

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02141

研究課題名(和文) 光2トーン信号アシストによるミリ波帯高周波信号の周波数下方変換と高感度計測

研究課題名(英文) Frequency downconversion and high-sensitivity measurement of millimeter-wave band RF signals with an assistance of optical two-tone signals

研究代表者

千葉 明人 (Chiba, Akito)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：30435789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光波に対する変調や検出を利用してミリ波帯高周波(RF)信号を計測する手法となる「光波アシストRF計測」を提案する。光波に対する高速変調を具現化する「進行波型電極構造」の特長を研究代表者が独自に開発した「光2トーン信号源」の特長と融合させ、ミリ波帯デバイスの高周波特性による限界から脱却した高精度の信号計測が可能となることを、実験・モデル解析の両面から実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高周波帯RF信号の計測は基本的にその周波数に共振する素子を利用して行われる一方で、当該周波数域において所望の性能を確保することが難しい場合もあり、計測限界の元となっている。本研究で提案する「光波アシストRF計測」は、被測定RF信号により光波を変調して被測定RF信号パラメータを光波に転写し、その光波と基準光波とのビートを検出して転写されたパラメータを抽出するというものである。検出するビート信号の周波数は、元々のRF信号周波数に対して大幅(～数kHz程度)にダウンコンバートされるため、被測定RF信号周波数帯の性能から脱却した信号評価が可能になる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we propose "lightwave-assisted radio frequency (RF) signal measurement" for characterizing a millimeter-waveband RF signal. The proposed method is based on high-speed modulation and detection technique of lightwaves, enabled by using an optical modulator with traveling-wave electrode structures and the features of "an optical two-tone signal source" developed by the Principal Investigator. By developing this approach through both sides of experiments and model analysis, we demonstrate this approach enables us to measure an RF signal with high accuracy, by avoiding the limitations in RF signal characterization caused by characteristics of millimeter-waveband devices in high-frequency region.

研究分野：光工学

キーワード：RFフォトリクス 光2トーン信号 RF信号 周波数下方変換 マイクロ波・ミリ波フォトリクス

1. 研究開始当初の背景

第5世代移動通信システムや車載用レーダ等の用途としてミリ波帯高周波 (RF) 信号の需要が今後増大すると見込まれている。その需要に応える基盤技術として、振幅や位相などの RF 信号パラメータ計測を高精度で行う手法の開拓も今後強く望まれていくとみられる。一方、光波の変復調技術は近年著しい進展を遂げ、振幅や位相・周波数などの各種パラメータに対する高速・高精度の光変復調を実現するデバイスの開発が進んでいる。更に通信網における光・無線融合技術も成熟し、各媒体の長所を活かした通信システムの実現も進んでいる。これらの点から、RF 信号計測の高確度化を実現するものとして成熟した光技術を駆使するアプローチに着目し、光波を媒介とする RF 信号計測手法 (光波アシスト RF 計測) を本研究課題として提案した。

2. 研究の目的

本研究課題では、光波に対する変調や検出を利用してミリ波帯 RF 信号を計測する手法となる「光波アシスト RF 計測」を提案する。「光波の変調と検出を媒介とする信号評価」により高周波デバイスの特性改善や高周波帯信号処理を回避して信号評価における確度の向上を図る。光波に対する高速変調を具現化する「進行波型電極構造」の特長を研究代表者が独自に開発した「光2トーン信号源」の特長と融合させ、ミリ波帯デバイスの高周波特性による限界から脱却した高確度の信号計測が可能となることを実験・モデル解析の両面から実証することを目指す。

3. 研究の方法

本節では提案手法の基本原則をまとめる。提案手法の主な点は次の2点である：「被測定対象とする RF 信号による単色光の位相変調」と「光位相変調信号の検出」との併用である。被測定 RF 信号で光波の位相を変調すると多数の光周波数成分 (光側帯波、光サイドバンド) が光波に含まれ、各光サイドバンドの振幅や位相には被測定対象の RF 信号振幅や位相が反映される。即ち光位相変調信号を評価すると被測定対象の RF 信号パラメータを評価できる。そのために、この光位相変調信号とは別の光波 (参照光) と干渉させその直接検波信号 (ビート) の低周波成分のみを評価する。参照光は、被測定 RF 信号と同じ周波数で単色光を位相変調して生成する。また参照光には、直接検波後に含まれる (被測定対象の RF 信号とは無関係の) 直流分と分離するために遅い光位相変動も付与する。その結果得られる直接検波信号の振幅には被測定対象の RF 信号振幅や位相が反映され、周波数は、付与した光位相変動程度 (kHz オーダ) となる。

