

令和元年6月18日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06299

研究課題名(和文)高性能フェライトを活用した小型広帯域UHFアンテナの開発

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF SMALL AND WIDEBAND UHF ANTENNA USING HIGH PERFORMANCE FERRITE

研究代表者

山本 節夫 (YAMAMOTO, Setsuo)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：30182629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォンに完全内蔵できる地上波デジタルTV放送受信アンテナを開発した。このアンテナの特徴は、構造的に低背化が可能な逆L型を基本構造として採用し、アンテナエレメント部は、誘電体基板上にライン状の導体エレメントをパターンニング形成し、その上にフェライト磁性板を張り付けた構造とし、基板の接地面にはスリットを2本入れたことにある。波長短縮効果と、接地面の電流経路の延長、複共振による帯域幅の拡大によって、実用的性能を持つアンテナを設計・試作できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

厳しい寸法制約が課せられた条件の下で、高い放射効率、高アンテナ利得、広い帯域幅を同時に満足するアンテナを実現することは難易度が高い課題だが、スマートフォンなどの携帯無線端末が急速に普及する状況の中で要望は大きい。本研究は、UHF帯で磁気損失が少ないフェライト材料を活用するメリットを実証したこと、複共振を活用することによる広い帯域幅の実現を示したことに学術的意義があると同時に、無線通信関係の産業界に与える波及効果が期待される。

研究成果の概要(英文)：Terrestrial reception internal antenna for smartphone was successfully developed. The specific features of the newly proposed antenna are: inverted L type basic antenna structure which is suitable for low profile, ferrite plate covers conductive line antenna element directly patterned on dielectric substrate, and formation of two slits on ground plane. Wavelength shortening effect by high permeability and high permittivity, prolonging of current path on the ground plane, and broadbanding due to multiple resonance contribute to practically utilizable performance of the antenna.

研究分野：電子機器

キーワード：アンテナ UHF フェライト 広帯域

1. 研究開始当初の背景

(1) フェライト磁性材料は、日本で発明され工業化・実用化された材料で、IEEE マイルストーンに認定されている。研究代表者は、このフェライトをデバイス応用する可能性を追求すべく、フェライトを活用した高周波磁気デバイスとしてアイソレータ(フェライトのジャイロ磁気現象を利用して電磁波の伝播を一方に制限するデバイス)の小型化・低背化に取り組んできた。本研究ではこの経験を活かして、フェライト材料の別な応用として、アンテナの小型化・高性能化の課題に新たな切り口で取り組んだ。

(2) 一般に、アンテナの小型化に関して次の経験則が成り立つ。

$$\text{体積(サイズ)} \div [\text{効率} \times \text{利得} \times \text{帯域幅}] = \text{const.}$$

この式は、アンテナを小型化する際、高い放射効率、高アンテナ利得、広い帯域幅の3つを全て同時に満たすことは非常に困難であることを示している。これを打破する方策として、フェライトなどの磁性材料の活用(装荷)が考えられる。しかし、フェライトを用いたアンテナで実際に実用化されているのは長波帯・中波帯・短波帯用である。これは高い周波数になると、通常のフェライト材料では磁気損失が大きくなるためである。研究代表者は本研究に先立って、UHF 帯でも低磁気損失なフェライト材料を活用した携帯電話(二つ折りの携帯電話端末)に内蔵可能なサイズの地上波 TV フルセグ受信アンテナについて先行的に調査研究を行ってきた。地上波 TV 放送を受信するにあたっては、受信周波数は 470-710 MHz と広く、比帯域(所要帯域幅を中心周波数で割った比率)は 40%にも達し、通信用(約 20%)と比較して非常に大きい。加えて、自由空間波長は 50 cm 程度と長いので携帯電話端末に内蔵できるアンテナの設計は容易でなかったが、研究代表者は、二つ折り携帯電話に内蔵できるフェライト装荷した新規のアンテナエレメント構造のアンテナを提案した。本研究では筐体がさらに小さいスマートフォンに内蔵可能なアンテナの実現を目指した。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、高周波特性に優れたフェライトを活用し、スマートフォンの基板接地面(グラウンド面)も含む統合的な設計を行うことによって、アンテナエレメント長が数センチ以下でスマートフォンに納まる広帯域・高アンテナ利得の UHF アンテナ構造を提案する。比帯域が 40%(通信の場合の2倍)にも及び地上波デジタル TV 放送を十分に実用的な特性で受信できる携帯端末内蔵型のアンテナを設計し、試作し、その性能を実証する。

