

学 位 論 文 題 名

Planar electromagnetic metamaterials and their application
to microwave and millimeter-wave antennas

(平面電磁メタマテリアルとそのマイクロ波・ミリ波帯アンテナへの応用)

学位論文内容の要旨

マルコーニによって実用化されたワイヤレス通信は、半導体デバイスやアンテナの高性能化に支えられ、現在も発展し続けている。1979年に自動車電話サービスとして始まった携帯電話の月額基本料金は数万円であったのに対して、現在では数千円の料金で通話のみならずインターネット接続やGPSなどの高度な機能を利用することができるようになった。さらに、ノートパソコンにはIEEE802.11b、IEEE802.11aのような2.4GHz帯や5GHz帯を利用したワイヤレスLANシステムが標準的に搭載され、ユビキタスネットワーク社会の下地が出来上がってきた。しかしながら、これらのビットレートは11Mbps、50Mbpsである。光ファイバーによる有線LANでは、ギガビットイーサネット(1Gbps)が普及しており、さらに10ギガビットイーサネット(10Gbps)も商用化されている。有線LANとシームレスに接続するために、1Gbps以上のワイヤレス通信システムの開発が急務である。

ワイヤレス通信の需要が高まる中で周波数資源は有限であるため、より一層の周波数資源の高度利用が求められている。比較的余裕のあるミリ波帯の中でも100GHz以上の周波数帯は、アマチュア無線と電波天文のみが割り当てられており、上記のビットレートを達成する帯域を十分に確保できる。一方で、既に使用されているマイクロ波帯の再利用も重要な課題である。Federal Communications Commissionによって規定された3.1-10.6GHzのUWB(Ultra wide band)システムは最大で1Gbpsのビットレートが見込まれており、高速PAN(Personal area network)として期待されている。従って、これらのワイヤレスシステムに対応する小型・平面アンテナのニーズは高まっている。

一方、アンテナの小型化や高性能、高機能化を図る技術の一つとして、自然界に存在しない性質を模擬した電磁メタマテリアルに関する研究が活発化している。特に、インダクタンスとキャパシタンスから構成される伝送線路型メタマテリアルは、フォトリソグラフィ技術により作製でき、集積化に最適な構造である。しかし、これまでの研究はマイクロ波帯において狭い帯域を対象としており、UWBやミリ波帯における研究は非常に少ない。

このような背景のもと、本論文は、UWBおよびミリ波帯における電磁メタマテリアルの性能を明らかにすると共に、アンテナの小型化・高利得化を実現する。本論文は8章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の歴史的背景と目的を述べると共に各章の概要を記している。

第2章では、ワイヤレス通信の発展を支える高周波デバイス技術とそれを利用したマイクロ波・ミリ波集積回路について述べると共に、平面アンテナとアクティブ回路を同一基板上に集積化したアクティブ集積アンテナ (AIA) の特徴を概説している。

第3章では、本研究で対象とするメタマテリアルとして、左手右手系混在伝送線路 (CRLH TL) と周波数選択高インピーダンス面 (FSHIS) の性質と代表的な構造について述べると共に、それらを解析するための伝送線路理論を説明している。

第4章では、InP HEMT、コプレーナ伝送線路 (CPW) およびスロットアンテナから構成したミリ波帯 AIA 発振回路の設計手法および試作した回路の評価について述べる。有限差分時間領域 (FDTD) 電磁界解析により設計した AIA 発振回路は 110.6-111.6GHz において動作することを確認した。このとき、HEMT の電流を分布素子として近似する電磁界解析の誤差率は 1% 未満であり、本手法のミリ波帯における有用性を示している。さらに、AIA 発振回路を基にした振幅変調送信回路とショットキーダイオードを使用した包絡線検波型受信回路との間で、110GHz をキャリアとしたワイヤレス通信に成功した。

