

	たなべ しんじ			
氏 名	田 邊 信 二			
授 与 学 位	博士 (工学)			
学位授与年月日	平成16年3月10日			
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項			
最 終 学 歴	昭和55年3月 東北大学大学院理学部物理学科 卒業			
学 位 論 文 題 目	電磁場解析に基づく携帯電話の受信感度向上に関する基礎的研究			
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 山口正洋	東北大学教授 中村慶久		
	東北大学教授 荒井賢一	東北大学教授 杉浦 行		

論 文 内 容 要 旨

通信技術は、現代情報化社会を支える基幹技術の一翼を担っている。携帯電話に代表される通信端末では、機器の小型化、ならびに機器にカメラや表示デバイスなどを組み合わせた多機能化が進んでいる。このような傾向は、デバイス間やモジュール間での電磁干渉の増大とアンテナの感度劣化をもたらしている。その一方で、ビルや車の中など電磁環境の悪い状態においても通信品質を維持し、且つ画像などのデータ通信機能を充実させるため 1 チャネルあたりの通信容量を格段に増大させることが必要となっている。無線通信における通信容量と電磁干渉を含めた受信感度との関係は、よく知られているように、Shannon の限界により以下の様に規定される。

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

ここで C は通信容量、W は通信に用いる周波数帯域、S は信号のエネルギー、N は帯域における白色の Gaussian ノイズのエネルギーを示す。これより明らかなように、ハードウェア開発に課せられた課題は通信系においていかにノイズ N を下げ、信号受信感度 S を上げるかにある。本研究では、S/N 向上のためのハードウェア技術を受信感度向上技術と定義し、特に金属薄膜と磁性薄膜を用いた新規な受信感度向上技術に着目して、電磁場解析に基づいた基礎的研究をおこなった。その結果、小型軽量な電磁シールド技術、及び GHz 帯で動作する磁性薄膜を用いた受信フロントエンドマッチング用インダクタについて、携帯電話における新しい受信感度向上技術の基礎を築くことができた。

以下、本研究の概要を各章ごとにまとめる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べた。

第2章では、無線端末ハードウェアの受信感度向上の検討に必要な電磁場と高周波回路の解析技術を構築した。

金属薄膜を用いた電磁シールドや磁性薄膜を用いた集積化インダクタの解析においては、以下のような機能が要求される。①厚みは表皮深さよりも薄い面積は大きな薄膜金属内部、金属と空気の界面付近での電磁場分布を精度よく解析できること。②解析領域の境界として自由空間、金属壁（導電率 $\sigma = \infty$ ）、及び磁気壁（透磁率 $\mu = \infty$ ）などが自由に選択でき、波源の入力についても入力方法の自由度が大きいこと。③コンクリート、及び人体など誘電率の実部と角周波数の積 $\epsilon\omega$ と導電率 σ にオーダー的な差の小さい物質での電磁波の反射や吸収、磁性薄膜における磁気異方性やスピン共鳴、非線形性を考慮できる。さらに、詳細な近傍場の分布と遠方における放射パターンを同時に解析できること。

上記の機能を実現するため、以下の検討を通して問題を解決した。①薄膜の解析に必然的に求められるアスペクト比が大きく、且つ有限な導電率を扱える手法として有限要素法を選択した。金属内部では、誘電率の虚数成分にあたる大きな導電率のため、電磁波の波長が表皮深さ δ と同程度に短縮され、1GHzではマイクロオーダーとなる。また、金属と空気の界面では、インピーダンスのミスマッチングにより電磁波の反射が大きくなる。この現象を精度よく有限要素法により解析するには、金属内部での電磁場分布を正確に求める必要がある。有限要素のアスペクト比の大きな金属薄膜では、係数行列の要素に形状と導電率の積が入る。そのため接点間の相互作用を示す行列要素の値のダイナミックレンジが極めて大きくなり、解の発散や解析精度の劣化の問題が発生する。この問題は、解の発散のない Gauss 消去法を求解法に定め、その大規模行列を解くための仮想記憶システムと、仮想記憶システムを高速に実現する RAID ハードウェアシステムを構築することによって解決した。この際、部分的に多次有限要素を組み合わせるアルゴリズムにより、界面での反射解析の精度を向上させた。②金属で囲まれた箱の中における電磁場分布など自由空間以外の境界を持つ解析を可能とするため、磁気ベクトルポテンシャル \vec{A} と電気スカラーポテンシャル ϕ との関係を一義に決定するためのゲージ条件を、問題ごとに自由に設定できる方式にした。通常の有限要素法解析では定式化の段階で解析対象の特徴とは無関係に特定のゲージ条件を課しているのに対し、このアルゴリズムでは格段に自由度が高く解析精度が向上した。③様々な

