

学 位 論 文 題 名

近距離高速ミリ波伝送システム構成法の研究

(A study on short-range and high-speed millimeter-wave wireless communication systems)

学位論文内容の要旨

ホーム/オフィスネットワークや非接触データ転送などの近距離無線伝送において、所要伝送速度は増加の一途を辿っている。マイクロ波帯を利用し 1Gbit/s を超える無線 LAN(Local area network) 装置は既に商品化され始めているが、例えば非圧縮映像伝送などの大容量データ伝送用途には、さらに高速な数 Gbit/s 以上の速度が求められ、その実現には利用可能帯域幅の潤沢なミリ波を利用することが必須の状況である。ミリ波においては、世界各地域で 60GHz 帯に 9GHz 幅の潤沢な免許不要帯域が整備されており、また、半導体プロセス技術向上に伴い 60GHz 帯で動作可能な集積回路の実現性が高まっている。こうした背景から、近年 60GHz 帯を使用した民生用高速無線システムの標準化と実用化が進展しているが、それらの方式では、上記の 9GHz の帯域幅すべてを利用し約 28Gbit/s の伝送速度を得るにとどまっており、100Gbit/s を超える伝送速度の具体的な実現方式について検討が進んでいないため、さらなる高速伝送が求められるであろう将来を見据えた、超高速無線伝送方式を開発することが課題となっている。

無線通信における伝送速度高速化には、大別して 3 つの手法がある。第 1 に、単位時間に伝送するシンボル数を増加させ広い周波数帯域幅を利用する手法、第 2 には、1 シンボルで伝送する情報量を増大し周波数利用効率を高める手法、そして第 3 には同一周波数を利用し空間的に多重化を行うことで周波数利用効率を高める手法がある。60GHz 帯無線システムにおいて、変調方式多値化のみに依存した高速化手法は電力効率を考慮すると限界がある。送受信アンテナが正面で対向した近距離伝送において 100Gbit/s の伝送速度を得るには、MIMO(Multi Input and Multi Output) 技術を適用した空間多重化伝送により周波数利用効率を高める手法が有用と考えられる。この方法で 100Gbit/s を超える超高速伝送無線伝送システムを実現するためには 2 つの技術の構築が課題である。第 1 には、(1) 近距離超高速伝送実現のための空間多重伝送技術、第 2 には装置実現に必要な (2) 小型 RF(Radio Frequency) フロントエンド実現のための技術である。

そこで、本研究は、60GHz 帯の潤沢な帯域と空間多重伝送を活用することにより近距離で 100Gbit/s 以上の超高速伝送を実現する方式を新たに提案し、その基本伝送特性を明らかにし、アレーアンテナ構成方法、消費電力低減のための多重化処理方式を提案、検証する。

また、上記近距離超高速伝送方式実現のためのハードウェア構成技術として、小型の 60GHz 帯 RF フロントエンドを実現するため、アンテナ一体型システムオンパッケージ技術を確立する。また、その構成要素技術として実装面積を低減する多層構造バンドパスフィルタ設計方法を提案し、低実装面積・多段共振型フィルタ設計法としての有効性を示す。RF フロントエンドの電力高効率化のための要素技術として、3 倍波位相の制御機構を有する F 級電力増幅器基本構成法を新たに提案し、実験により 3 倍波位相制御の効果を評価する。

本研究の成果は、免許不要で利用可能な 60GHz 帯を利用し、近距離・非接触状態で 100Gbit/s の超高速データ伝送を実現するシステム構成方法と、そのために必要な小型高集積 RF フロントエンド

