

令和 3 年 4 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01454

研究課題名(和文)非対称両側波帯光変調による無線信号周波数高速弁別

研究課題名(英文)Instantaneous Frequency Measurement by asymmetric double side-band optical modulation

研究代表者

川西 哲也(Kawanishi, Tetsuya)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40359063

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、広帯域信号に対する高速周波数測定を光変調技術により実現することである。変調により生じる側波帯の比から高周波信号の周波数を直読するシステムを提案し、光源や被測定信号の強度変動の影響を受けずに測定を可能とした。また、並列化することで、測定精度の向上や、周波数の直接的なデジタル信号への変換を実現する構成を提案した。これにより、掃引速度100nsの広帯域信号(13.5～14.5GHz)の瞬時周波数を相対誤差0.1%以下で測定することができた。本研究は電波の有効利用を実現するとともに、新たな信号計測の分野を拓くものと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近、広い帯域を使うレーダの開発が進んでいるが、時間、周波数の両方で見るとまだ利用されていない電波資源がある。しかしながら、高速で信号分析ができないことが障害となり、利活用に限界があった。本研究の成果はこれらのシステムにおいて時間・周波数軸で電波の空き状況を動的に検知し、電波の有効利用に大きな寄与をすることが期待される。また、周波数を高速で制御、測定する技術につながるので、科学分野での信号分析などへの応用も期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to realize instantaneous frequency measurement for broadband signals using optical modulation techniques. We proposed a system that directly reads the frequency of a high-frequency signal from the ratio of the sidebands produced by the modulation, enabling measurement without being affected by the intensity fluctuations of the light source or the signal to be measured. In addition, we proposed a configuration that improves the measurement accuracy and realizes direct conversion of frequency to digital signal by parallelization. As a result, we were able to measure the instantaneous frequency of a broadband signal (13.5-14.5 GHz) with a sweep speed of 100 ns with a relative error of less than 0.1%. We believe that this research will realize the effective use of radio waves and open up a new field of signal measurement.

研究分野：光無線融合分野

キーワード：光変調 広帯域 周波数 掃引 電波

1. 研究開始当初の背景

近年、GHz を超える帯域幅を占有する超広帯域無線システムの研究開発が進んでいる。例えば、自動車衝突防止用ミリ波レーダなどで広帯域にわたり動的に周波数が変化する信号の利用が広がりつつある。一方で、様々な用途での電波の利用は拡大し続けており、電波資源の有効利用や周波数共有が重要となり、非常に広い周波数帯域における動的な周波数測定が必要となってきた。スペクトラムアナライザなどの従来の計測器では測定に時間がかかり、レーダなどで利用が広がる周波数が高速に変化する信号などに対応することが困難であった。

本研究の目的はこのような高速で周波数が変化する信号の瞬時周波数測定 (Instantaneous Frequency Measurement: IFM) の実現である。スペクトラムアナライザや周波数カウンタなどの従来の周波数測定装置では測定に少なくともミリ秒オーダーの時間を要していた。これまでもマイクロ波帯においてレーダの傍受などの目的で

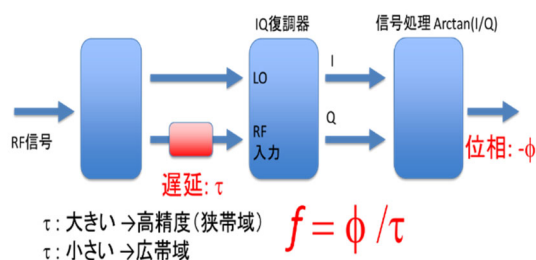


図1 従来型 IFM の基本構成

IFM 技術の開発がなされてきたが多数の受信器を並列するなどの複雑なシステムによるものが中心であった。より広帯域化するミリ波帯信号への対応は大きな課題であった。図1に従来型瞬時周波数測定 IFM の基本構成例を示した。RF 信号を2つ (LO 信号、RF 入力信号) に分け、一方に一定の時間遅延 τ を与えて、これらの信号を IQ 復調器でベクトル情報に変換する。IQ 復調器は LO 信号を基準としたときの RF 入力信号について、複素平面上での実部成分(In-phase: I)と虚部成分(Quadrature: Q)を与える。LO 信号と RF 入力信号には時間遅延による位相差 ϕ が発生する。この位相差 ϕ は I 成分、Q 成分に対して $\tan^{-1}(I/Q)$ の演算をすると得られる。周波数 $f = \phi / \tau$ の関係式から、RF 信号の周波数を求めるというのが動作原理である。基本原理は単純であるが広帯域信号に対応するためには IQ 復調器の広帯域化が課題である。また、 τ を大きくするとわずかな周波数差が大きな位相差となるために周波数測定の精度が向上するが、大きな周波数変化が発生すると、位相が 360 度以上回転し、測定値に不確実性が発生する。一方、 τ が小さいと精度は低下するものの、広範囲の周波数測定が可能となる。測定範囲と精度を両立するためには遅延量を変化させながら測定する、もしくは、図1に示す構成で異なる遅延のものを複数用いるなどが必要となる。