(2) 開発する地上波 TV 放送受信アンテナの目標仕様は実用的観点から以下のとおり。

- ・帯域幅 : 470-710 MHz
- ・アンテナ利得 : -5 dBi
- ・アンテナ長 : 60 mm (スマートフォンに完全内蔵できるサイズ)
- ・指向性 : アイソトロピック(等方的)
- ・低コストであること、製造のしやすい簡素な構造であること

3. 研究の方法

(1) 小型・広帯域・高利得の UHF アンテナの基本設計指針を確立する。

放射効率、アンテナ利得、帯域幅を極力犠牲にすること無く、アンテナの小型化を実現するため、フェライト材料を導入して波長短縮、および自由空間とアンテナとのインピーダンス整合を図るとともに、アンテナと筐体および基板接地面を含めて一体化した概念に基づいた新構造のアンテナを提案し、アンテナの基本設計指針を導き出す。

(2) 上記提案したアンテナの試作、性能実証を行う。

(3) アンテナのマルチバンド化を提案する。

4. 研究成果

(1) スマートフォン内蔵型広帯域 UHF アンテナ実現の課題・解決手段

スマートフォン用のフルセグ放送を受信可能な内蔵アンテナを開発する際の課題は、

- ・470 - 710 MHz という広帯域をカバーする
- ・上記周波数範囲において高感度(-5 dBi 以上)を維持する
- ・携帯電話内部への完全内蔵(小型化)

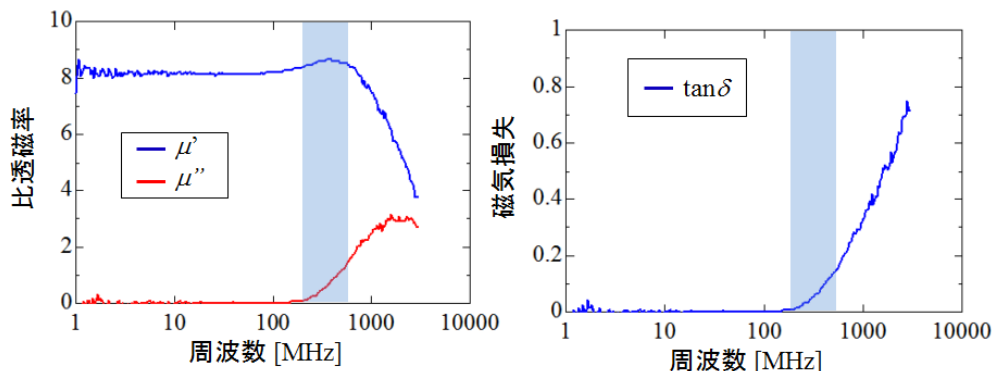
であり、その解決策として、

- ・複共振の利用による広帯域化
 - ・構造最適化による整合回路の排除
 - ・フェライト等の材料による波長短縮、逆 L アンテナ構造による低背化
- 等を採用した。

(2) フェライト装荷による波長短縮効果

物質中(比誘電率 ϵ_r 、比透磁率 μ_r)の中を伝搬する電磁波の波長()は真空中を伝搬するときの波長(λ_0)よりも短くなる(波長短縮)。 ϵ_r 、 μ_r の両方を有するフェライトを装荷することで波長短縮が強くなり、アンテナ素子を小型化できる。本研究では、1 GHz 付近の高周

波まで磁気損失が起こり難いように開発された Ni-Zn-Cu スピネルフェライトを使用した。その磁気特性（比透磁率、磁気損失）の周波数特性を図 1 に示す。



(a) 複素比透磁率の周波数特性 (b) 磁気損失の周波数特性

図 1 本研究で使用した Ni-Zn-Cu フェライトの周波数特性

(3) 基板接地面へのスリット形成

本研究で提案したアンテナは、基板接地面 (GND) も含めて基板全体で非対称な半波長ダイポールアンテナとして機能する。二つ折り携帯電話の基板に比べてスマートフォンの基板では接地面における実効的な長さが短い。そこでスマートフォンの基板の GND 面にスリットを入れることで、接地面を流れる電流経路の長さを確保した。スリットの本数、スリットの長さ、スリットの位置などを最適化した。

(4) アンテナのエレメント部の構造 - サンドイッチ型アンテナの提案 -

アンテナのエレメント部については、サンドイッチ型を提案した。図 2 にその構造を示す。プリント基板上に導体をライン状にパターン形成してアンテナエレメントとし、その上にフェライト薄板 (緑色のパーツ) を張り付けたシンプルな構造で、アンテナエレメントは磁性体 (フェライト薄板) と誘電体 (基板) によって挟み込まれた形になっている。製造も簡単である。

