナの B 積を求めるとともに、体積を用いた小形化の指標についても求め、比較検討を行った。理論限界値との比較を行い、様々な形状寸法との関係を整理検討した。

#### (2) 3次元放射特性測定ソフトウェアの準備

本研究において導入予定だった 3次元放射特性測定ソフトウェアを購入し、既存設備の電波無響室にアンテナ測定システムを構築した。電波無響室は平成 25 年 3 月に竣工した 10 m 級のものを用い、小形アンテナの放射パターン、利得、放射効率の測定系を構築した。

3次元放射特性測定ソフトウェアは、既存のターンテーブルおよびアンテナポジションナと組み合わせることにより、立体放射パターンデータを得ることができるアンテナ測定システムを構築し、小形アンテナと無線端末で問題となる放射効率をパターン積分法により正確に求めることができる。平成 28 年度にソフトウェアの購入を行い、そのソフトウェアにより既存設備のターンテーブル、アンテナポジションナを制御し、アンテナ測定システムの立ち上げを行った。

#### (3) 3次元放射特性測定ソフトウェアを用いた放射パターン、利得、放射効率の測定

折返し構造を有する各種小形アンテナの実験的解析を行うために、3次元放射特性測定ソフトウェアを用い、放射パターン、利得、放射効率の測定を実施した。測定技術を向上するために、十分な基礎データを積み重ね、信頼できる測定結果を得るためのノウハウを蓄積した。自作ソフトウェアを Matlab により作成し、購入したソフトウェアとの比較検討を行った。

#### (4) 理論、数値解析および試作実験結果の比較検討

小形化率を向上した折返し構造を有する小形アンテナの回路特性、放射特性について、具体的に数値解析を行い、試作実験を行うことにより、理論、数値解析および試作実験結果の比較検討を行った。検討項目である小形化率のうち、放射効率については (3) に示した測定システムを十分に生かし、数値解析結果と測定結果との比較検討した。

#### (5) 既存システムに適用可能な小形アンテナの実現

折返し構造を有する各種小形アンテナの設計を応用し、実際に使用されている無線 LAN やス

スマートフォンなどの周波数帯に合わせた小形アンテナの設計を試み、実現の可能性、設計の有効性、アンテナと端末の小形化、広帯域化、マルチバンドの特性限界などについて取り組んだ。

#### 4. 研究成果

##### (1) アンテナ構成例

具体的な小形アンテナの研究例として、図2に示す折返し構造を有する小形化した逆L形アンテナを示す。アンテナの構成は誘電体基板の両面にプリントした2本のストリップ導体からなり、地板上に設置している。誘電体基板の表面および裏面導体をそれぞれストリップ導体#1、ストリップ導体#2とする。導体#1を給電し、導体#2を地板に接地することにより、折返し構造を形成する。導体#1と導体#2は先端部で短絡点を設けず、無短絡としている。通常の折返し構造では短絡点を設けて先端短絡の伝送線路を形成するが、短絡部に生じる電流集中による効率低下を招く場合がある。図2の逆L形アンテナではその電流集中を避け、比較的高い誘電率の誘電体を用いることにより先端開放線路による折返し構造を用いた。導体#1および導体#2において、地板の面と並行に設置した平面導体部にスリットを設け、給電点からの導体先端部に流れる電流の経路長を長くとることによって小形化を図っている。地板については半径300mmのアルミニウム製円形地板を仮定した。アンテナのパラメータは高さ $h$ 、長さ $L$ 、幅 $W$ 、給電部導体#1の幅 $w_1$ 、短絡部導体#2の幅 $w_2$ 、スリットの長さ $s_l$ 、スリットの幅 $s_w$ および誘電体基板厚 $t$ である。導体#1と地板との給電部間隙を $g$ としている。小形化率向上のために地板に垂直な導体（給電部および短絡部導体）と水平に設置した導体の寸法比であるアスペクト比を1:2とし、さらに平面導体部の長さ $L$ と幅 $W$ を同じ寸法とした。