第5章では、InP HEMT 製造プロセス技術を用いた CRLH TL の設計および評価について述べている。CPW と MIM キャパシタからなる CRLH TL は遷移周波数を 100GHz とする平衡型になるように各素子の値が最適化された。この解析結果の分散特性は、測定結果に良く一致している。さらに、平衡型 CRLH TL を利用した共振器を試作し、共振周波数が線路長に依存しない零次共振を実現した。アンテナの占有面積を大幅に削減し、高価である InP HEMT 基板の利用効率の向上が期待できる。

第6章では、FDTD 法および実効媒質モデルによる FSHIS の理論解析について述べている。FSHIS 上で生じる同位相反射のメカニズムを説明すると共に、Sievenpiper らによって提案されたマッシュルーム構造と Zhang らによって提案されたパッチアレイ構造の特性を比較する。Sievenpiper 構造は電磁バンドギャップ (EBG) を有する可能性があるのに対して、Zhang 構造では EBG が現れない。これは FSHIS を反射板として利用した場合、アンテナの放射パターンに大きな影響を及ぼす。

第7章では、近接させた FSHIS 反射板のアンテナ放射パターンへの寄与を、UWB システムの帯域である 3.1 から 10.6GHz において、FDTD 法と実験から明らかにしている。ビア無しの FSHIS 反射板 (Zhang 構造) は正面方向のアンテナ利得を改善するのに対して、ビア有の FSHIS 反射板 (Sievenpiper 構造) は最低次の TM バンドが平坦となる帯域において、偏波とメインローブを変化させ、正面方向の利得を大幅に悪化させることが、FDTD 法によって予測された。これと同じ傾向は、実験結果からも確認した。この結果は、アンテナの帯域に応じて適切な分散特性を持つ FSHIS を設計することの重要性を示している。

第8章では、本論文の結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 野 栄 一
副 査 教 授 雨 宮 好 仁
副 査 教 授 橋 詰 保
副 査 教 授 本 久 順 一

学 位 論 文 題 名

Planar electromagnetic metamaterials and their application to microwave and millimeter-wave antennas

(平面電磁メタマテリアルとそのマイクロ波・ミリ波帯アンテナへの応用)

マルコーニによって実用化されたワイヤレス通信は、半導体デバイスやアンテナの高性能化に支えられ、現在も発展し続けている。1979年に自動車電話サービスとして始まった携帯電話の月額基本料金は数万円であったのに対して、現在では数千円の料金で通話のみならずインターネット接続やGPSなどの高度な機能を利用することができるようになった。さらに、ノートパソコンにはIEEE802.11b、IEEE802.11aのような2.4GHz帯や5GHz帯を利用したワイヤレスLANシステムが標準的に搭載され、ユビキタスネットワーク社会の下地が出来上がってきた。しかしながら、これらのビットレートは11Mbps、50Mbpsである。光ファイバーによる有線LANでは、ギガビットイーサネット(1Gbps)が普及しており、さらに10ギガビットイーサネット(10Gbps)も商用化されている。有線LANとシームレスに接続するために、1Gbps以上のワイヤレス通信システムの開発が急務である。

ワイヤレス通信の需要が高まる中で周波数資源は有限であるため、より一層の周波数資源の高度利用が求められている。比較的余裕のあるミリ波帯の中でも100GHz以上の周波数帯は、アマチュア無線と電波天文のみが割り当てられており、上記のビットレートを達成する帯域を十分に確保できる。一方で、既に使用されているマイクロ波帯の再利用も重要な課題である。Federal Communications Commissionによって規定された3.1-10.6GHzのUWB(Ultra wide band)システムは最大で1Gbpsのビットレートが見込まれており、高速PAN(Personal area network)として期待されている。従って、これらのワイヤレスシステムに対応する小型・平面アンテナのニーズは高まっている。