特性を持つ誘電体や磁性体を扱うため、すでに開発されている技術の組み合わせであるが、複素対角行列としての誘電率や透磁率の入力、繰り返し法による磁気非線形の扱い、有限要素法で求めた電磁場の値と Green 関数を組み合わせ有限要素領域外の遠方場を求める手法を組み込んだ。これらの各機能が正しく動作していることは、解析的に厳密解の求められるモデルで検証し、金属薄膜内での電磁場分布、不良導体中の吸収と電圧定在波比、及び遠方場放射パターンのいずれにおいても厳密解とよく一致した。その成果は汎用のパッケージソフトウェアとして完成させ、電磁ノイズ問題に広く応用できるものとした。

高周波回路解析においても、3章以下の研究のため汎用ツールに無い機能を独自に開発した。すなわち、マルチポート回路における等価回路の導出と回路定数の決定、磁性薄膜集積化インダクタの特殊な構造に対して物理的に対応する等価回路の導出と回路定数の決定、磁気非線形性を考慮できるハーモニックバランス法についてアルゴリズムを検討しプログラムの作成と検証をおこなったことなどである。

第3章では、携帯電話の受信感度向上のためアンテナからの送信波と RF(Radio Frequency) 回路との電磁相互干渉の低減に取り組んだ。まず PDC(Personal Digital Cellular)方式携帯電話の回路ブレッドボードを試作し、電磁ノイズに対する耐性を定量化した。その結果、VCO(Voltage Controlled Oscillator) から PLL(Phase Locked Loop)への帰還ルートが最もノイズに弱く、-49dBm のノイズ強度でビットエラーレートが 0.01%を超えるという結果を得た。この結果と携帯電話の最大出力が 24dBm であることから、その他の外来ノイズなどに対するマージンを見越し、距離減衰も含め 80dB を目標シールド特性と定めた。RF 回路の耐性を数値化できたことにより、シールドの設計を厳密に最適マージン内でおこなうことが可能になった。

次に、有限要素法を用いたシールド設計手法を確立するため、まず基礎的例題として無限面積をもったアパーチャ（開口）の無い薄膜金属表面での反射、薄膜金属内での Joule 損失、及び誘電体による反射と損失を解析的手法により定量的に見積もった。解析的手法の特徴は、有限要素法などの数値解法と異なり金属薄膜の導電率や膜厚などのパラメータが特性に与える影響を陽関数の形で表現でき設計の見通しがたて易いところにある。ここで求めた金属薄膜固有のシールド特性は実測とよく一致した。

本章の最後に、携帯電話の回路基板上で使用されるアパーチャのある実際シールドボックスを対象として、シールドボックス内でのアイソレーション量の分布を有限要素法により計算した。ここでは、基

板端の $\lambda/4$ モノポールアンテナから放射される送信波をノイズ源とした。特に注目したのは、最もノイズに弱いVCO-PLL間のマイクロストリップ線に誘起する電圧である。これらの成果として、以下の知見を得た。①当初シールド特性を決めるのはアパーチャの大きさや位置が支配的で金属薄膜固有のシールド特性は、それほど効かないと考えられていたが、実際には、PLLなど電磁ノイズに対する耐性の弱い素子の配置されるシールド中央部では、薄膜表面から裏面に漏れ出す微弱な電磁場の影響が大きい。②そのため、金属薄膜の2層化、あるいは高周波でも透磁率を有するNi膜とCu薄膜の積層化などにより膜固有のシールド特性を向上させれば、シールドボックス全体のシールド特性が大幅に向上することがわかった。③細長いアパーチャは一般に電磁波に対するインピーダンスが低くシールド特性を劣化させることが知られている。特に金属シールド上に誘起されるアンテナ鏡像電流とアパーチャが直交する場合、アパーチャ部に変位電流が現れシールド特性が劣化する。この電流とアパーチャが直交する部分に集中的に導通をとることで、最小限の接点で高いシールド特性が保てる。④シールドボックスの中心からずれた位置にアンテナを配置すると、放射パターンに非対称性をもたらす。以上の成果は、解析手法の確立自体が産業的には意味のあるものであり、この手法はその後カメラモジュールなどのデジタル制御系信号とアンテナの間における電磁干渉の低減などにも応用された。