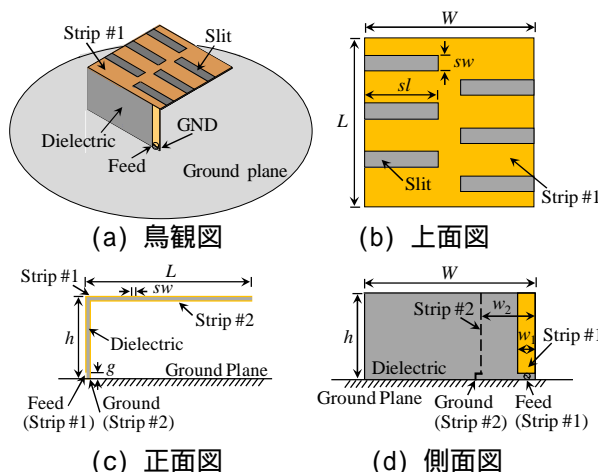


図2. 折返し構造を有する小形化した逆L形アンテナ

##### (2) アンテナの動作原理

折返し構造を有する逆L形アンテナの動作原理について、図3に示す。図3(a)~(c)（これらの図は図2(c)正面図に相当する）に示すように、折返し構造を有することにより、放射に寄与する放射モードと、放射には寄与しないが整合に寄与する伝送線路モードに分離して考えることができる。すなわち、図3(a)に示す原型のアンテナ導体に流れる電流は、図3(b), (c)に分けて表され、図3(b)では導体#1, #2ともに同相の電流が流れて放射を生じる。一方、図3(c)に示す伝送線路モードでは、2導体の電流は逆相で流れ、アンテナの先端で電流が折り返されて流れる先端開放の伝送線路として動作する。給電点から先端部までの長さが約0.5波長のとき、給電点(Feed)から見たインピーダンスが並列共振特性となり、放射モードの直列共振となるインピーダンスのリアクタンス成分をキャンセルする。これら二つのモードの合成により、広帯域な特性を持たすことができる。

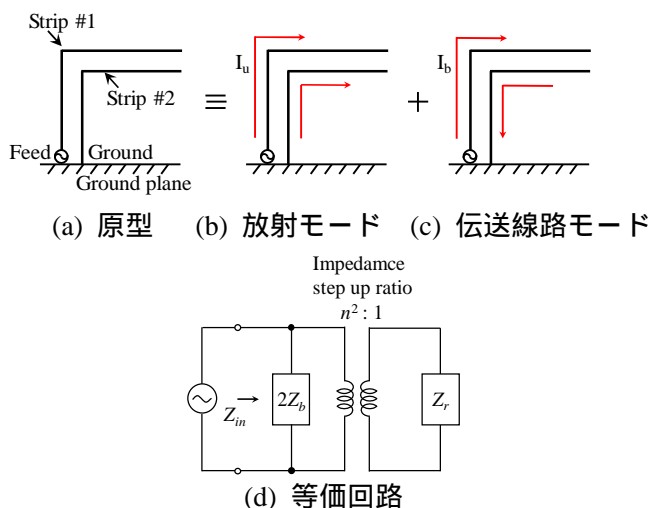


図3. 折返し構造を有する逆L形アンテナの動作原理

図3(d)の等価回路は、放射モードのインピーダンス $Z_r$ 、伝送線路モードのインピーダンス $Z_b$ 、インピーダンスのステップアップを行うトランスから構成される。小形アンテナでは、通常、インピーダンス整合が問題となるが、図3(d)の等価回路では見かけ上、トランスによってインピーダンスを増大させ、さらに伝送線路モードのインピーダンスによるリアクタンスの効果により、図1に示す二重共振特性が得られて広帯域な特性を実現できる。

### (3) アンテナ特性

原理的な解析をもとに折返し構造を有する逆L形アンテナを設計し、シミュレーションおよび試作実験を行った。そのアンテナ特性を図4に示す。図4(a)のスミスチャートにおいて、インピーダンス特性はシミュレーション値、実測値ともに図1に示した広帯域な特性が得られ、図4(b)の電圧定在波比 (VSWR) の特性にみられるように、二つの周波数で VSWR の値が小さくなって広い帯域にわたって整合が取れる広帯域特性が実現できた。ここで、広帯域特性は VSWR = 2 における比帯域幅 (中心周波数に対する帯域幅の比率) は、シミュレーション値が 8.63%、実測値は 8.32% であった。図4(c)および(d)に示す放射パターンは、周波数が 0.989 GHz でのパターンであり、図4(c)、(d)にみられるように、シミュレーション値と実測値は概ね一致している。この放射パターンは、VSWR = 2 の範囲内の周波数において変化が小さいことを確認し、放射パターンにおいても広帯域であることが確かめられている。

### (4) 小形化の評価

アンテナの小形化の評価には、小形アンテナの理論限界値を用いた。小形アンテナの理論限界値は、比帯域幅  $B$  と放射効率  $\eta$  の積 ( $B$  積) とアンテナを囲む球の半径  $a$  の関係式で表される。

$$B\eta = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{ka} + \frac{1}{(ka)^3} \right]^{-1} \quad \text{式(1)}$$

図5に  $B$  積による小形化の評価結果を示す。図中の実線は式(1)による理論限界値を表し、破線は二重共振特性により得られる広帯域化の割合 (広帯域化前の比帯域幅の 2.4 倍) を式(1)に乗じた理論限界値を表す。丸印のプロットはシミュレーションから得られた従来の逆L形アンテナ (ILA と略す) の  $B$  積であり、三角印のプロットはシミュレーションと実測から得られた折返し構造を有する逆L形アンテナ (FILA と略す) のものである。

