

| | |
|------------|--|
| 氏名 | かね こ しん いち 金子 進 一 |
| 授与学位 | 博士 (工学) |
| 学位授与年月日 | 平成 13 年 9 月 12 日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 4 条第 1 項 |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻 |
| 学位論文題目 | マイクロ波帯サブキャリア光伝送システムの 高性能化に関する研究 |
| 指導教官 | 東北大学教授 伊藤 弘昌 |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 横尾 邦義 東北大学教授 中沢 正隆 |

論文内容要旨

サブキャリア光伝送システムは、伝送路である光ファイバの広帯域・低損失という優れた特性と、マイクロ波伝送系との優れた親和性から、マイクロ波の同軸を用いた伝送系を置きかえる用途に盛んに研究が行われている。とりわけ、近年のインターネットの爆発的な普及により、広帯域な無線アクセスシステムが求められてきており、マイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムは、広帯域な無線信号の伝送システムとして重要な役割を担っていくものと考えられる。本論文では、マイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムにおける光ファイバに起因する特性劣化について、そのメカニズムを明らかにするとともに定式化を行い、同システムの高性能化の方法を明らかにした研究成果をまとめたもので、全文 6 章で構成される。

第 1 章は序論である。第 2 章では、サブキャリア光伝送システムにおける性能評価パラメータとその劣化要因 (多重反射, 波長分散, および非線形) について述べるとともに、これら特性劣化要因に関する研究の歴史と現状の技術についてまとめた。

第 3 章では、信号光が伝送路内の複数の反射点で多重反射された場合に発生する、雑音および歪みの定式化と、サブキャリア光伝送システムへの影響の低減方法について検討を行った。検討を行った反射点は、光コネクタなどの集中定数的な反射点と、レーリー散乱のような分布定数的な反射点である。多重反射がシステム特性の劣化を引き起こすメカニズムは以下の通りである。光源である半導体レーザを注入電流により直接変調すると、強度変調のみならず、(強度変調と同期して) 光周波数も変調を受ける。このため、反射点で反射することなく通過した光と、多重反射された光とでは光の瞬時周波数が異なる。これらの 2 つの光をフォトダイオードにて 2 乗検波すると、受光後の電気スペクトルに、両方の瞬時光周波数のビートが雑音および歪みとして観測される。これが、多重反射によるシステム特性の劣化メカニズムである。このうち、多重反射による雑音については、自己遅延ホモダイン法として、既に様々な研究者により基礎理論の構築がなされていた。しかしながら、この基礎理論は半導体レーザの位相雑音を研究することが目的であったため、無変調状態でしか定式化されていなかった。この基礎理論を、実際のサブキャリア光伝送システムと同様に、半導体レーザに光変調を行った場合について適用し、システム特性への影響を定式化した。これにより、多重反射による遅延時間が光源のコヒーレント時間よりも長い場合には、両方の光の相関がなくなっているため雑音 (ビート雑音) に変換されてシステム特性に悪影響を及ぼし、光源のコヒーレント時間よりも十分に短い場合には、両方の光に相関があ

るため変調歪みに変換されてシステム特性に悪影響を与えることを明らかにした。なお、本研究により、多重反射によって変調歪みが発生することを初めて明らかにした。また、本研究では、低周波（10kHz）の周波数変調を施すことにより多重反射による雑音の影響を低減する方法を提案した。この方法は、周波数変調を行うことにより、等価的に大きな位相雑音をもつ（単位帯域当りの雑音電力が小さい）光源とすることにより、位相雑音が強度雑音に変換された場合においても、雑音電力が広い帯域に分散されるため、システム特性への影響を低減するものである。なお、この方法は、低周波の周波数変調の効果が大きいことに着目し、僅かな強度変調により、大きな光周波数変調を得て、効果的に等価的な位相雑音を大きくしている。本方法の有効性を理論および実験により検証した。これはマイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムの長距離化に有用な結果である。