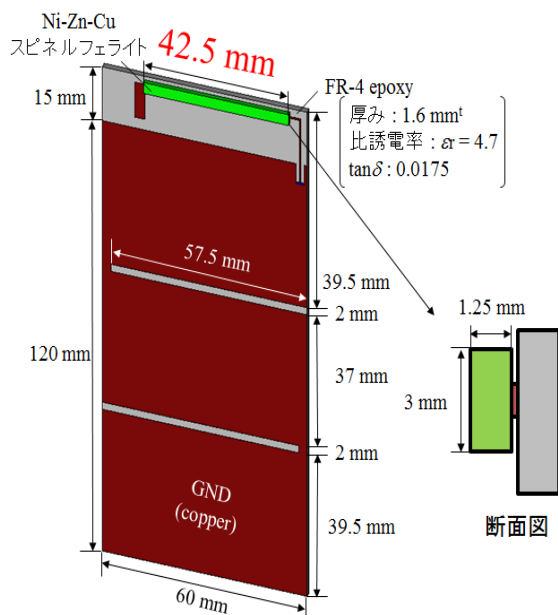


図 2 サンドイッチ型アンテナの構造

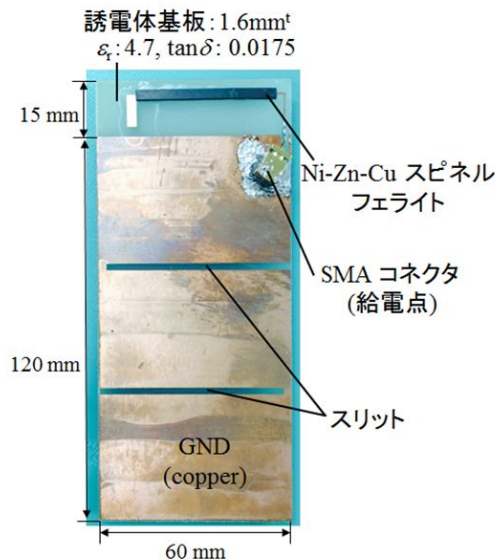


図 3 試作したサンドイッチ型アンテナの写真

(5) アンテナの試作及び特性評価

サンドイッチ型アンテナを実際に試作した。ガラスエポキシ基板を使用し、アンテナエレメントの上にフェライト薄板 (42.5 mm × 3 mm × 1.25 mm) を張り付けた。給電点となる同軸ケーブルとの接続部には SMA コネクタを用いた。試作したアンテナの全景を図 3 に示す。

電圧定在波比 (VSWR) の周波数特性を図 4 に、周波数を変化させたときのインピーダンス軌跡 (スミスチャート) を図 5 に示す。試作アンテナの実測結果 (赤色の軌跡) とともに、比較のために 3 次元有限要素法に基づく高周波シミュレーションソフトウェア (HFSS) によるシミュレーション解析結果を青色の軌跡で示す。