FILA の共振周波数における放射効率は、シミュレーション値が 86.34%、実測値が 62.04% であった。ILA の放射効率は、同相給電時にスリット本数  $N$  を 2~20 と変えたときの値を用いており、図5において FILA と同じアンテナサイズ  $ka = 0.53$  における ILA の放射効率は 98.30% であった。図5より、 $ka = 0.53$  における  $B$  積は、FILA のシミュレーション値が 0.075、実測値が 0.052 であり、実線で表される理論限界値との差異は、それぞれ 0.008、0.031 であった。シミュレーション値について、 $ka = 0.53$  における FILA の  $B$  積は ILA の  $B$  積に比べ、0.034 だけ大きい値を有している。結果として、式(1)の理論限界値を基準とすれば、FILA の  $B$  積は ILA の  $B$  積に比べ、41% の改善が得られた。また、ILA の  $B$  積は理論限界値に対して小さい値であるが、アンテナサイズ  $ka$  に対する  $B$  積の変化の傾向は理論限界値の実線と同様であり、妥当な結果と考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

野口啓介, “複合モード励振による小形・平面アンテナの広帯域化,” 電子情報通信学会論文誌 (B), 有査読論文, J99-B, pp. 655-664, No.9, Sep. 2016.

[学会発表] (計4件)

大崎郁弥, 野口啓介, “スリット装荷無短絡 FILA のスリット効果,” H28 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, C-8, 福井工業大学, Sep. 2016.

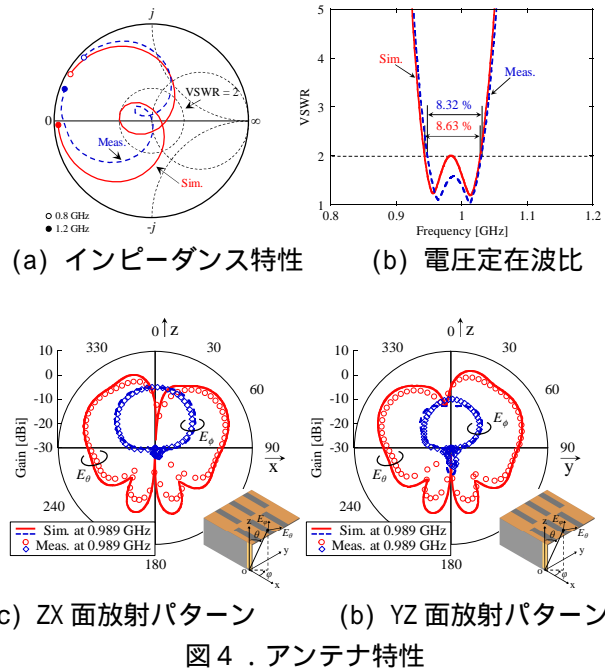


図4. アンテナ特性

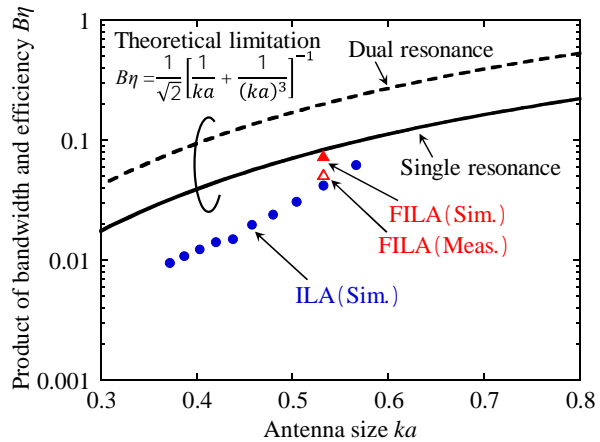


図5. B 積による小形化の評価

大崎郁弥, 野口啓介, “折返し逆 L 形アンテナの基礎検討,” IEEE AP-S Nagoya Chapter, MTT-S Nagoya Chapter, Midland Student Express 2017 Autumn, S1-3, Nov.2017.

大崎郁弥, 野口啓介, 牧野滋, 廣田哲夫, 伊東健治, “スリットを設けた折返し逆 L 形アンテナの広帯域化,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 118, no. 134, AP2018-59, pp.101-106., Jul. 2018.

Fumiya Osaki, Keisuke Noguchi, Shigeru Makino, Tetsuo Hirota, Kenji Itoh, “Miniaturization and Broadbanding of an Open Terminated Folded Inverted-L Antenna with Slits,” ISAP2017, 3C2-2, Nov. 2017.

## 6. 研究組織

研究分担者および研究協力者については特に無し.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。