第4章では、光ファイバの波長分散により発生する分散歪みの定式化と、その分散歪みの補償方法について検討を行った。波長分散により歪みが発生するメカニズムは以下の通りである。半導体レーザを直接変調すると、チャープングにより、光電界スペクトルの中心周波数の近傍には信号周波数の整数倍の高調波成分を生じるが、伝送路に波長分散があると、それらの高調波の位相関係が崩れ、フォトダイオードで2乗検波しても各高調波成分が打ち消し合わず、受光後の電気スペクトルに高調波成分が現れてくる。これが、波長分散により歪みが発生するメカニズムである。このメカニズムに従って分散歪みの強度と位相を導出した。分散歪みの補償を検討するうえでは、分散歪みの強度のみならず位相も非常に重要となる。このため理論式の導出にあたっては、分散歪みの位相に影響を与える、強度変調に対するチャープングの位相を考慮した。導出した分散歪みの理論式は、分散歪みの測定結果を良く説明する。また、分散歪みの補償方法は、エタロン（干渉性光部品）を用いた光学的な補償方法である。これまでの分散歪み補償方法の研究の多くは、分散歪みと同強度・逆相の補償信号を予め電氣的生成して、分散歪みを打ち消す電氣的な方法である。しかしながら、マイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムでは、キャリア周波数が高周波であるため、電氣的な補償回路の実現が難しく、また、半導体レーザの発振原理に基づく注入キャリアとフォトンの相互作用により、高周波における強度変調波とそれに対するチャープングの位相関係、すなわち分散歪みの位相が、駆動条件により大きく変わるため、分散歪みと逆相の歪みを予め生成することが難しいという課題があった。このエタロンを用いた分散歪みの補償方法の有効性を理論的に予見するとともに、実験によりその検証を行った。最大 30dB の歪み補償効果が得られ、分散を有する伝送路での伝送の長距離化に有効であることを明らかにした。また、同一のエタロンを用いて、伝送距離の異なる条件での歪み補償実験を行い、広い範囲の分散値に対しても、歪み補償を行うことができることを明らかにし、同じ信号を（伝送距離の異なる）多くの加入者に伝送する放送型のシステムに対しても有効であることを示した。さらに、低周波変調によるレーリー散乱雑音の低減とエタロンによる分散歪みの補償が同時に実現可能であること、すなわち、光伝送路に分散があった場合にも、第3章にて述べた低周波変調によるレーリー散乱雑音の抑圧方法は、光周波数偏移量を最適化することで、システム特性の改善に有効であることを明らかにした。

第5章では、光ファイバの非線形光学効果（誘導ブリュアン散乱）がサブキャリア光伝送システムに及ぼす影響について実験的に検討を行った結果をまとめている。誘導ブリュアン散乱によりシステム特性が劣化するメカニズムは以下の通りである。誘導ブリュアン散乱は、入射光が伝送路である光ファイバの格子振動である音響フォノンを発生させ、それが屈折率の周期的な変化を作り出し、この屈折率の回折格子によって入射光自体がブラッグ回折をうける現象であるが、入射光パワーが小さい場合には、

この屈折率の変化は小さく、誘導ブリュアン散乱は起こらないため、光ファイバを出射光パワーは、単純に光ファイバの伝搬損を差し引いたものになる。一方、入射光強度がブリュアン閾値以上になった場合には、入射光によって発生された屈折率の回折格子により、入射光自体がブラッグ回折をうけ、大きな後方散乱を起こす。このため、光ファイバを出射する光パワーは光ファイバの伝搬損から求められる値よりも小さくなる。このため、入射光のパワーにより、光ファイバの透過率が異なる。これは、出力関係が非線形になることを意味し、誘導ブリュアン散乱が起こったときには非線形歪みが発生することになる。これが、誘導ブリュアン散乱により歪みが発生するメカニズムである。また、誘導ブリュアン散乱が発生した場合には、入射光によって誘起された屈折率の回折格子により、入射光に対する反射率が大きくなる。このため、ちょうど第3章において検討した分布的な多重反射と同様なことが起こり、入射光の位相雑音が強度雑音に変換される。これが、誘導ブリュアン散乱によって雑音が発生するメカニズムである。従来、半導体レーザを直接変調した場合においては、チャーピングが起こるためにブリュアン閾値が上昇し、誘導ブリュアン散乱の発生が抑えられ、システム特性に、あまり影響を与えないと考えられてきた。しかしながら、マイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムにおいては、信号周波数（キャリア周波数）が高いため、大きなチャーピングが発生したとしても、FM変調指数は大きくなる。このため、変調に伴うサイドバンドの広がり小さく、誘導ブリュアン散乱の影響を受けやすいことを予見し、実験的に検証を行った。この結果、マイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムにおいては、半導体レーザを直接変調し、チャーピングが発生したとしても、外部変調器を用いた場合と同様に、誘導ブリュアン散乱の影響を強く受けることを明らかにした。これは、従来になかった新たな知見である。さらに、低周波の周波数変調を施すことにより、光源の等価的なスペクトル線幅を広げ、ブリュアン閾値を上げることで誘導ブリュアン散乱の発生を抑圧し、特性劣化の無い良好な伝送が行えることを実証した。