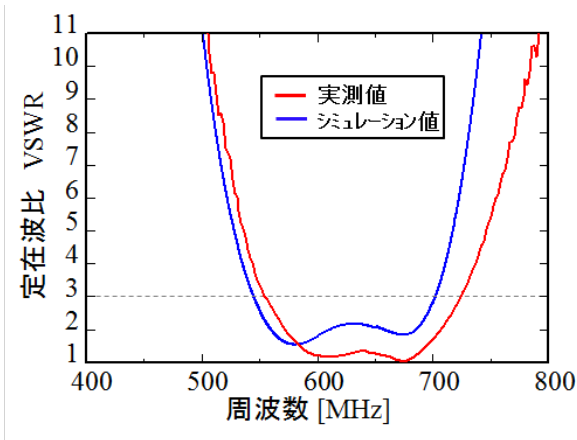


図4 VSWRの周波数特性

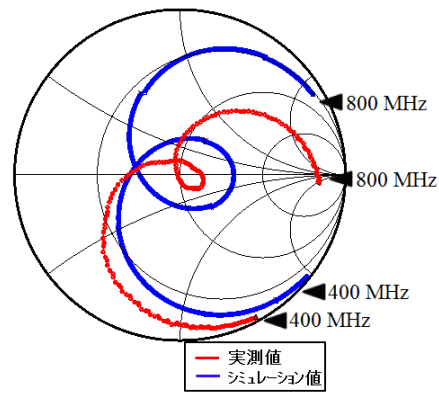


図5 スミスチャート

VSWRの目標値は3以下であった。図4のように、サンドウィッチ型アンテナでは550 MHz から720 MHzまで、170 MHz幅にわたって目標値をクリアした。整合回路を外付けしなくてもインピーダンスマッチングできた。アンテナ利得の周波数特性を図6に、試作したアンテナの放射パターン(実測値)を表1に示す。試作したサンドウィッチ型アンテナのアンテナ利得はシミュレーションでの予想(赤い曲線)と実測値(○印)が概ね一致し、600 MHzの中心周波数において -0.31 dB_i という高い性能を示すことを確認した。また、470 ~ 710 MHzまでの地上波TV受信に必要な周波数帯域全体をほぼカバーすることができた。さらに、サンドウィッチ型アンテナは、 xy 平面内では無指向性、 yz 平面内では8の字指向性(ダイポールアンテナ的な放射パターン)を示し、電磁界シミュレーションでも予想された望ましい等方的(アイソトロピック)な放射パターンであることを確認した(表1)。

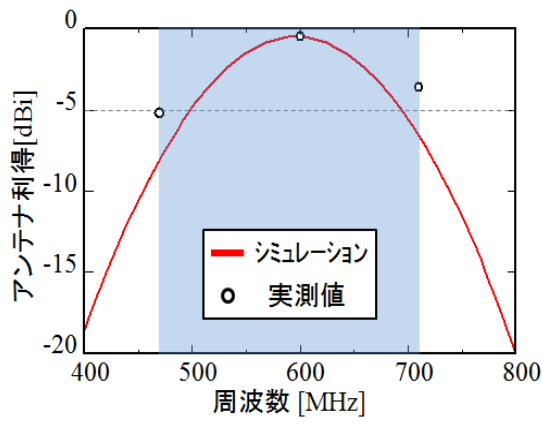
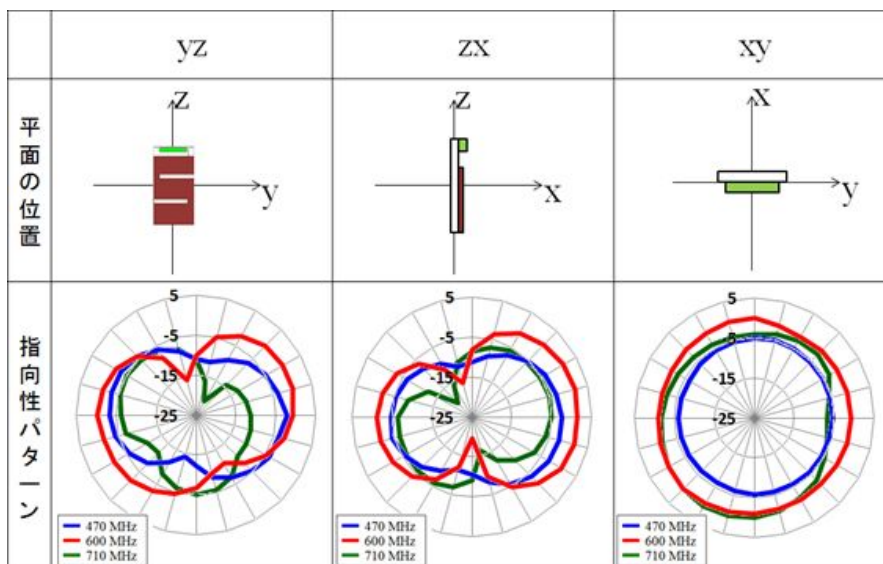


図6 アンテナ利得の周波数特性

表1 試作アンテナの放射パターン(実測)



(6) サンドイッチ型アンテナの等価回路表現と広帯域化の指針

サンドイッチ型アンテナの典型的なインピーダンスのスミスチャート軌跡を図5に示す。サンドイッチ型アンテナ素子部の基本構造は逆L型である。逆L型アンテナの等価回路は、ダイポールアンテナの等価回路(これはLCR直列回路)に並列にキャパシタが挿入された形となる。また線路終端部による、GND面とアンテナエレメントをたどる電流経路を考慮し、さらに並列にインダクタンスが付加された等価回路を検討した。400~800 MHzにおけるインピーダンスの挙動(スミスチャート)から、フィッティングによって等価回路の各構成素子の値を推測した。その結果、図7中に示された電磁界シミュレーション(HFSS)によるインピーダンス軌跡(赤色の曲線)は、LCR直列回路にLCが並列接続された等価回路(図8)を想定し、各素子が図8に記載の値をとると仮定したときの挙動(青色の曲線)で電磁界シミュレーション結果(赤)を良く再現できた。

