

令和元年5月17日現在

機関番号：93901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14690

研究課題名(和文) 確率共鳴現象によるナノスケール・センサノードの通信感度改善

研究課題名(英文) Improvement of the communication performances in nano-scale sensor nodes exploiting stochastic resonance

研究代表者

田所 幸浩 (Tadokoro, Yukihiro)

株式会社豊田中央研究所・戦略先端研究領域 ナノセンシングプログラム・---

研究者番号：20446959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：ナノスケール・センサノードではその小ささから雑音の影響を強く受け、通信感度が低下するという本質的な課題がある。そこで本研究では、生物システム等でみられる確率共鳴現象という非線形物理現象を用いて課題解決に取り組んだ。2017年度では、アンテナ出力電流の非線形特性を生かすと現象が起こり、微弱な出力電流を簡易に増幅でき感度が改善される点を見出した。次年度ではセンサノードでの電波受信メカニズムに非線形性が存在するか否かを理論的に検討した。通信周波数と振動の共振周波数を少しずらすことで分岐現象が発生し、非線形振動が発生することを見出した。このような非線形性を活用することで本現象を活用できる可能性は高い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常、雑音を抑えるためにはローパスフィルタ等のフィルタリング、最尤推定などの信号処理手法がとられる。このような既存手法の雑音抑圧性能は理論的に保証されているが、その実現のためには追加の専用ハードウェアや高負荷な処理が必要となり、ハードウェアサイズに限りのあるナノスケール・センサノードでは採用できない。本研究では、問題となる雑音を逆に活かすという逆転の発想により検討を行い、簡易な雑音の抑圧、感度改善の可能性を見出した。これによりナノスケール・センサノードの感度改善の方策が一つ示されたことになり、今後の研究開発の指針として活用できるものである。

研究成果の概要(英文)：Due to ultra-small size of nanoscale sensor nodes, noise is one of the major issues for high-reliable communication and sensing. In this research project, we explored the possibility of suppressing the noise by exploiting a nonlinear phenomenon of Stochastic resonance. In the first year of this project, we focused on the radio-antenna, which is installed at the front-end of the communicating part of the nanoscale sensor nodes, and the output current was analytically demonstrated to be amplified by this phenomenon. In the second year, we found the nonlinear behavior in the mechanism of signal reception of the nanoscale sensor node. This behavior is the source of observing the phenomenon, which indicates the possibility of further improvements in the noise suppression.

研究分野：情報通信工学

キーワード：確率共鳴現象 ナノスケール機械振動子 電界電子放出

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoTに代表されるように、様々なセンサデバイスを通信ネットワークに接続して各種データを収集し活用する動きが日々強まっている。特にシステムサイズがサブマイクロスケールであるナノスケール・センサノードが実現すると、センサ形状やサイズにとらわれることなく様々な場所にセンサノードを配置して多種多様なデータが収集でき、これまでに見られなかった新しいサービス等の可能性を秘めている。

このような次世代のデバイス・アプリケーションの実現には、ナノスケールの非線形機械振動子(Nano-mechanical resonator: NMR) 技術の応用が期待される。本技術はここ数年、学术界を中心に世界レベルで活発に議論されており、各種物理量のセンシングが消費電力を抑えつつ、サブマイクロスケールのシステムサイズで高精度に可能なデバイスとなる。興味深いのはセンシングではなく信号処理にも応用可能であり、幾つかの検討がなされている。先行研究として、通常、cm オーダの大きさが必要になる MHz 帯信号の受信アンテナ(信号受信) 及び検波が 1 μ m 以下で実現できるとの報告がある。これによりセンシングのみならず、センシング結果を周辺端末に伝送する通信回路部もサブマイクロスケール化できることを示唆しており、センサノードの二大機能であるセンシングと通信が超小型化され、ナノスケール・センサノードの実現が視野に入り始めている。

2. 研究の目的

NMR を主体とするシステムではそのシステムサイズの小ささから雑音の影響を強く受け、通信感度が低下するという本質的な課題がある。本システム自体が先駆的なコンセプトの下で検討されているため、このよう課題に対する解決手段の検討は未着手であり、学術的・工学的に明らかになっていない。そこで本研究ではこの解決に必要な学理と技術の基盤を構築する。特に、確率共鳴現象を応用した新たな信号処理技術は本研究で対象とする機械振動の非線形現象や微小信号検出と大きなつながりがあるため、本現象の活用による感度改善の可能性を探る。

3. 研究の方法

本研究で着目するナノスケール・センサノードでは、電波の送受信や変復調、符号化・復号化処理を、ナノ材料の機械的振動により実現する。このような振動は構造力学や量子力学の分野でしばしば議論される非線形振動子の理論に基づいて記述されるが、これは確率共鳴現象の分野で議論されている非線形微分方程式と非常に相性が良い。そこで本研究ではこの興味深い点に着目し、研究代表者がこれまで検討を行ってきた確率共鳴現象の知見を活かして感度改善という課題の解決に当たる。具体的には、大きく分けて以下の二点について検討を重ねてきた：