本研究ではこれらの課題を解決するための手法として光変調技術を用いた周波数測定技術の検討を行い、その原理を実証した。光も電波もともに電磁波であるがその周波数の大きな違いから制御性に大きな差があった。光ファイバ通信では制御精度よりも高速性が重視されてきたのに対して、無線分野では電波の有効利用のために様々な変調方式が駆使され高度な制御が実現していた。しかし、光ファイバ通信においても伝送可能な波長 (光周波数) 帯域幅をすでに使い尽くしつつあり、周波数利用率の向上が重要な命題となってきた。近年、高度な光変調技術が精力的に開発され、幹線系を中心に幅広く実用となっている。この結果、光波制御技術は元来の高速性に加えて、無線分野においても利用可能なレベルの精度が実現され、光・無線融合分野 (マイクロ波フォトンクス) が注目を集めている。従来技術では困難であった広帯域ミリ波信号の発生や配信が光ファイバをとおして可能となり、電波天文、計測技術などで実用となりつつある。これらの技術では光変調器もしくは高周波部

品にて周波数通倍が用いられることが多かった。広帯域信号発生に周波数通倍は極めて有効であるが、逆に任意の広帯域信号を逐次受信、分析するのは困難である。最新の計測器においてもリアルタイム分析可能帯域幅は数 GHz 以下ある。周波数軸上でエネルギーを散逸させる過程である周波数通倍は非線形性で実現できるが、その逆過程は単純な構成では実装が困難であることに起因する。光 SSB 変調器の出力光が RF 信号の位相差に敏感に応答し、その変化が容易に検出できるという特徴に着目し、広帯域無線信号の瞬時周波数測定への高速高精度光変調適用の可能性を検討した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広帯域信号に対する高速周波数測定を光変調技術により実現することである。変調により生じる側波帯の比から高周波(Radio Frequency: RF)信号の周波数を直読するシステムを提案し、光源や被測定信号の強度変動の影響を受けずに測定を可能とした。また、並列化することで、測定精度の向上や、周波数の直接的なデジタル信号への変換を実現する構成を提案した。周波数の情報が光出力として得られる点を活用したレーザ光源の周波数制御、位相制御への応用もあわせて検討した。本研究は、ファイバ通信向けに発展を遂げた光デバイス技術を積極的に用いて、電波の有効利用を実現するとともに、新たな信号計測の分野を拓くものと考えている。

3. 研究の方法

本研究では従来型 IFM のもつ IQ 復調器による帯域幅制限の問題を解決するために光変調による周波数弁別を実現した。高速光ファイバ通信向けに近年めざましく発展した光変調技術を積極利用する。光デバイスの高速性を活かし、周波数が高く、帯域幅が広い信号への対応を可能とした。図 2 に本研究で開発した IFM の構成を示した[。RF 信号を 2 つに分けて一方に遅延を与える部分は従来の IFM と同様であるが、性能の上限を与えていた IQ 復調器の代わりに光単側波帯(Single Sideband: SSB)変調器を用いる。光 SSB 変調器は 2 つの RF 入力を持ち、これらの信号の位相差が 90 度のときに変調周波数分だけ周波数が加算もしくは減算された成分のみを出力し、光周波数シフトとして機能する。周波数が加算された成分を上側波帯(Upper Sideband: USB)、減算された成分を下側波帯(Lower Sideband: LSB)とよぶ。位相差が 90 度以外の場合には出力光は USB と LSB の両方を含み、これらの比は位相差に依存する。位相差が 0 度または 180 度の場合には USB と LSB が等強度となるが、一般には異なる振幅をもつ。このような変調を非対称両側波帯光変調とよぶ。

これらの USB と LSB の比から位相差を求めて RF 信号周波数を算出するのが提案した IFM の動作原理である。光変調器の動作可能帯域は 50GHz 程度、光検出器の応答時間はナノ秒以下であり、測定時間の大幅な短縮が期待できる。また、USB と LSB の相対的な強度比のみを用いるので、光源や被測定信号の強度変動の影響を受けないという特徴がある。非対称両側波帯光変調を用いた IFM は広帯域性・高速性に加えて、周波数の情報が光信号として得られているという点