4. 研究成果

(1) 提案手法のモデル解析と実験的検討

被測定 RF 信号の振幅や位相が光干渉信号に与える影響を定量的に把握した。その結果、被測定 RF 信号の振幅や位相を引数として含む次数ゼロの第一種ベッセル関数に依存する出力信号振幅が得られるとともに、被測定 RF 信号の位相が第二・第三象限に属する場合は出力信号の極性が反転するという知見も得られた (図1)。また被測定 RF 信号の振幅が比較的高めになると、被測定 RF 信号の位相が所定の範囲内であれば RF 位相変化に対して急峻な出力信号振幅変化を示すことも確認された。更に定式化により得られた結果を踏まえて、提案手法における最適条件の示唆も行うことができた。

モデル解析に対応する実験的検討も行った。テストベッドとする実験系を構築し被測定 RF 信号の周波数を 10GHz として信号を取得した。その結果、モデル解析結果により得られた予測を忠実に反映する実験結果 (図2・図3) を得ることができ、モデル解析の妥当性を実験的にも裏付けることに成功した。更に、検出した光干渉信号から RF パラメータを抽出する信号処理の手法を提示し、取得した実験データにその手法を適用して妥当性を示すこともできた。そして本提案手法において、光源のコヒーレンス (線幅) に

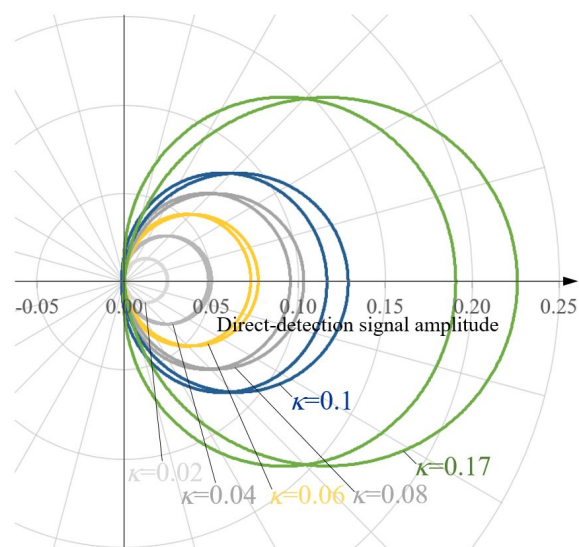


図1 提案手法により得られる直接検波信号の複素振幅の極座標表示。基準 RF 信号による光位相変調信号の誘導位相量 $\Delta\alpha$ は 2.405 とし、被測定 RF 信号の振幅比が 0.02–0.17 の場合。水平軸・垂直軸の方向は、基準 RF 信号に対してそれぞれ同相・直交位相の状態を示す。

対する要求も厳しいものではなく有用性は損なわれないことも確認できた。これらの結果をまとめた原著論文は当該分野において著名な学術雑誌に採択され、出版された。

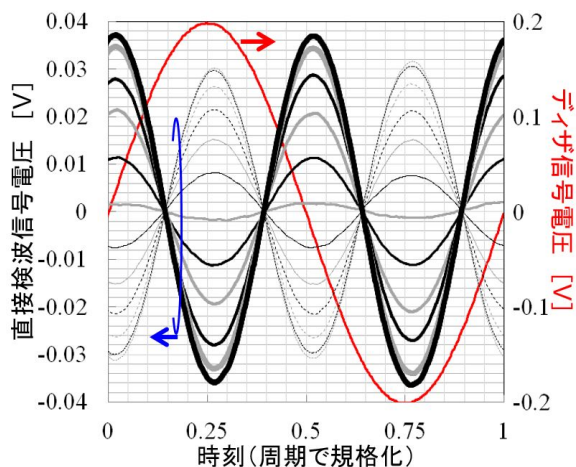


図2 実験系におけるディザ信号電圧(赤線)および直接検波信号の時間波形。太い黒線は位相差が -3° の時、線が細くなるにつれて被測定 RF 信号の位相を -15° ずつシフトさせた場合を示す。

