

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420397

研究課題名(和文) 自己結合信号の統計的処理によるリアルタイム信号処理装置の開発

研究課題名(英文) Development of real time signal processing device by statistical processing of self-coupled signal

研究代表者

津田 紀生 (Tsuda, Norio)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：20278229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年まで半導体レーザー(LD)の戻り光ノイズとして扱われていた、自己結合信号について研究を行った。自己結合信号にはホワイトガウシアンノイズ(WGN)が含まれており、データ量が多い。現在、自己結合信号の解析は、FFTが多く使われており、装置が高価で信号処理に時間がかかった。そこで、自己結合信号を、統計的に信号処理する事により、高速で安価な信号処理方法を確立した。また、自己結合信号の信号処理の応用として、レーザーマイクロホンの信号処理にも取り組み、低S/N信号内から音声信号を取り出す事に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have studied self-coupled signal, which was treated as return light noise of semiconductor laser (LD). The self-coupled signal includes white Gaussian noise (WGN), and this signal has a large amount of data. The self-coupled signals has been analysis using FFT, the equipment is expensive and takes time to process signals. Therefore, we newly proposed a method of statistically processing self-coupled signals. This method can process self-coupled signals at high speed and at low cost. Distance measurement was performed using this method. As an application of signal processing of self-coupled signals, we also worked on signal processing of laser microphones and succeeded in extracting audio signals from within low S/N signals.

研究分野：レーザー計測

キーワード：自己結合効果 リアルタイム処理 レーザー距離計測 端子間電圧変化

### 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザー(LD)の自己結合効果とは、LDが発光、干渉、受光の各機能を兼ね、70年代後半に三橋慶喜氏らにより自己結合効果と名付けられ、戻り光ノイズとしての抑制対象ではなく積極的に利用する信号としての研究が始められた。

その理論式は、 $L = n \cdot l/2$  で表される。この理論式から分かるように、LDは単一波長で発振しなければならない。その結果、測定対象からの散乱光が極めて微弱であっても、LDの内部に戻ると、LDの共振器内の見かけの反射率が増加することになり、レーザー出力がわずかに増幅する作用として説明される。しかも、自己結合効果によって生じた自己結合信号の周波数は、ノイズ信号にも関わらず距離に関する情報を持っている。

近年、VCSELタイプの面発光型レーザーが開発され、出力は小さいが、モードホップが抑えられ、単一モードで発振するようになり、自己結合信号を容易に得られるようになってきた。その結果、自己結合信号を利用した、距離計、速度計、振動計、変位計等の研究を進めた。しかし、まだ自己結合信号を利用した製品は存在しない。これは、自己結合信号にはホワイトガウシアンノイズ(WGN)が多く含まれており、データ量が大きく、高速で高価な専用DSP等を用いて信号処理しても、リアルタイム信号処理は難しい為である。また、自己結合信号が発生しているのかどうかについても、専用の回路を使って自己結合信号を取り出さないと判別できなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、LDの自己結合信号を利用した測定装置の開発において、深刻な問題となっている自己結合信号の新たな処理方法を提案し、実験装置を作成して確認する事である。

自己結合信号にはWGNが含まれており、データ量が多い。そこで、統計的手法を用いる事で、WGNと自己結合信号を区別し、データ量を減らす事により、自己結合効果の信号処理において、高速信号処理の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

自己結合効果が生じると、LDの端子間電圧が僅かに増減するので、LDの印加電圧を一定の割合で変調すると、LDの端子間電圧は一定周期で増減を繰り返す。これをMHPと呼び、MHPの周波数 $F$ は次式によって表される。

$$F = 4I_m f_m (1/\lambda^2)(d\lambda/dI)L \quad (1)$$

ここで、 $L$ はターゲットまでの距離、 $I_m$ は変調電流の振幅、 $f_m$ は変調波周波数、 $\lambda$ はレーザー発振波長、 $d\lambda/dI$ は変調効率である。

式(1)より、MHP周波数 $F$ は、ターゲットまでの距離、変調波周波数、および振幅に比例して変化する事が分かる。距離分解能はMHP1

つ分の長さに相当する。また、測定できる距離の限界はLDのコヒーレンス長によって制限される。距離を測定する場合は、VCSELを三角波電流変調し、LDの発振波長を線形的に変化させなければならないが、音波を測定する場合は、音波による屈折率の変化に伴いLDの光路長がわずかに変化する。その為、LDの駆動電流は一定とし、LDも一定の波長で発振すれば良い。