第6章は結論である。

マイクロ波帯サブキャリア光伝送システムは、伝送媒体としての光ファイバの優れた特性を利用したマイクロ波信号の伝送システムであるが、以上のように、光ファイバに起因する様々な特性劣化が発生する。このため、伝送可能な距離および光出力が制限され、典型的な条件では、それぞれ16 km, 9 mWに抑えられていた。本研究では、これら特性劣化要因の発生メカニズムを明らかにするとともに、システム特性の改善の方法を明らかにし、伝送可能な距離および光出力を50 km以上、50 mW以上と、大幅な高性能化が図れることを示した。

審査結果の要旨

サブキャリア光伝送システムは、伝送路である光ファイバの広帯域・低損失という優れた特徴と、マイクロ波伝送系との優れた親和性から、マイクロ波の同軸を用いた伝送系を置きかえる用途に盛んに研究が行われている。とりわけ、近年のインターネットの爆発的な普及により、広帯域な無線アクセスシステムが求められてきており、サブキャリア光伝送システムは、広帯域な無線信号の伝送システムとして重要な役割を担っていくものと考えられる。本論文では、サブキャリア光伝送システムにおける光ファイバに起因する特性劣化について、そのメカニズムを明らかにするとともに定式化を行い、同システムの高性能化の方法を明らかにした研究成果をまとめたもので、全文6章で構成される。

第1章は序論である。第2章では、サブキャリア光伝送システムにおける性能評価パラメータとその劣化要因（多重反射、波長分散、および非線形）について述べるとともに、これら特性劣化要因に関する研究の歴史と現状の技術についてまとめている。

第3章では、信号光が伝送路内の複数の反射点で多重反射された場合に発生する雑音および歪みの定式化と、光伝送システムへの影響の低減方法について述べている。この多重反射による雑音については、自己遅延ホモダイン法として半導体レーザの位相雑音を研究する目的から既に様々な研究者により基礎理論の構築がなされているが、無変調状態でしか定式化されていなかった。これらの基礎理論を、実際の光伝送システムと同様に光変調を行った場合について適用し、多重反射により変調歪みが発生することを初めて明らかにしている。また、低周波の周波数変調を施すことにより多重反射による雑音の影響を低減する方法を提案し、理論および実験により、その有効性を検証している。これらは有用な結果である。

第4章では、光ファイバの波長分散により発生する分散歪みの定式化と、その分散歪みの補償方法について検討を行っている。波長分散により歪みが発生するメカニズムを明らかにし、このメカニズムに従って分散歪みの強度と位相を導出している。この分散歪みの定式化の結果と、第3章で行った多重反射の考察から、波長分散による歪みを光学的に補償する方法を提案し、理論および実験により、その有効性を検証している。マイクロ波帯の変調信号に対しては、注入キャリアとフォトンの相互作用により、変調波と波長チャープの位相関係が大きく変わるため、分散歪みの位相も大きく変化する。この光学的な分散歪みの補償では、両者の歪みが常に逆相となり、様々な条件に対して安定的に歪み補償を実現している。これはサブキャリア光伝送システムの長距離化に関わる重要かつ優れた成果である。

第5章では、光ファイバの非線形光学効果（誘導ブリュアン散乱）がサブキャリア光伝送システムに及ぼす影響について実験的に検討を行った結果をまとめている。従来、半導体レーザを直接変調した場合においては、誘導ブリュアン散乱はシステム特性にあまり影響を与えないと考えられてきた。しかしながら、マイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムにおいては、変調に伴うサイドバンドの広がり小さいため、誘導ブリュアン散乱の影響を強く受けることを予見し、実験的に検証を行った。さらに、低周波の周波数変調を施すことにより、誘導ブリュアン散乱の発生を抑圧し、特性劣化の無い良好な伝送が行えることを実証している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、マイクロ波帯のサブキャリア光伝送システムの伝送路である光ファイバによる特性劣化要因に関する詳細な検討を行い、同システムの大幅な性能向上を予見・実証したもので、光電子工学および光通信工学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。