一方、アンテナの小型化や高性能、高機能化を図る技術の一つとして、自然界に存在しない性質を模擬した電磁メタマテリアルに関する研究が活発化している。特に、インダクタンスとキャパシタンスから構成される伝送線路型メタマテリアルは、フォトリソグラフィ技術により作製でき、集積化に最適な構造である。しかし、これまでの研究はマイクロ波帯において狭い帯域を対象としており、UWBやミリ波帯における研究は非常に少ない。

このような背景のもと、本論文は、UWB およびミリ波帯における電磁メタマテリアルの性能を明らかにすると共に、アンテナの小型化・高利得化を実現する。本論文は 8 章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章では、本研究の歴史的背景と目的を述べると共に各章の概要を記している。

第 2 章では、ワイヤレス通信の発展を支える高周波デバイス技術とそれを利用したマイクロ波・ミリ波集積回路について述べると共に、平面アンテナとアクティブ回路を同一基板上に集積化したアクティブ集積アンテナ (AIA) の特徴を概説している。

第 3 章では、本研究で対象とするメタマテリアルとして、左手右手系混在伝送線路 (CRLH TL) と周波数選択高インピーダンス面 (FSHIS) の性質と代表的な構造について述べると共に、それらを解析するための伝送線路理論を説明している。

第 4 章では、InP HEMT、コプレーナ伝送線路 (CPW) およびスロットアンテナから構成したミリ波帯 AIA 発振回路の設計手法および試作した回路の評価について述べる。有限差分時間領域 (FDTD) 電磁界解析により設計した AIA 発振回路は 110.6-111.6GHz において動作することを確認した。このとき、HEMT の電流を分布素子として近似する電磁界解析の誤差率は 1

第 5 章では、InP HEMT 製造プロセス技術を用いた CRLH TL の設計および評価について述べている。CPW と MIM キャパシタからなる CRLH TL は遷移周波数を 100GHz とする平衡型になるように各素子の値が最適化された。この解析結果の分散特性は、測定結果に良く一致している。さらに、平衡型 CRLH TL を利用した共振器を試作し、共振周波数が線路長に依存しない零次共振を実現した。アンテナの占有面積を大幅に削減し、高価である InP HEMT 基板の利用効率の向上が期待できる。

第 6 章では、FDTD 法および実効媒質モデルによる FSHIS の理論解析について述べている。FSHIS 上で生じる同位相反射のメカニズムを説明すると共に、Sievenpiper らによって提案されたマッシュルーム構造と Zhang らによって提案されたパッチアレイ構造の特性を比較する。Sievenpiper 構造は電磁バンドギャップ (EBG) を有する可能性があるのに対して、Zhang 構造では EBG が現れない。これは FSHIS を反射板として利用した場合、アンテナの放射パターンに大きな影響を及ぼす。

第 7 章では、近接させた FSHIS 反射板のアンテナ放射パターンへの寄与を、UWB システムの帯域である 3.1 から 10.6GHz において、FDTD 法と実験から明らかにしている。ビア無しの FSHIS 反射板 (Zhang 構造) は正面方向のアンテナ利得を改善するのに対して、ビア有の FSHIS 反射板 (Sievenpiper 構造) は最低次の TM バンドが平坦となる帯域において、偏波とメインローブを変化させ、正面方向の利得を大幅に悪化させることが、FDTD 法によって予測された。これと同じ傾向は、実験結果からも確認した。この結果は、アンテナの帯域に応じて適切な分散特性を持つ FSHIS を設計することの重要性を示している。

第 8 章では、本論文の結論を述べている。

これを要するに、著者は、自然界に存在しない性質を模擬した電磁メタマテリアルを導入したマイクロ波・ミリ波アンテナについて、周波数選択高インピーダンス面の動作メカニズムとアンテナ反射板としての効果を明確化するとともに、左手右手系混在伝送線路の InP 集積回路上への実装技術を提案している。これらの研究から、著者は電磁メタマテリアルを導入したマイクロ波・ミリ波アンテナの将来技術に関する有益な知見を得ており、エレクトロニクスの分野に貢献するところ大

なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。