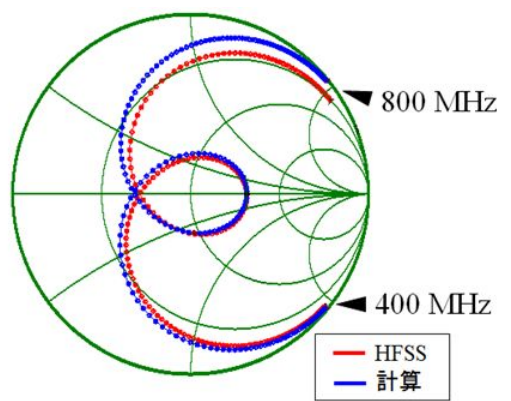
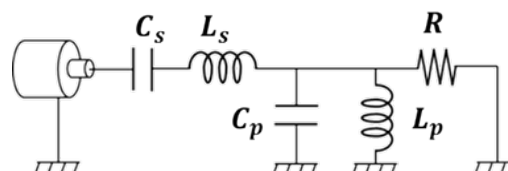


図7 スミスチャート



$$C_s=1.28 \text{ pF}, L_s=62 \text{ nH}, \\ C_p=25 \text{ pF}, L_p=3.17 \text{ nH}, \\ R=96.28$$

図8 サンドウフィット型アンテナの等価回路

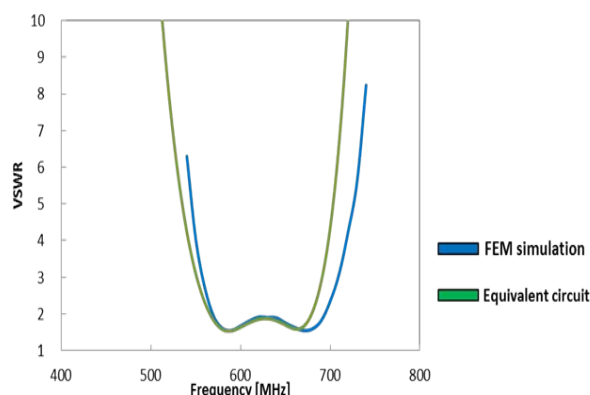


図9 VSWRの周波数特性
電磁界シミュレーション結果(青)及び
図8の等価回路による挙動(緑)

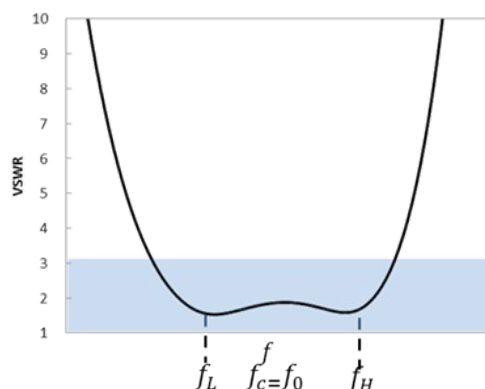


図10 図8の等価回路によるVSWRの周波数特性

566 MHz 付近と 680 MHz 付近で二つの共振が合わさり、その中央の 630 MHz 付近においてリアクタンスがゼロ(共振状態)となり、図9のようにVSWRは1に近い値となる。VSWRの周波数特性からも、電磁界シミュレーション結果と図8の等価回路の結果は良く一致している。

回路全体のインピーダンスを Z とし、直列にキャパシタ C_s 、インダクタ L_s 、並列にキャパシタ C_p 、インダクタ L_p 及び抵抗 R が接続されているとみなすと、スミスチャート上でリアクタンス(X)がゼロとなって純抵抗のみとなる3点の状態は次の場合で示される。

$$Z = R \quad (X_s = X_p = 0)$$

$$Z = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{R} + \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L_p}\right)^2} \quad (X_s + X_p = 0)$$

図10のVSWRの周波数特性において、低周波側でVSWRが最小となる周波数(570 MHz 付近)を f_L 、高周波側(690 MHz 付近)で最小となる周波数を f_H 、それらの中央部の周波数を f_c とする。このように複数の共振(複共振)を発現させることで広帯域化が可能になる。広帯域化が実現される条件として以下のことが言える。