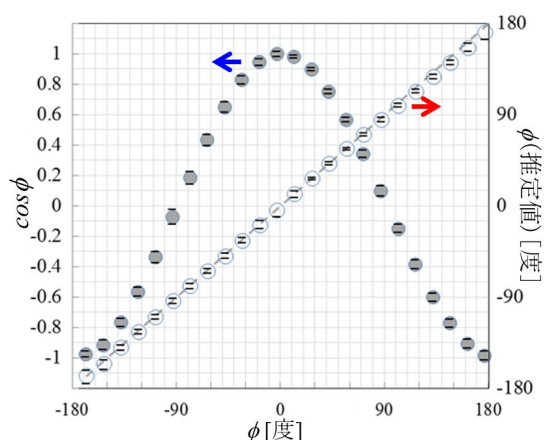


図3 図1の実測結果から推定した ϕ の余弦および ϕ 。

(2) RF 信号推定における動作のリアルタイム化

前述(1)の実験では、測定結果から RF 信号の位相を推定する処理は、いわゆるオフライン処理に留まっていた。そのため推定結果を得る際には計算機の処理時間などによる遅延を伴うことになり、実時間動作が懸案として残されていた。そこで、検出した光干渉信号から RF 信号パラメータをリアルタイムで抽出する信号処理の検討を進めた。具体的には、RF 信号の位相差の余弦に応じて得られる低周波(：数 kHz)信号の振幅を DC 電圧に変換する電子回路を実装(図4)し、所望の動作がリアルタイムで得られることを確認した。またこの機構を提案手法の実験系に組み込み、被測定 RF 信号の位相差に応じたアナログ出力電圧を取得することにも成功した(図5)。パラメータ推定のリアルタイム動作は、実用上不可欠となるマイルストーンであり、その達成は特筆に値するものと考えられる。得られた成果については、電子回路やシステムに関する国際会議で招待講演として解説する機会を頂くことができ、当該分野における学術的知見の蓄積に貢献できた。

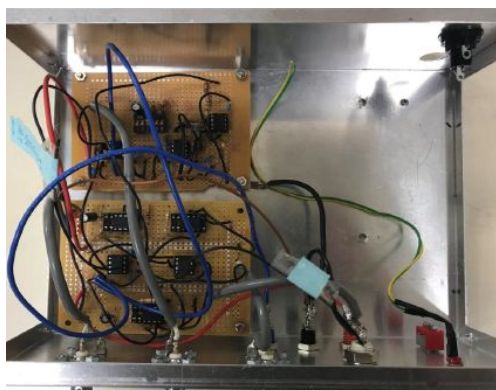


図4 試作した振幅評価装置の外観。

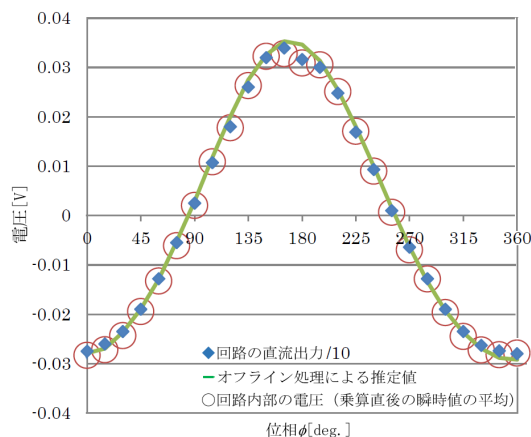


図5 直接検波信号を入力とした試作装置の直流電圧出力(菱形)内部電圧(乗算直後の瞬時値をデジタルオシロスコープで取得して得た平均値(数値);白抜きの円)、直接検波信号出力に対するオフライン処理から得た振幅(実線)。