構成のための技術を明らかにするためのものである。

本研究はミリ波を用いた 100Gbit/s 近距離超高速無線伝送システムをターゲットとしているが、本研究の成果には一般性がある。たとえば、提案する空間多重伝送方式は、ミリ波以外の周波数にも適用可能であり、マイクロ波を利用し、コンクリート壁を透過した高速光ファイバ回線引き込みを可能にする壁面透過リピータや、固定マイクロ波通信や固定無線アクセスに MIMO 伝送を適用し大容量化することが可能である。また、ミリ波小型 RF フロントエンド実現のための技術は、現在実用化に向けた動きが活発化している 60GHz 帯無線 LAN 用で 60GHz の全帯域をカバーしたデバイスへ適用できる。

第 1 章は本論文の序論であり、ここでは、本研究の目的と意義を示し、課題抽出、関連する研究の経過と本研究の位置付け、本論文の構成を説明する。

第 2 章では、近距離高速無線システムの標準化動向と実用化動向を述べる。また、その他のミリ波高速無線システム、ミリ波 RF フロントエンドモジュールの動向を述べる。

第 3 章では、100Gbit/s を超える近距離超高速無線伝送のための方式として、ミリ波帯における近距離 MIMO 伝送方式を提案する。無線伝送路の数値モデル化、アレーアンテナ構成の最適化、アレーアンテナ小型化のための偏波共用アンテナの有用性を検証し、100 Gbit/s を越える伝送容量を確保できる可能性を示す。さらに、近距離 MIMO における多重化信号処理簡易化の検討を行い、近距離 MIMO においては演算量が少ない多重化信号処理方式が有用であることを示す。また、さらなる演算量削減・小型低消費電力ハードウェア構成のため、アナログ RF 重み付け回路により多重化処理を実施する簡易復号方式を新たに提案する。本方式実現に向けて、最適重み付け行列を明確化し、重み付け回路の構成を新たに考案、マイクロ波スケールモデルによる有効性の検証と、重み付けの偏差による誤差影響の検証を示す。また、近距離 MIMO 伝送の応用として、非接触データ転送システムと壁面透過リピータへの適用を示す。最後に、今後の展望として、伝送路誤差補償方式、多重反射低減方式といった、実用化研究に向けた課題を示す。

第 4 章では、近距離高速無線システムへの適用を想定した小型高集積 RF モジュール構成のための技術を議論する。ミリ波システムオンパッケージ技術によるアンテナ一体型ミリ波モジュールを提案する。また、その要素技術として、実装面積小型化のため多層構造の基板を活用し、占有面積の小さいミリ波帯域通過フィルタを新たに提案し試作、実験結果を示す。さらにミリ波 RF フロントエンドモジュールを試作し、ベースバンド部を接続した小型ミリ波無線伝送装置を試作する。試作した伝送装置で 3.8Gbit/s の近距離高速無線伝送を実証するとともに、ミリ波高速無線伝送装置小型化開発の実績を述べる。また、数 Gbit/s の伝送速度の近距離高速無線伝送システムとしての実用化検討として、非接触データ転送システムへの応用について述べる。また、増幅器部分高効率化のための要素技術として、3 倍波位相の制御機構を有する F 級電力増幅器構成を新たに提案し、その動作について、マイクロ波スケールモデル実験により有効性を示す。2 倍波だけでなく 3 倍波の位相を制御することで効率を 70% から 80% に改善することを示す。

第 5 章は結論であり、本研究の内容と得られた成果を概括する。

学位論文審査の要旨

主査	教授	野島俊雄
副査	教授	宮永喜一
副査	特任教授	小柴正則
副査	教授	小川恭孝
副査	准教授	山本学

学位論文題名

近距離高速ミリ波伝送システム構成法の研究

(A study on short-range and high-speed millimeter-wave wireless communication systems)