・LC直列接続回路部の共振周波数(f_{s0})とLC並列接続回路部の共振周波数(f_{p0})が厳密に一致(そ

の時の周波数を f_0)かつ f_0 は必要帯域のほぼ中心周波数(f_c)であること。

$$f_{s0} = f_{p0} = f_0, \quad f_0 = f_c$$

・ f_0 から上下に少し離れた2つの周波数(f_L, f_H)において、LC直列接続回路部とLC並列接続回路部のリアクタンスが異符号で同値かつ等価回路全体としてみたりアクタンスは打ち消し合いゼロになること。

・スミスチャート上でのインピーダンス軌跡の滞留部分が許容 VSWR 値の円内部に収まること

図8の等価回路における各素子の値と実際のサンドウィッチアンテナの構造や材料特性との関係性についても調査した。その結果、例えばNi-Zn-Cuスピネルフェライト薄板部に磁性体と誘電体の両方の性質(比誘電率12、比透磁率8.59)を持たせると、この部分を空気と仮定した場合と比べて、直列部のCとLの成分は増加(特にCは大きく増加)し、並列部ではCが大きく減少し、Lが大きく増加する、そしてその結果、インピーダンスの周波数軌跡は全体として誘導性側にシフトすることなどが分かった。

また、等価回路において並列のキャパシタンス成分を減少させ、インダクタ成分を増加させると、スミスチャートにおいてVSWR 3を示す円の中に、525-765 MHzのインピーダンス軌跡が収まり広帯域化が実現できることがわかった。帯域幅を中心周波数で割った比帯域の観点でみると、元のフェライトでの回路定数の場合の24%から38%へと増加した。ITS(高度道路交通システム)の周波数755-765 MHzをカバーすることもできるようになる。このように等価回路を構成する素子を独立的に調整できれば広帯域化に繋がる可能性が示された。

(7)サンドウィッチ型アンテナの発展可能性 - 高度道路交通システムへの対応可能性 -

ITS(Intelligent Transport Systems:高度道路交通システム)技術を活用して安全で経済的な交通社会の実現を目指す取組みが行われている。地上波TVのデジタルへの移行とともに760 MHz帯がITS用に割り当てられた。前述したサンドウィッチ型アンテナの応用として、スマートフォンに内蔵可能な760 MHz帯アンテナの設計を試みた。アンテナエレメント長を縮小して800 MHz近傍で複共振を発現させ、基板接地面に設けるスリットを1本にし、かつその長さを縮小することでインピーダンス整合させた。

また、本研究で提案したサンドウィッチ型アンテナはUHF帯だけでなく、GHz帯(準マイクロ波帯)においても共振し、アンテナとして動作することも見出した。ただしこの場合、使用するフェライト材は磁気損失が極力小さいことが必要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

山本 節夫、栗巢 普揮、米原 正道、三枝 淳平、スマートフォンに内蔵可能な広帯域 UHF 受信アンテナ、電気学会研究会資料、査読無、マグネティックス研究会 MAG-16、25-30、2016。

[学会発表](計7件)

熊谷 里風、中原 和宏、栗巢 普揮、山本 節夫、極軌道衛星から送信された気象観測データ受信のためのVHFフェライトバーアンテナ、第28回日本MRS年次大会 B3-019-006、2018。

K. Nakahara, R. Zheng, H. Kurisu, and S. Yamamoto, FM radio receiving small antenna using high permeability ferrite bar, IUMRS-ICM 2017, The 15th International Conference on Advanced Materials, 2017.

S. Mieda, K. Shinoda, M. Yonehara, H. Kurisu, and S. Yamamoto, Ferrite Loaded Terrestrial Digital TV Broadcast Reception Antenna, IUMRS-ICM 2017, The 15th International Conference on Advanced Materials, 2017.

三枝 淳平、篠田 航平、米原 正道、中原 和宏、栗巢 普揮、山本 節夫、フェライト装荷逆L型広帯域UHFアンテナの等価回路、第41回日本磁気学会学術講演概要集、2017。

K. Shinoda, Y. Takemoto, M. Yonehara, H. Kurisu, K. Akai and S. Yamamoto, Study on the secondary resonance, 26th Annual Meeting of MRS-J, 2016.

J. Mieda, M. Yonehara, T. Wakamatsu, H. Kurisu and S. Yamamoto, Smartphone built-in type ferrite antenna for ITS application, 26th Annual Meeting of MRS-J, 2016.

山本 節夫、栗巢 普揮、米原 正道、スマートフォンに内蔵可能な地上波デジタル放送受信アンテナ、第40回日本磁気学会学術講演、2016。