

博士学位論文審査要旨

2018年2月13日

論文題目： 光ビート法による高周波発生における光パルス圧縮を用いた出力増大に関する研究

学位申請者： 山口 剛史

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 戸田 裕之

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 大谷 直毅

副査：情報通信研究機構ネットワークシステム研究所
ネットワーク基盤研究室 主任研究員 菅野 敦史

要 旨：

周波数がわずかに異なる2つの光を同時に検出すると、その周波数差に等しい電気信号が出力に得られる。この光ビート法を用いたマイクロ波・ミリ波発生技術は、光マイクロ波発振器、W帯レーダー、テラヘルツ波発生など様々な分野への応用が期待されている。しかしながら本手法による高周波（RF）出力は、光検出器(Photo Detector: PD)への入力平均光パワーによって制限され、できるだけ高いRF出力パワーが求められる用途では問題となる。PDへの平均光パワーが同じであるとき、PDへの光パルス幅が短くなるとRF出力が増大することが報告されている。しかしながら、これまでに提案された手法は、分散減少ファイバを利用したり、光スペクトルを選択的に取り出すなど、構成が複雑で実現性に乏しい。本論文では、一定分散のファイバによる光パルス圧縮を行うことで同じ平均光パワーで高周波出力を増大させる手法を提案し、計算と実験によってその有効性を示した。

本論文の構成は以下のとおりである。第1章では本研究の背景、位置付けおよび本論文の構成について述べている。第2章では本研究の原理である光ビート法を用いた高周波発生について述べ、光ファイバによる光パルス圧縮を用いた出力増大の原理について述べている。第3章では、提案手法を用いたRF出力増大のシミュレーションおよび実験について述べている。20 GHz光パルスが通常の単一モードファイバを伝搬する時の様子を、一般化された非線形シュレディンガー方程式 (GNLSE) をスプリットステップフーリエ法で数値解析を行うことで求め、提案した簡易な構成で、現実的な光パワーで光パルス圧縮が行われ、RF出力が増大することをシミュレーションによって求めた。また、標準的な単一モード光ファイバを用いて光パルス圧縮を行い出力が増大することを実験で示した。さらに、提案手法による60 GHz出力増大のシミュレーションおよび出力増大実験を行った。第4章では、より高周波数の信号の発生に向けた検討をGNLSEのスケール則を用いて行った。現実的な光パワーで出力増大を得るためには、100GHzにおいては高非線形ファイバ、300 GHzにおいてはフォトリソグラフィ製シリコンフォトニクスファイバを用いる必要があることを明らかにした。第5章は、光ビート法によって生じた出力のSN比についての検討を行っている。ASE雑音を含む光信号がPDに入射された時、それらがPD出力の雑音の大きさにどの程度影響するかをシミュレーションし、信号品質の指標である信号対雑音電力比への影響を検証した。

以上のように、本論文は光ビート法に一定分散の光ファイバによる光パルス圧縮を用いて出力を増大させる方法に関して、シミュレーションおよび実験で検討を行ったものであり、本成果は、

今後ますます求められる高周波発生の高品質化, 高出力化に資するものである. よって, 本論文は, 博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる.

総合試験結果の要旨

2018年2月13日

論文題目： 光ビート法による高周波発生における光パルス圧縮を用いた出力増大に関する研究

学位申請者： 山口 剛史

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 戸田 裕之

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 大谷 直毅

副 査：情報通信研究機構ネットワークシステム研究所
ネットワーク基盤研究室 主任研究員 菅野 敦史

要 旨：

論文提出者は、現在理工学研究科電気電子工学専攻博士課程（後期課程）3年次に在学中である。本論文の主たる内容は、学術論文誌や国際会議・国内の学術講演会などへの発表を通じて十分な評価を得ている。総合試験は2018年1月20日10時より、約1時間にわたって提出論文に対する学術講演会（博士論文公聴会）が開催され、活発な質疑応答がなされたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに講演会終了後、審査委員により口頭試問を行った結果、十分な能力を有すると認定された。また、論文提出者は、英語の語学試験に合格しており、十分な語学力を有すると認められた。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 光ビート法による高周波発生における光パルス圧縮を用いた出力増大に関する研究

氏名： 山口 剛史

要旨：

マイクロ波・ミリ波およびテラヘルツ波帯域の高周波信号は様々なところで必要とされている。近年の高速光通信技術において、マイクロ波・ミリ波帯の信号の発生は欠かせないものである。また、この周波数帯を用いた無線通信にも用いられており、第5世代移動体通信システム (5G) においても高周波信号に関する各種技術が求められている。75 GHz ~ 110 GHz の W 帯信号は、宇宙通信、海面の様子や雲の状態等を測定するレーダ等に用いられており、車載レーダにもミリ波が用いられている。電波天文の分野では、サブテラヘルツ帯の信号の発生と光ファイバ無線技術によるアンテナへの信号の分配が必要とされている。また、ミリ波およびテラヘルツ帯の信号を用いた高速な無線通信技術が提案されている。このように、高周波帯信号の発生、伝搬技術はより高速でより正確な通信、観測、計測には欠かせないものであり、今後も高品質な高周波帯の信号が求められ続けるであろう。

