

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630154

研究課題名(和文) 反射電磁波との共鳴現象を用いた周波数 変調方式変位/振動センサ

研究課題名(英文) Frequency delta sigma modulation position sensors based on a reflected electromagnetic wave resonance

研究代表者

前澤 宏一 (Koichi, Maezawa)

富山大学・理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：90301217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、対象物からの反射波との共鳴状態を作るマイクロ波/ミリ波帯発振器を用い、新しい原理に基づく変位/振動センサを実現することにある。この方式は、対象物の位置変位を共鳴によって得られた周波数の変化として 変調方式で取り込むため、広周波数帯域、高分解能、高ダイナミックレンジが期待できる。この実現のため、広帯域で発振可能な負性抵抗素子と、広帯域アンテナを集積する。本研究期間において、空洞共振器を用いたプロトタイプデバイスで動作原理を実証するとともに、発振器の位相雑音が周波数 変調に与える影響を定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research project aims to realize novel position/movement sensors based on a resonance of the emitted and reflected electromagnetic waves. This novel technique employs the frequency delta sigma modulation concept, where the movement is measured as a frequency change. As a result, it should have a wide frequency range, high resolution, and a large dynamic range. To demonstrate this concept, we integrate a wide frequency range antenna and a gain block, which can oscillate in a wide frequency range. In this research period, we demonstrated the operating principle using a prototype device consisting of a cavity resonator. Moreover, the effects of the phase noise in the oscillator on the frequency delta sigma modulation were clarified quantitatively.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：変位センサ 振動センサ 変調 FM信号 共鳴トンネル

1. 研究開始当初の背景

変位センサは、対象物の位置変化を測定するもので、基本的なセンサであるだけでなく、他のセンサの基盤となるセンサでもある。特に対象物の振動に着目すれば振動センサとなる。変位/振動センサには、静電容量や渦電流方式、圧電素子を用いたものなど、様々な方式があるが、その中でも最も分解能、ダイナミックレンジが高いのはレーザー干渉方式を用いたものである。この方式は、高分解能な測定を行えるが、干渉光学系を用いるため、サイズが大きく、アプリケーションに限られるという問題点があった。

一方、我々は、超高速デバイスである共鳴トンネル素子(RTD)とそれを用いた論理ゲート MOBILE (MONostable BInstable transition Logic Element) を研究する中で、これらに適した応用として方式の AD 変換器(ADC) の研究を行ってきた。方式は、入力信号を高周波の 1bit パルス密度変調信号に変換した後、ナイキストレートのデジタル信号に変換するものであり、高分解能、高ダイナミックレンジが特徴である。中でも、FM 中間信号を用いる FM 変調方式(周波数変調方式)の ADC は、高速化が高性能に直結し、MOBILE の応用に適している。この方式は、FM 信号の特徴を巧みに利用したもので、アナログ信号を FM 信号に変換すれば、その後はフィードバックなしでパルス密度変調信号が得られる。ミリ波帯域の FM 信号を生成できれば、高性能な AD 変換が可能である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、対象物からの反射波との共鳴状態を作るマイクロ波/ミリ波帯発振器を用いた新しい原理に基づく変位/振動センサを実現することにある。この方式は、対象物の位置変位を共鳴によって得られた周波数の変化として変調方式で取り込むため、広周波数帯域、高分解能、高ダイナミックレンジが期待できる。この実現のため、広帯域で発振可能な負性抵抗素子と、広帯域アンテナを集積する。本センサは、これまでの多くの変位/振動センサよりも高い性能をオンチップで実現できる。最も高分解能な変位/振動センサであるレーザー干渉型変位計を超える性能をどこにでも設置可能な装置として実現できれば、そのインパクトは大きい。

3. 研究の方法

本研究では、このような背景の下に、図 1 に示す新しい方式の変位/振動センサを提案する。本センサの骨子は、超高周波素子をアンテナと集積化し、電磁波を対象物との間で共鳴させることにより、発振させることにある。これにより対象物の振動に対応する FM 信号を生成する。この FM 信号を高いサンプリングレートで 2 値化し、エッジ検出を行えば、パルス密度変調信号とすることができる。