距離を一定とした場合、自己結合信号を端子間電圧から得る場合、占有値によるMHPの選定法から対象となる $T$ を決定できない。そこで、ターゲットまでの距離が近い場合、周期の分割が発生しやすく、ターゲットまでの距離が遠い場合、 $T$ より長い周期の信号が生じやすいという2つの特徴を利用した統計的処理を、全ての階級値に対して同時に実行する新たなデジタル信号処理を提案し、実現させた。

$T$ の最大値から最小値までの範囲を $2n-1$ の周期範囲で分けした場合、 $n$ は $T$ の最大値から最小値までの範囲に発生するMHP成分の分布の最大数であると言う特徴を利用した。

Fig.1(a)の概略図は、周期範囲の分けに関するものである。アナログ出力波形の揺らぎや、ノイズによる周期の分割により、複数のMHP成分の分布がヒストグラム上に発生する。距離が変化するとMHP周期は変化し、測定距離ごとにMHP成分の分布は異なる。距離測定ができる最短の時と最長の時、 $T$ の最大値付近の度数と最小値付近の度数が増加する。従ってヒストグラム上の $T$ の最大値から最小値までの範囲にMHP成分の分布が2つ表れる。また、測定可能な距離範囲の中間にターゲットがある場合、 $T$ の最大値付近の度数と最小値付近の度数が減少し、中央値付近の度数が増加する。この時、MHP成分の分布は1つだけになり、3つの周期区間( $n=2$ )に対して統計的処理を行う事で、MHP周期に相当する階級がある範囲を限定できる。測定では、各区間を $T_1, T_2, T_3$ とした。 $T_1$ は最短距離のMHP周期に相当する周期から、最長距離のMHP周期の2倍に相当する周期である。 $T_3$ は最長距離のMHP周期に相当する周期から、 $T_1$ の1/2の範囲に相当する周期までである。 $T_2$ は $T_1$ の下限から $T_3$ の上限までである。そして、 $T_1, T_2, T_3$ のそれぞれに、 $T_i/2, 2T_i, 3T_i$  ( $i=1\sim3$ )に相当する階級範囲の度数を加算した。合計度数が最も大きい区間内にMHP周期に相当する階級があると限定できる。本測定システムでは、周期のヒストグラムの階級幅を $0.1\mu s$ とした。

MHP周期に相当する階級がある範囲から正確な $T$ を求めるには、ヒストグラム上のMHPが存在する階級間のデータを用いて、密度曲線を求める方法が適している。しかし、単純な四則計算や数値の比較処理より複雑な計算処理をFPGAで実現するのは容易ではない。

また、遠距離における MHP 周期の変化は短いので、距離の変化に対する測定信号の変化の確認が難しい。そこで、周期のヒストグラムを作成すると同時に、周波数のヒストグラムを作成し、最も発生確率の高い信号の周波数を距離に対する MHP 周波数として求めた。

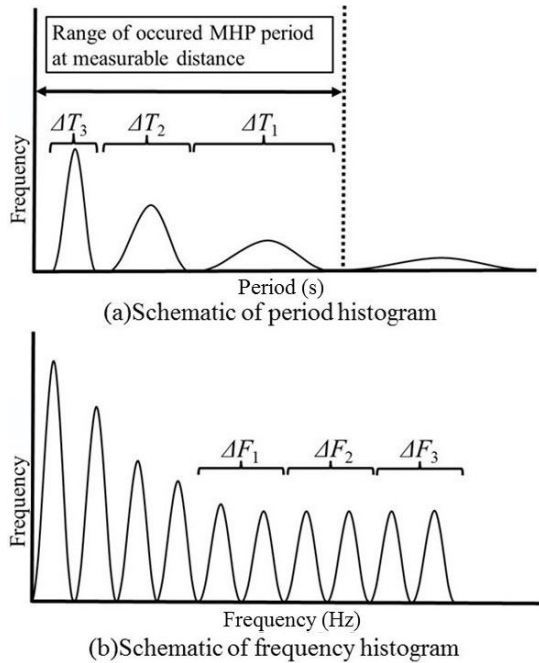


Fig. 1 Division of histogram. a) Most frequent section  $\Delta T_i(i=1\sim 3)$  is calculated by statistical processing for  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  and  $\Delta T_3$ . b) MHP frequency is most occurrence frequency in frequency section corresponding to  $\Delta T_i(i=1\sim 3)$ .