第4章では、受信感度向上法の一つとして、受信フロントエンドでアンテナとRF回路のマッチング用として用いられている集積化薄膜インダクタの損失低減を試みた。携帯電話端末の受信部分では、 -100dBm (10^{-13} W)を切る微弱な電磁場を受信する必要がある。受信フロントエンドにおける空心インダクタにおける損失は大きな問題となっており、形状の最適化など従来技術の延長では効率の向上に限界がきていた。

本研究では、まず東北大学島田らのもとで開発されていた高周波用軟磁性膜の整理と高周波インダクタ用材料として必要な磁気特性の検討をおこなった。その結果、①磁性膜の導電率を下げることで、膜の異方性磁場を上げ自然共鳴周波数を高周波側へ移すことがインダクタの特性上きわめて重要であること、②磁性膜の線形性を保つため磁区構造の単磁区化が理想的であることが明確になった。次に、有限要素法を用いた理論解析を実施した。まず、構造の創出からはじめ、半導体プロセスの終了後スパイラルコイルの上面に磁性薄膜を成膜するというきわめて単純な構造によって60%~70%のインダクタンス値の増大が得られることを明らかにした。磁性膜に必要な特性は、現状得られている比透磁率200~

300、導電率 10^5 から 10^6 S/m である。また、興味ある発見として、磁性薄膜の膜厚には最適値があり、膜厚をそれ以上に厚くしていくと逆にインダクタンスの値は急激に減少し空心インダクタよりも低くなることがわかった。この現象は、もともとコイル近傍の空間インピーダンスは低いが、金属磁性膜内の電磁場に対するインピーダンスはさらに低く、磁性薄膜が厚くなると表面で電磁場が反射され、磁性薄膜内部の磁場が膜厚増大の効果以上に減少することが原因である。このことから、より導電率の低い軟磁性薄膜の開発が極めて重要なことが推察される。

さらに、本研究で検討した構造のインダクタにおいて、軟磁性膜における比透磁率の虚数成分 μ'' の影響として $\mu''=40$ の磁性膜を用いた場合その抵抗値が1GHzで10%増加すること、変位電流の影響により電流と実効的なターン数が減少し、34%インダクタンス値が減少していることが知見として得られた。60%~70%のインダクタンス向上に対し抵抗増大は10%であることから、単純に計算するとQ値は45%~55%向上することが期待される。

本論文執筆時において得られているインダクタンス値の向上は、16%~17%であるが、成膜条件の最適化や磁性薄膜のパターン化により磁気特性の劣化を防ぐプロセス技術などを導入すれば、理論的に得られた60%~70%のインダクタンス値向上は十分可能と考える。

本章の最後に、物理的な構造と対応させた磁性薄膜集積化インダクタの等価回路を検討した。その結果、高抵抗基板と呼ばれる10 S/mの導電率のSi基板でも基板内で10%程度のエネルギー損失があること、磁性膜に誘起される電流による損失や逆方向磁場の発生はきわめて小さいなどの知見を得た。

高周波用集積化インダクタに磁性薄膜を用いる試みは、筆者と東北大との共同研究が世界で最初のもので、本章の研究で得られた結果は、後に米国Stanford大やフランスletiなどの各機関での磁性薄膜を用いた高周波インダクタ研究のさきがけとなったものである。

第5章は結論であり、本研究によって得られた結果をまとめ、将来への展望を述べた。

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	田邊信二
論文題目	電磁場解析に基づく携帯電話の受信感度向上に関する基礎的研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 山口 正洋 教授 中村 慶久 教授 荒井 賢一 教授 杉浦 行

論文審査結果の要旨

携帯電話の受信感度をより向上させるためには、高密度実装された回路モジュール間の電磁干渉の軽減と RF 回路における損失の低減が強く望まれる。本論文は金属薄膜や磁性薄膜を用いた新規な受信感度向上技術に着目し、表皮深さよりも薄い金属薄膜による電磁シールド設計法ならびに磁性薄膜を用いた受信フロントエンド MMIC 用 GHz 帯集積化インダクタの低損失化などについて、電磁場解析に基づく基礎的研究を行った成果をまとめたもので、全文 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、膜厚が薄く面内に広い導電性薄膜を含む系、および自然共鳴など磁気損失のある導電性磁性薄膜を含む系の高周波電磁場解析と回路解析を行うための数値解析ツールについて述べている。とくに有限要素法に関しては 6 面体 20 接点の多次有限要素の部分的な導入、問題に応じたゲージ条件の採用、Gauss の消去法による求解のための RAID 仮想記憶システムの導入などを特徴とする解析システムを構築している。これはアスペクト比 1:300 を越す導電性磁性薄膜の電磁場分布をいち早く高精度に解析可能としたもので、その手法の一部は現在汎用解析パッケージにも広く使用されている。これは重要な成果である。