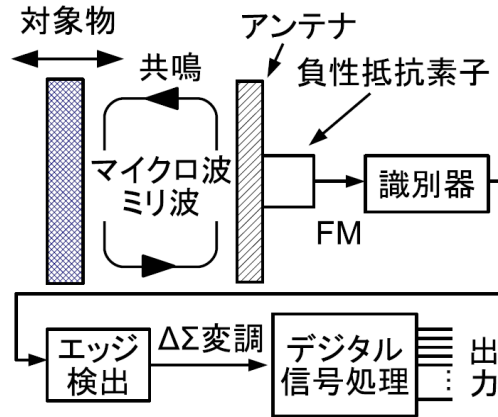


図 1 本研究で提案した変位/振動センサの概念図

これにより、高分解能、高ダイナミックレンジだけでなく、広周波数帯域のデジタル振動センサが実現できる。

本研究で対象とする測定距離は mm から cm 程度であるため、発振周波数もマイクロ波からミリ波となり、オンチップでの実現が期待できる。これにより、これまで困難であった様々な対象への応用が可能となる。本申請は、2 年間で、このプロトタイプデバイスを作製し、動作原理の実証を行うとともに高性能化の指針を得ることを目的とする。

4. 研究成果

本研究期間においては、まず、空洞共振器の一端を薄膜化し、薄膜の振動を FM 信号に変換できる発振器を作製し、本提案の動作原理を実証した。さらに、ここで明らかとなった問題点である、ノイズフロアについて理論及び、シミュレーションによる検討を行った。得られた成果を以下に示す。

(1) 空洞共振器による動作原理確認

図 2 に動作確認に用いた空洞共振器発振器の概念図を示す。空洞共振器の一端を、薄膜のメンブレンとし、もう一方を導体板で終端した構造となっている。導体板の外側には誘電体層を設け、その上にマイクロストリップラインを介して負性抵抗素子へ接続するこ

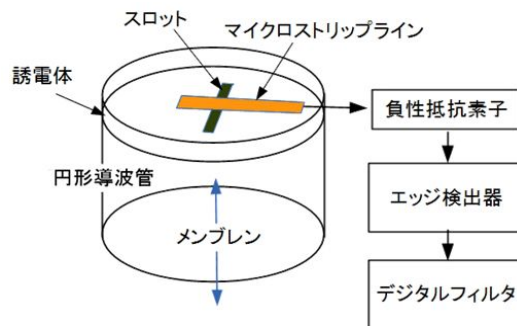


図 2 電磁界空洞共振器を用いた動作確認用プロトタイプ発振器

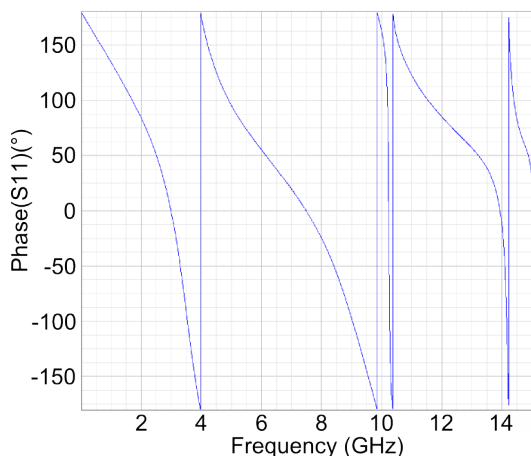


図3 空洞管の電磁界シミュレーション結果

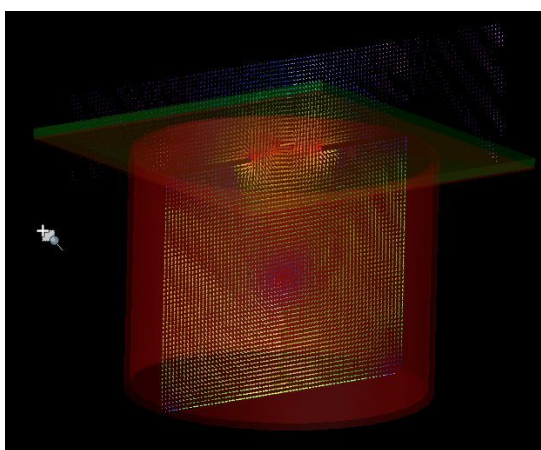


図4 空洞管内の磁界分布

とにより、発振器を構成した。この空洞共振器の電磁界は空洞の中心軸近辺で強く、メンブレンの位置に対して共振周波数は敏感に変化する。共振周波数がメンブレンの位置の関数となるため、メンブレンの変位に対応した FM 信号を生成できる。メンブレンの変位は音波により生じさせることができ、その場合、本試作発振器はマイクロフォンとして動作する事になる。