Fig. 1(b)は周波数のヒストグラムの概略図である。Fig. 1(a)の  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  がそれぞれ Fig. 1(b)の  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  に対応している。周波数のヒストグラムは、測定信号の周期を求めると同時に、測定信号の周期の逆数だけ求めて作成した。そのため、この処理による計測時の高速性に対する影響は少ない。また、MHP 周波数は距離の変化に対して比例関係を持つので、測定信号の変化を容易に確認できる。この方法では、MHP 周期に相当する階級がある周期区間に対応した、周波数区間  $F_i$  から MHP 周波数を求める。 $F_i$ を、一定の階級幅で分けられた確率分布であるとみなし、各階級を確率変数とする。度数を  $F_i$ 内の合計度数で割ったものと確率変数との積を信号発生確率と定義して、階級ごとに信号発生確率を求め、 $F_i$ 内で最も信号発生確率の高い階級を MHP 周波数として測定した。この方法は、単純な四則計算のみで全ての計算処理を実現出来、高速に自己結合信号を処理できる。

#### 4. 研究成果

距離測定の結果を Fig. 2 に示す。この結果

は、レーザー光を平行ビームにして、紙のターゲットに照射して結果である。図より近距離側で 20cm 以下の距離が測定出来ていない。これは、近距離になると  $T$  の分割数が多くなる為である。今回の回路設計ではフィルタの設定周波数から 20cm 以下の距離は測定しなかった。Fig. 2 の理論直線は 1 式を用いて計算した。Fig. 2 から、MHP 周波数が距離に対して比例的に変化している事から、出力信号内の全ての情報を利用した統計的デジタル信号処理による距離測定は可能である。平均誤差は約 2% で、平均ばらつき誤差は約 4% だった。

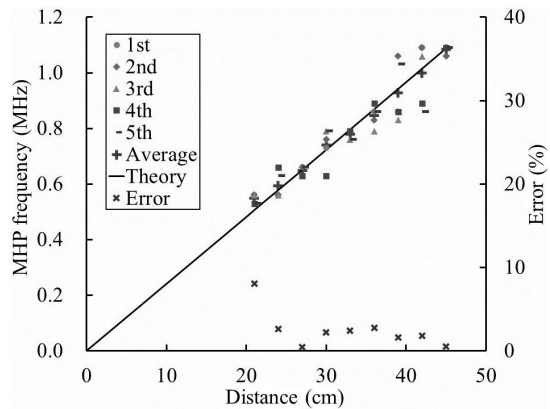


Fig. 2 Measurement result in measurable range.

今回の研究では、自己結合信号の統計処理として、LD の端子間電圧の変化分の中に含まれる全ての情報を利用したデジタル信号処理法を新たに提案し、距離に関する自己結合信号の高速処理を実現した。

最も信号発生確率の高い周波数成分を求め、MHP 周波数が距離に比例する事を確認した。この事は、LD の端子間電圧から信号として検出した全ての情報を利用した統計的処理を利用すれば、距離測定が出来る事を意味する。

測定精度は自己結合信号の FFT 解析を使用した測定方法の方が、少し精度が良いが、本測定方法は、複雑な信号処理をせず、距離測定に必要な自己結合信号の処理時間を FFT 解析より短くできる。従って、本測定システムは高速距離センシングシステムを必要とする場面での活用が期待できる。

今後は、新たな自己結合信号の処理方法を提案し、LD の端子間電圧から様々なものを測定してみたい。

一方、音波の周波数によって周期的に生じる粗密波により、レーザー光の光路長が僅かに変化する。この距離の信号を含む自己結合信号を FFT 処理し、音波の周波数を求めた。その結果、レーザマイクロホンは、音波がレーザー光軸上を通過する時に生じる距離の僅かな変化を捉える事に成功した。