このような要請から、高周波発生技術及び伝搬技術は必要とされており、さらなる発展が求められる。その上で、光技術を用いて高周波信号の発生、伝搬を行うことにどのような意味があるか。高周波発生の方から見れば、水晶発振器などを用いた電気的な発生方法がある。しかし一般に電気的な高周波発生法は雑音が高くなる。例えば、水晶発振器による高周波発生技術では、水晶振動子によって発生した MHz 帯の信号を逡倍することで高周波信号を得るが、逡倍する際に雑音が増大するという欠点がある。また、電気的な伝送路は一般に伝搬させる電気信号の周波数が高くなるほど損失が大きくなる傾向がある。そのため、低損失な高周波信号の伝搬技術が不可欠となる。

そこで、光技術を用いた高周波発生技術が提案されている。周波数の異なる光を光検出器に入力することで高周波信号を得る光ビート法が提案された。また、光ファイバを低損失の共振器として用いることで低位相雑音を実現できる光マイクロ波発振器が提案された。どちらの技術も、マイクロ波・ミリ波発生手法として実用化されている。さらに、高速応答をする UTC-PD を用いることでテラヘルツ波領域を含んだ高周波発生へ向けての応用が研究されている。また、高周波信号伝搬において、光ファイバを用いたファイバ無線技術 (Radio over Fiber: RoF) による低損失な伝送手法が提案されており、無線信号が届きにくい場所へ伝搬させる技術として実用化されている。

本論文では、これら光技術を用いた高周波発生および伝送技術において、高周波出力の増大という点に注目をした。光ビート法による高周波信号発生において、その出力の増大が求められている。例えば、W 帯レーダ技術において高出力電力が求められている。光ビート法において、高周波を光パルスに変換して光伝搬路を伝搬させたのち光検出器に入力して高周波信号を得る際、平均光パワーが同じという条件下で光パルスが狭くなると、高周波出力が増大することが報告され、理論的に検討されている。しかしながら、従来までの高周波出力増大法は構成が複雑であった。そこで、本論文ではより簡易な構成による高周波出力増大法を提案し、その検討を行う。

提案手法は以下のとおりである。光変調器によって発生した光パルスを分散性かつ非線形性を持つ媒質を伝搬させることで光パルス圧縮を行う。この媒質として光ファイバを用いる。光パルスのパワーが高い時に現れる光ファイバの屈折率の非線形性による自己位相変調と分散の効果

により光パルスが圧縮される。圧縮された光パルスを光パワーを等しくした後に光検出器に入力することで、光パルス圧縮を行わないときよりも光検出器の出力電力が増大するというものである。この提案手法の有効性を、シミュレーションおよび実験で確認した。提案手法を用いた実験において、その出力高周波信号の位相雑音を測定した。また、光ビート法により発生した高周波信号の品質にも着目し、光パルスの信号パワーおよび雑音パワーと高周波信号の信号雑音比の関係についても検討を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。第1章では本研究の背景、位置付けおよび本論文の構成について述べる。第2章は本研究の原理である光ビート法を用いた高周波発生、光パルスの伝搬および光パルス圧縮について述べる。その後、光ファイバによる光パルス圧縮を用いた出力増大法を提案する。第3章では、提案手法を用いたRF出力増大のシミュレーション及び実験について述べる。まず、10 GHz 短光パルスをPDに入射することでRF出力が増大することを確認した。次に、20 GHz 光パルスが通常の単一モードファイバを伝搬する時の様子を、非線形シュレディンガー方程式 (GNLSE) をスプリットステップフーリエ法で数値解析を行うことで求め、提案した簡易な構成で光パルス圧縮が行われることを実証した。パルス圧縮後の光パルスをPDに入射することでRF出力が増大することもシミュレーションによって求めた。また、実験によって光パルス圧縮により出力が増大することを実証した。さらに、提案手法による60 GHz 出力増大のシミュレーションおよび出力増大実験を行った。第4章では、より高周波数の信号の発生に向けたシミュレーションによる検討を行った。GNLSE のスケール則を用いた光パルス伝播の様子の推定、HNLF 等の高い非線形性を持つファイバを用いた提案手法による100 GHz, 300 GHz 発生が現実的な光パワーで実現できるかの可否を検討する。第5章は、光ビート法によって生じた出力のSN比についての検討を行う。ASE 光雑音を含む光信号がPDに入射された時、それらがPDの出力の雑音の大きさにどの程度影響するのかをシミュレーションし、雑音電力比 (SNR) への影響を検証した。最後に、第6章を本論文の結論とする。

以上述べたように本研究は、光ビート法における高周波発生における光パルス圧縮を用いた出力の増大および出力信号の評価、計算を行ったものである。この研究成果により、提案手法を用いて高周波出力が増大することが実証されたため、高出力な高周波信号の供給に資することになると考える。