第 3 章では、アンテナからの送信波と RF 回路との電磁干渉について検討している。まず電磁免疫ニティの最も弱いのは VCO から PLL への帰還部分であり -80dB のシールド量が必要なことを示し、電磁場の反射を主たるメカニズムとして表皮深さ以下の薄膜金属で所要のシールド量が得られることを明らかにしている。さらに、基板グラウンドとの接点数やアンテナの放射パターンなどを総合的に考慮し、実際の携帯電話に適用可能なシールド方式を提案している。これは実用上有用な成果である。

第 4 章では、インピーダンスマッチング用集積化薄膜インダクタに磁性薄膜を適用することにより、従来技術の延長では得られない画期的な損失低減を試みている。導電性を持つ磁性薄膜を用い GHz 帯において最大のインダクタンス値を実現するには、磁性薄膜内部における総磁束量を最大にする最適膜厚があること明らかにしている。スパイラルコイル上に磁性薄膜を成膜するだけの単純な構造により、従来と比べ 50% 以上高い Q 値を有する GHz 帯集積化薄膜インダクタの可能性を明らかにしている。これらは、GHz 帯集積化磁性薄膜インダクタの研究が世界に波及する契機となった重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、表皮深さよりも薄い導電性および磁性薄膜内部の電磁場分布を解析する手法を導き、これらの薄膜を用いた携帯電話の受信感度向上に関する新たな知見を与えたものであり、電気・通信工学ならびに磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

学力確認結果の要旨

平成 16 年 1 月 26 日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は電気・通信工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

論文審査結果の要旨

携帯電話の受信感度をより向上させるためには、高密度実装された回路モジュール間の電磁干渉の軽減と RF 回路における損失の低減が強く望まれる。本論文は金属薄膜や磁性薄膜を用いた新規な受信感度向上技術に着目し、表皮深さよりも薄い金属薄膜による電磁シールド設計法ならびに磁性薄膜を用いた受信フロントエンド MMIC 用 GHz 帯集積化インダクタの低損失化などについて、電磁場解析に基づく基礎的研究を行った成果をまとめたもので、全文 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、膜厚が薄く面内に広い導電性薄膜を含む系、および自然共鳴など磁気損失のある導電性磁性薄膜を含む系の高周波電磁場解析と回路解析を行うための数値解析ツールについて述べている。とくに有限要素法に関しては 6 面体 20 接点の多次有限要素の部分的な導入、問題に応じたゲージ条件の採用、Gauss の消去法による求解のための RAID 仮想記憶システムの導入などを特徴とする解析システムを構築している。これはアスペクト比 1:300 を越す導電性磁性薄膜の電磁場分布をいち早く高精度に解析可能としたもので、その手法の一部は現在汎用解析パッケージにも広く使用されている。これは重要な成果である。

第 3 章では、アンテナからの送信波と RF 回路との電磁干渉について検討している。まず電磁免疫性の最も弱いのは VCO から PLL への帰還部分であり -80dB のシールド量が必要なことを示し、電磁場の反射を主たるメカニズムとして表皮深さ以下の薄膜金属で所要のシールド量が得られることを明らかにしている。さらに、基板グラウンドとの接点数やアンテナの放射パターンなどを総合的に考慮し、実際の携帯電話に適用可能なシールド方式を提案している。これは実用上有用な成果である。

第 4 章では、インピーダンスマッチング用集積化薄膜インダクタに磁性薄膜を適用することにより、従来技術の延長では得られない画期的な損失低減を試みている。導電性を持つ磁性薄膜を用い GHz 帯において最大のインダクタンス値を実現するには、磁性薄膜内部における総磁束量を最大にする最適膜厚があること明らかにしている。スパイラルコイル上に磁性薄膜を成膜するだけの単純な構造により、従来と比べ 50% 以上高い Q 値を有する GHz 帯集積化薄膜インダクタの可能性を明らかにしている。これらは、GHz 帯集積化磁性薄膜インダクタの研究が世界に波及する契機となった重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、表皮深さよりも薄い導電性および磁性薄膜内部の電磁場分布を解析する手法を導き、これらの薄膜を用いた携帯電話の受信感度向上に関する新たな知見を与えたものであり、電気・通信工学ならびに磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。