ホーム/オフィスネットワークや非接触データ転送などの近距離無線伝送において、所要伝送速度は増加し続けている。マイクロ波帯を利用し 1Gbit/s を超える無線 LAN(Local area network) 装置は既に商品化されているが、例えば非圧縮映像伝送などの大容量データ伝送用途にはさらに高速な数 Gbit/s 以上の速度が求められており、実現のためには帯域幅が潤沢に確保可能なミリ波帯の利用が有望とされている。ミリ波においては、世界各地域で 60GHz 帯に 9GHz 幅の潤沢な免許不要帯域が整備されており、また、半導体プロセス技術向上に伴い 60GHz 帯で動作可能な集積回路の実現性が高まっている。こうした背景から、近年 60GHz 帯を使用した民生用高速無線システムの標準化と実用化が進展しているが、それらの方式では、上記の 9GHz の帯域幅すべてを利用し約 28Gbit/s の伝送速度を得るにとどまっており、100Gbit/s を超える伝送速度の具体的な実現方式について検討が進んでいないため、さらなる高速化が可能な、超高速無線伝送方式を開発することが課題となっている。

本研究は、60GHz 帯の潤沢な帯域と空間多重伝送を活用することにより近距離で 100Gbit/s 以上の超高速伝送を実現する方式を新たに提案し、その基本伝送特性を明らかにし、アレーアンテナ構成方法、消費電力低減のための多重化処理方式を提案、検証したものである。

第 1 章は本論文の序論であり、ここでは、本研究の目的と意義を示し、課題抽出、関連する研究の経過と本研究の位置付け、本論文の構成を説明している。

第 2 章では、近距離高速無線システムの標準化動向と実用化動向を述べている。さらに、その他のミリ波高速無線システム、ミリ波 RF フロントエンドモジュールの動向を示している。

第 3 章では、100Gbit/s を超える近距離超高速無線伝送のための方式として、ミリ波帯における近距離 MIMO 伝送方式を提案している。無線伝送路の数値モデル化、アレーアンテナ構成の最適化、アレーアンテナ小型化のための偏波共用アンテナの有用性を検証し、100 Gbit/s を越える伝送容量を確保できる可能性を明らかにしている。さらに、近距離 MIMO における多重化信号処理簡易化の検討を行い、近距離 MIMO においては演算量が少ない多重化信号処理方式が有用であることを示している。また、さらなる演算量削減・小型低消費電力ハードウェア構成のため、アナログ RF 重み付け回路により多重化処理を実施する簡易復号方式を新たに提案している。本方式実現に向け、最適重み付け行列を明確化し、重み付け回路の構成を新たに考案、マイクロ波スケールモデルによる有効性

の検証と、重み付けの偏差による誤差影響の検証を示している。また、近距離 MIMO 伝送の応用として、非接触データ転送システムと壁面透過リピータへの適用を示し、実用化研究に向けた課題を示している。

第 4 章では、近距離高速無線システムへの適用を想定した小型高集積 RF モジュール構成のための技術について論じている。ミリ波システムオンパッケージ技術によるアンテナ一体型ミリ波モジュールを提案し、その要素技術として、実装面積小型化のため多層構造の基板を活用した占有面積の小さいミリ波帯域通過フィルタを新たに提案し試作、実験結果を示している。さらにミリ波 RF フロントエンドモジュールを用いてベースバンド部を接続した小型ミリ波無線伝送装置を試作している。試作した伝送装置で 3.8Gbit/s の近距離高速無線伝送を実証するとともに、ミリ波高速無線伝送装置小型化開発の実績を示している。また、数 Gbit/s の伝送速度の近距離高速無線伝送システムとしての実用化検討として、非接触データ転送システムへの応用について述べている。また、増幅器部分高効率化のための要素技術として、3 倍波位相の制御機構を有する F 級電力増幅器構成を新たに提案し、その動作について、マイクロ波スケールモデル実験により有効性を示している。2 倍波だけでなく 3 倍波の位相を制御することで効率を 70% から 80% に改善することを明らかにしている。

第 5 章は結論であり、本研究の内容と得られた成果を概括している。

これを要するに、著者は、ミリ波を用いた近距離超高速無線伝送システムの回路構成技術に関して有益な新知見を得たものであり、無線通信工学分野の発展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。