(3) 光 2 トーン信号生成の最適条件の検討

本申請における提案のひとつは「光 2 トーン信号の利活用」であり、信号生成における最適条件の把握は課題の遂行において有用な知見と考えられる。そこで、光 2 トーン信号生成における最適条件を探索するために詳細なモデル解析を進めた。その結果、光 2 トーン信号生成条件を満たす k (：2 種の誘導位相量の比) や $\Delta\theta$ (：誘導位相量) の組み合わせは様々存在する一方で、入力 RF パワーに対する最適条件(効率の極大値)の存在などが見出された。モデル解析により得られた結果と実験的検討結果との整合性も示す事ができた。それらをまとめた原著論文は国際的なオープンアクセスジャーナルに採択されるとともに"Feature paper"として編集部に選ばれ公表され、この点も意義深いと考えられる。

(4) 基準 RF 信号周波数の低減

本申請の段階では、信号評価に利用する RF 信号周波数の低減を実現する技術的シーズとして我々が独自に開発した「周波数間隔が広い光 2 トーン信号源」を想定していた。しかしながら前述の(1)～(3)の検討を進める過程で信号評価手法を多角的な視点から検討した結果、基準 RF 信号周波数の低減を可能とする代替のアプローチの着想を得ることができ、その手法を模索した。シミュレーションに基づいてその妥当性を裏付けることに成功し、独自の手法を提案することができた。このアプローチや検討結果など一連の知見は当該分野に於いて知名度の高い国際会議で発表することができ、それに加え、当該分野に関連する国際会議で招待講演の機会を頂くに至った。コンセプトやモデル解析・実験結果などの一連を紹介することができ当該分野における学術的知見の蓄積に貢献できたと考える。

シミュレーションにより得られた結果を踏まえて、その実験的裏付けを試みた。具体的には、マイクロ波帯の周波数信号源の出力を参照 RF 信号として利用し、参照 RF 信号に対して周波数が 4 倍の RF 信号のキャラクタライゼーションを実験的に検討した。その結果、参照 RF 信号に対する被測定 RF 信号の振幅比や位相差を反映した kHz オーダーの低周波信号を実験的に得ることができ、シミュレーションにより得られた知見の妥当性を裏付ける事に成功した。また得られた低周波信号の波形解析により元の被測定 RF 信号の振幅比や位相差を推定することにも成功した。得られた知見は、高周波帯 RF 信号を直接検出せずとも信号の振幅比や位相差の推定が可能となる事を示唆するものとなるため、高周波デバイスの周波数特性に起因する推定精度の劣化を回避できるメリットも期待できる。得られた一連の知見は体系的で意義深いものになるとみられる。これらの点についても当該分野に関連する国際会議における招待講演の機会を頂くことができ、得られた知見の主な点を紹介することもできた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 T. Sakamoto and A. Chiba	4. 巻 39 (6)
2. 論文標題 Multiple-Frequency-Spaced and -Offset Flat Optical Comb Generation Using Multiple-Parallel Phase Modulator: Theory and Design	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B 39(6)	6. 最初と最後の頁 1644-1654
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAB.455652	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A.Chiba and Y. Akamatsu	4. 巻 9 (3)
2. 論文標題 Wavelength-Tunable Optical Two-Tone Signals Generated Using Single Mach-Zehnder Optical Modulator in Single Polarization-Mode Sagnac Interferometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photonics (MDPI)	6. 最初と最後の頁 194-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/photonics9030194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 千葉 明人	4. 巻 80
2. 論文標題 光の変調と検波を利用する高周波信号の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 HiKaLo技術情報誌	6. 最初と最後の頁 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 A. Chiba and Y. Sunaga	4. 巻 46
2. 論文標題 Complex amplitude estimation of monochromatic radio-frequency signal using frequency down conversion via direct detection of interfered optical phase-modulation signals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2646-2649
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.426425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Akito Chiba and Yusuke Sunaga
2. 発表標題 RF signal estimation utilizing low-frequency beat signal due to harmonics of phase-modulation lightwave
3. 学会等名 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Chiba
2. 発表標題 RF Parameter Estimation Using Lightwave Modulation
3. 学会等名 ICCCAS2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Chiba
2. 発表標題 RF parameter estimation assisted by phase modulation and detection of lightwave
3. 学会等名 ICCCAS2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Webpage of Akito Chiba https://chiba.ei.st.gunma-u.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	呂 国偉 (Lu Guo-Wei) (30599709)	会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授 (21602)	
研究分担者	坂本 高秀 (Sakamoto Takahide) (70392727)	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関