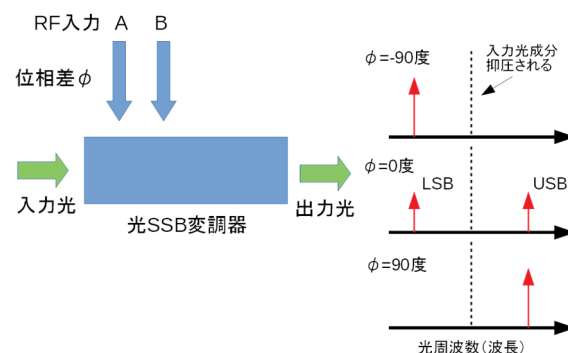


図 2 開発した IFM の動作

は広帯域性・高速性に加えて、周波数の情報が光信号として得られているという点

が特徴である。特に、側帯波の強度比の変化のみならず、出力において変調器入力からみて光周波数がシフトするという性質がある。特性をあらかじめ測定した適当な光フィルタを用いれば光周波数シフトの影響を受けることなく強度比を求めることができる。一方、この光周波数シフトを積極的に活用することで、光周波数、位相の安定化への応用が可能である。

4. 研究成果

本研究では新たな瞬時周波数測定方法として、光 SSB 変調で位相差を 90 度ではないときに発生する USB と LSB の比を用いた周波数測定を提案した。結果として掃引速度 100[ns]で 13.5~14.5[GHz]帯で相対誤差 0.1%以下で測定することができた。以下に実験で用いた装置や実測データについて説明する。上述したとおり位相差が 90 度のときには USB または LSB のみが出力として得られるが、90 度以外のときには両方を含み、一般には異なる大きさで、非対称両側波帯変調が得られる。図 3 に示すような任意波形発生器(Arbitrary Waveform Generator: AWG)と周波数変換器(ミキサやフィルタから構成される)からなる信号源で得られる、マイクロ秒以下の周期で周波数が変化する高速周波数掃引信号を用いた。USB または LSB を光フィルタで切り出し、その強度変化を光検出器(Photodetector)とオシロスコープで評価した。周波数測定の誤差となる要因として、変調器駆動部分の回路不整合や光信号検出部分の光フィルタ特性などがあげられる。

信号発生部分の特性をあらかじめ測定することで、周波数と位相差の関係を精度よく確定することが可能となる。さらに、光フィルタの波長特性の補正を入れた測定結果を図 4, 5 に示した。精度が大幅に向上し、掃引速度が高い場合においてもその精度の劣化が見られないことがわかる。光フィルタ特性の補正には CW 信号による測定を用いた。静的な波長特性データで高速掃引信号の瞬時周波数測定のための校正が可能であることがわかる。掃引時間 100ns の場合、補正前の周波数測定値誤差が 1.36%であったものを補正後 0.06%とすることができた。