空洞共振器の設計には EMPro 3次元電磁界シミュレータ(Keysight Technologies 社)を用いた。導体部に銅、基板にはFR4を用いた。空洞管のサイズを内径 25mm、長さ 20mm、回路基板の銅厚さ 35 μm 、FR4 厚さ 1.6mmとした時の反射係数 Phase(S11)のシミュレーション結果を図3に示す。10.25GHz付近で鋭い位相の変化が見られる。この周波数における磁界分布を図4に示す。マイクロストリップラインの周囲の磁界がスロットから侵入し、空洞管内で共振状態を形成することが見てとれる。

この設計に基づいて発振器を作製した。発振器のアクティブデバイスとして、市販の HEMT (ルネサスエレクトロニクス社製 NE3514S02)を用いた。ゲート接地形構成を用

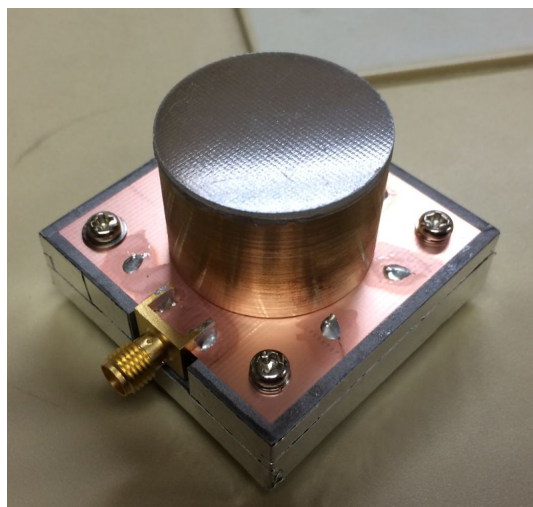


図5 作製したプロトタイプデバイス(固定端)

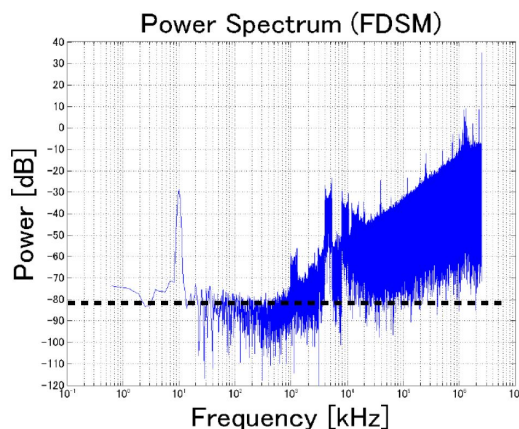


図6 出力スペクトル 入力信号は10kHz、点線は位相ノイズから計算したノイズフロア(後述)

い、ゲートスタブの長さを調整することにより、10GHz 付近でソース端に負性抵抗が生じるようにした。まず、図2のメンブレンの代わりに銅板で端面を閉じた構造で基本的な発振を確認した(図5)。設計通り、10.24GHzでの発振が確認できた。

次に、空洞管の片側の可動メンブレンとして、銅箔(1 μm)を用意した。これにスピーカーを使用して 10kHz の信号を与えた。発振器からの出力信号を、ミキサを介して 1GHz 程度にダウンコンバートし、ストレージオシロスコープでサンプリングした。その信号にコンピュータプログラムによる解析を行い、

変調信号を得た。出力のデジタル信号にFFTをかけた結果を図6に示す(サンプリング周波数は 5GHz)。10kHz に明瞭な信号ピークが確認できるとともに、4 桁近くに渡るノイズシェーピングが確認できた。この結果は、本研究の動作原理を実証している。

(2) 発振器の位相雑音の影響

FFT解析結果(図6)では2.5GHz から 300kHz 周辺までノイズシェーピング特性が見える

が、それ以下の周波数領域でノイズは減少せず、ノイズフロアが見られる。そのため、理想的な場合と比べて 40dB 近い S/N 比の劣化が生じている。この原因として位相雑音と考えられる。位相雑音は、周波数が揺れ動く雑音であり、周波数変調方式にとってはクリティカルなノイズである。