LD の自己結合効果を利用した音波計測では、マイクロホンで一般的に使われる振動板

が無い為、理論的に 20Hz 以下の低周波でもマイクロホンの感度は低下せず、高周波側はレーザー光の直径により測定できる周波数が制限される事が分かった。またレーザーマイクロホンの感度は周波数依存性を持たず一定である事を解明した。また、集音装置等で、レーザー光軸上に音波を集める事で、マイクロホンの感度を改善した。

しかしながら、音声の情報を含む自己結合信号は、WGN 中に音声信号を含むので S/N が悪く、そのままでは音声聞き取れない。

そこで FPGA を使って自己結合信号の信号処理を行う事により、自己結合信号に含まれる WGN から音声信号を取り出し、聞き取る事に成功した。

今後は、レーザーマイクロホンに適した、S/N が悪い自己結合信号から音声信号を取り出す、信号処理法等を実現させたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

水嶋大輔, 吉松剛, 山口剛, 五島敬史郎, 津田紀生, 山田諄, 半導体レーザーの自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンの超音波帯域特性, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.137(3), 2017, pp.489-494  
DOI: 10.1541/ieejieiss.137.489

吉松剛, 五島敬史郎, 青木道宏, 津田紀生, 山田諄, 端子間電圧型自己結合レーザー距離センサに対する統計的信号処理, レーザー研究, 査読有, Vol.44(10), 2016, pp.679-683

水嶋大輔, 吉松剛, 五島敬史郎, 津田紀生, 山田諄, 半導体レーザーの自己結合効果を利用したレーザーマイクロホンによる音波検出, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol.136(7), 2016, pp.1021-1026  
DOI: 10.1541/ieejieiss.136.1021

[学会発表](計8件)

Takeshi Yoshimatsu, Norio Tsuda, Jun Yamada, Signal processing for distance measurement using laser voltage fluctuation due to self-coupling effect, 10th International Conference on Sensing Technology, 2016.11.12, Nanjing(China)

Daisuke Mizushima, Norio Tsuda, Jun Yamada, Study on Laser Microphone Using Self-coupling Effect of Semiconductor Laser for Sensitivity Improvement, IEEE SENSORS 2016, 2016.10.31, Florida(USA)

Daisuke MIZUSHIMA, Keishiro GOSHIMA, Norio TSUDA, Jun YAMADA, Sensitivity Characteristics of Laser Microphone using

Self-coupling Effect with Oscillation Mode of Laser Diode, The International Conference on Electrical Engineering 2016, 2016.7.5, Okinawa

Takeshi Yoshimatsu, Keishiro Goshima, Michihiro Aoki, Norio Tsuda, Jun Yamada, Low cost and real time signal processing of self-coupling distance sensor using fluctuation of terminal voltage, The International Conference on Electrical Engineering 2016, 2016.7.5, Okinawa

Daisuke Mizushima, Norio Tsuda, Jun Yamada, Characteristics of Laser Microphone using Self-coupling Effect of the Semiconductor Laser, The 5th Advanced Lasers and Photon Sources Conference ALPS '16, 2016.5.19, Yokohama

Takeshi Yoshimatsu, Keishiro Goshima, Michihiro Aoki, Norio Tsuda, Jun Yamada, Development of laser distance sensor by utilizing fluctuation of terminal voltage due to self-coupling effect, The 5th Advanced Lasers and Photon Sources Conference ALPS '16, 2016.5.19, Yokohama

Takeshi Yoshimatsu, Norio Tsuda, Jun Yamada, Study on Self-Coupling Terminal Voltage Sensor for Real-Time Measuring, The 5th International Conference on Engineering and Applied Sciences, 2015.7.22, Hokkaido

Takeshi Yoshimatsu, Norio Tsuda, Jun Yamada, Study on self-coupling sensor using terminal voltage change, The 4th Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS '15, 2015.4.24, Yokohama

[その他]

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

津田 紀生 (TSUDA, Norio)  
愛知工業大学・工学部・教授  
研究者番号: 20278229

### (2)研究分担者

五島 敬史郎 (GOSHIMA, Keishiro)  
愛知工業大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00550146

山田 諄 (YAMADA, Jun)  
愛知工業大学・工学部・名誉教授  
研究者番号: 30064950