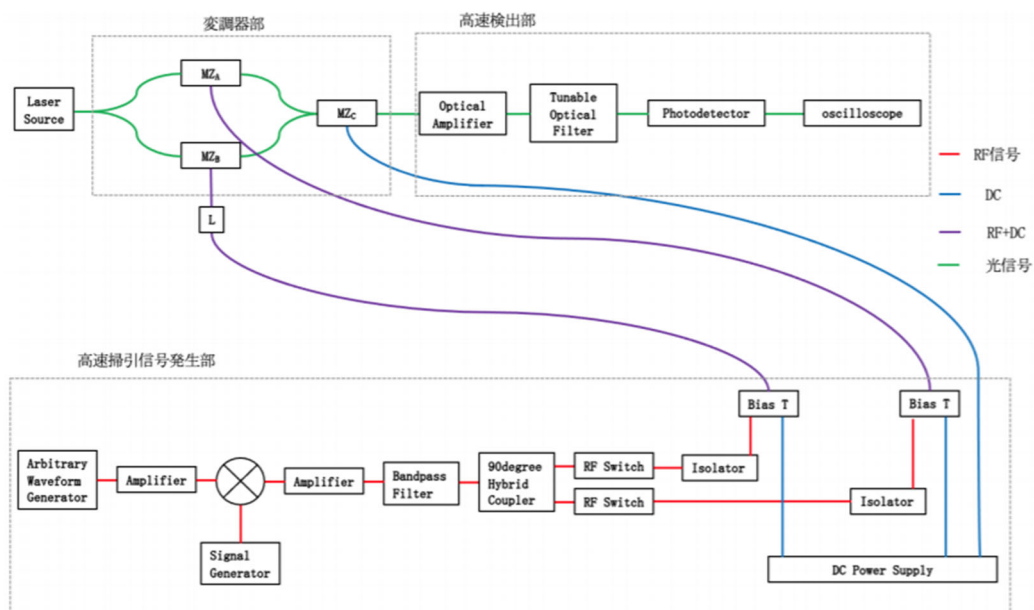


図 3 実験系の構成

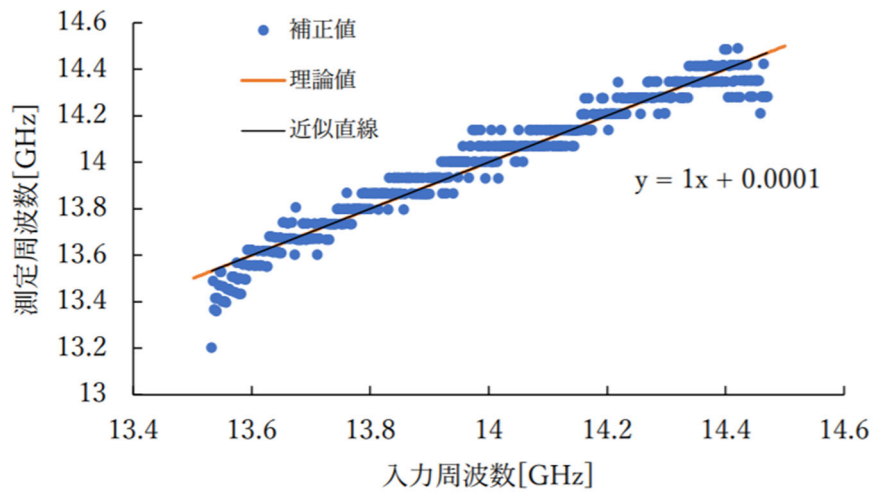


図 4 周波数測定結果（掃引時間 1ms）

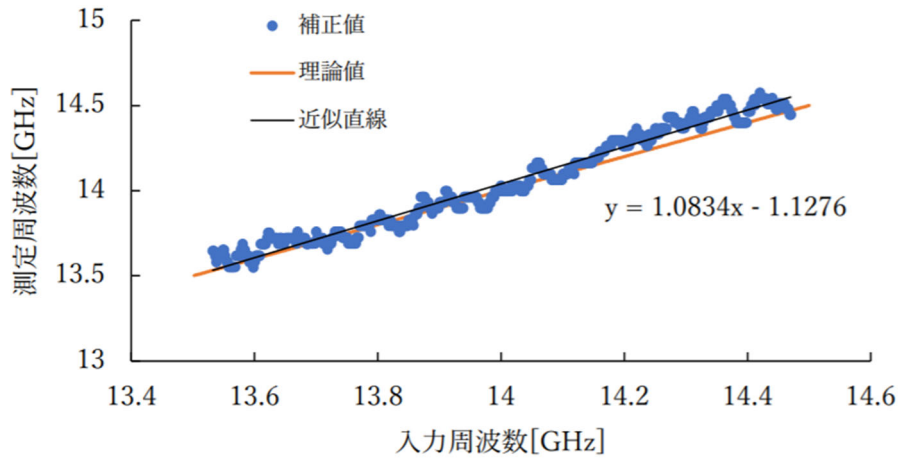


図 5 周波数測定結果（掃引時間 100ns）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 川西哲也	4. 巻 第 48 巻第 3 号
2. 論文標題 各種の伝送メディアの融合による将来アクセスネットワーク	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 116-120
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 Kawanishi Tetsuya	4. 巻 37
2. 論文標題 THz and Photonic Seamless Communications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 1671 ~ 1679
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2019.2897042	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 Kawanishi Tetsuya, Kanno Atsushi, Tien Dat Pham, Umezawa Toshimasa, Yamamoto Naokatsu	4. 巻 9
2. 論文標題 Photonic Systems and Devices for Linear Cell Radar	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 554 ~ 554
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app9030554	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6件（うち招待講演 6件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川西哲也
2. 発表標題 テラヘルツネットワークに向けた高速無線研究の動向
3. 学会等名 シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端VI」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川西哲也
2. 発表標題 有無線融合ネットワークの将来と光ファイバ伝送の役割
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川西哲也
2. 発表標題 テラヘルツ・ミリ波による超広帯域無線
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川西哲也
2. 発表標題 ミリ波・テラヘルツネットワークに向けたフォトニクス技術
3. 学会等名 電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川西哲也
2. 発表標題 Simple secondary radar for non-line-of-sight pedestrian detection
3. 学会等名 IEEE CAMA 2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川西哲也
2. 発表標題 Terahertz and photonics seamless networks
3. 学会等名 2019 IEEE Globecom Workshops (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	稲垣 恵三 (Keizo Inagaki) (60395085)	国立研究開発法人情報通信研究機構・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 (82636)	
研究分担者	坂本 高秀 (Sakamoto Takahide) (70392727)	首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	
研究分担者	菅野 敦史 (Kanno Atsushi) (20400707)	国立研究開発法人情報通信研究機構・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 (82636)	
研究分担者	山本 直克 (Yamamoto Naokatsu) (60328523)	国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム 研究所ネットワーク基盤研究室・室長 (82636)	

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
---------	---------