この効果を明らかにするために、ここでは発振器の位相ノイズを周波数間隔 f_0 で分布した多数の振動子による位相の変調としてモデル化した(図7)。この時、発振器の出力周波数は以下のように表せる。

$$f(t) = f_c + \Delta f \sin(2\pi f_{\text{sig}} t) + a_0 \sum_k \sin(2\pi k f_0 t + \phi_k)$$

ここで、 f_c 、 f 、 f_{sig} 、 ϕ_k は、それぞれ、FM 波の中心周波数、信号による周波数変調幅、信号周波数、振動子のランダムな初期位相である。この式は、周波数 1Hz あたり、 $a_0^2/(2f_0)$ のパワー密度を持つ白色ノイズが入力信号に加わったと解釈することができる(図7参照)。この白色ノイズは信号による周波数変調と区別できない。

このモデルを用い、FDSM のノイズフロア、発振器のジッタ、位相ノイズ、信号パワーの関係性を定量的に求めた。図5の出力スペクトルに、このモデルにより計算したノイズフロアを点線でプロットしてある。このモデルによる計算結果は実験値と良く一致しており、本解析の有効性を示している。

(3) アンテナ/反射板構造の検討

さらに、本研究の目的である、変位/振動センサを実現するための、アンテナ/反射板構造に関する研究を進めた。この構造は、上で述べた空洞共振器とは異なり、アンテナ、反射板の2つの構造からなる。そのため、対象物に影響を与えずに、振動、変位を測定することが可能となる。電磁界解析により、形状を設計し、それらのプロトタイプを作製した。さらに、これに対して、ベクトルネットワークアナライザによる S パラメータの測定を行い、目的とする周波数近辺で発振可能なことを明らかにした。現在、ゲイン回路を設計しているところである。

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)

[学会発表](計 6 件)

藤野舜也、水野雄太、山岡昂博、森雅之、前澤宏一、HEMT と空洞共振器を用いたデジタルマイクロフォンセンサ、2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2014 年 9 月 23 日、C-10-8、徳島

角谷祐一郎、森雅之、前澤宏一、型歪みセンサのための RTD 装荷カンチレバーの検討、2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2015 年 9 月 8 日、C-10-5、仙台

前澤宏一、角谷祐一郎、中山大周、田近拓

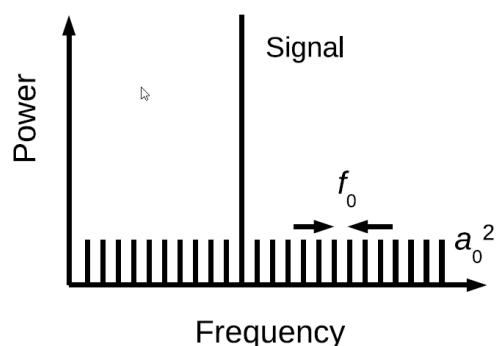


図7 周波数分布した多数の振動子による位相ノイズのモデル化

巴、森雅之、共鳴トンネル素子を用いた型歪みセンサ、電子情報通信学会電子デバイス研究会、2015 年 7 月 25 日、金沢

K. Maezawa, Y. Kakutani, T. Nakayama, T. Tajika, M. Mori, A resonant tunneling delta-sigma modulator and its application to strain sensors, 2015 Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE 2015), Smolenice, Slovakia, 8-10th June (2015)

前澤宏一、藤野舜也、山岡昂博、森雅之、周波数変調方式センサに対する位相ノイズの効果、2016 年電子情報通信学会総合大会、2016 年 3 月 15 日、福岡

山岡昂博、藤野舜也、山岸凌、山川雅暉、島田知輝、森雅之、前澤宏一、HEMT と空洞共振器を用いた型マイクロフォンセンサ、電子情報通信学会電子デバイス研究会、ED2015-129、2016 年 3 月 4 日、p45-48、北海道大学

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

前澤 宏一 (MAEZAWA Koichi)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：90301217

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

森雅之 (MORI Masayuki)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・准教授

研究者番号：90303213