(ア) NMR を用いたナノスケール・センサノードについて、信号処理の観点から系の振る舞いや雑音の振る舞いを定式化し、確率共鳴現象の発現有無の可能性を調べる。

(イ) 現象発現により得られるゲインを定性的・定量的に明らかにする。研究代表者がこれまで検討してきた非線形最適フィルタ理論や Fluctuation response theory などを発展させ、NMR において確率共鳴現象により得られるゲインをエンハンスする方法を理論的に明らかにする。

このような研究の独創的な点として、通常、雑音を抑えるためにはローパスフィルタ等のフィルタリングや最尤推定などの信号処理手法が採られる。雑音抑圧性能は理論的に保証されているが、これらの実現のためには追加の専用ハードウェアや高負荷な処理が必要となり、ハードウェアサイズに限りのあるナノスケール・センサノードでは採用できない。本研究では、問題となる雑音を逆に活かすという逆転の発想により、簡易な雑音の抑圧や通信感度の改善を目指す。

4. 研究成果

まず「3. 研究の方法」に記した(ア)について、研究代表者のこれまでの検討を発展させ、高感度を実現できる NMR の機械振動モードに着目した検討を行った。これまでは機械振動が線形 2 階微分方程式で記述される系を対象としてきた。いわゆる線形振動の領域に着目したものであるが、これにより理論解析が行いやすく、系のパラメータも設計しやすい。その一方で、非線形の 2 階微分方程式に支配される非線形振動では、線形振動の場合に見られなかった分岐現象等の興味深い現象が発現する。例えば、振動ポイントの位置 q が以下の方程式、

$$\ddot{q} + 2\Gamma\dot{q} + \omega_0^2 q = F_0 \cos \omega_F t - \gamma q^3$$

のように周期外力 $F_0 \cos \omega_F t$ により振動する状況を想定する。なお、 Γ は摩擦係数、 ω_0 は系の共振周波数、 γ は定数であ

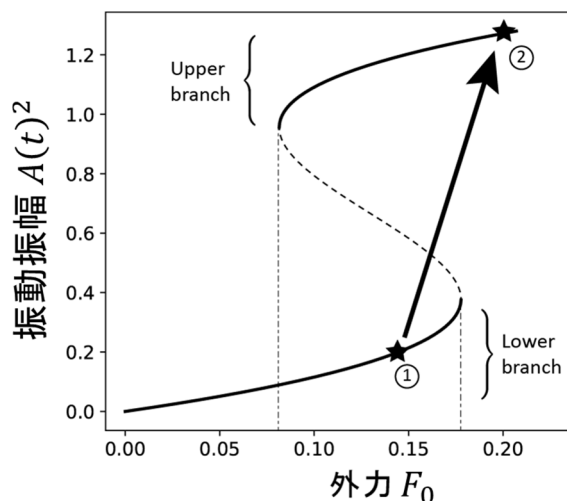


図 1 非線形振動での外力に対する振動振幅の変化

る。この方程式の解は一般的に $q = A(t)\cos(\omega_F t + \theta)$ と書かれるが、その振幅 $A(t)$ の振る舞いは、外力の周期 ω_F が ω_0 のごく近傍に設定された場合、図1のような非線形な振る舞いとなる。興味深いのは、外力の微小な変化により、振動振幅が大きく変化する点（ ）にある。外力の大きさは到来する電磁波の強度に比例するため、この振動子で電磁波の強弱を高感度に捉えることが可能となる。

そこで、このような状況を詳しく調べるため、変数変換を用いて系の振る舞いを理論的に解析した。その結果、振動の様子は図2のような有効ポテンシャル U_{eff} によって記述され、外力の変化によってポテンシャル形状が傾くことで動作点 x が変化し、図1のような振動振幅の変化が発生することが分かった。例えば、ある時刻において

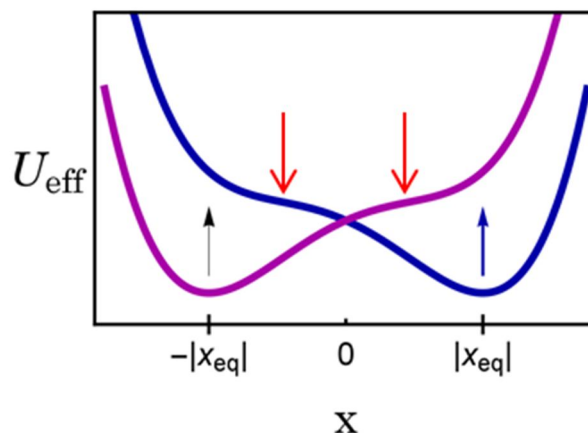


図2 動作点 x と有効ポテンシャルの関係

青色の有効ポテンシャルである場合、動作点は $|x_{\text{eq}}|$ にあるが、外力が変化すると紫色の様にポテンシャル形状が変化し、動作点も $-|x_{\text{eq}}|$ の方向に遷移する。

ここで問題となるのが、本研究で着目している雑音の影響である。動作点が変わる際、赤色矢印で示される点を通るが、この点付近では有効ポテンシャルの傾きがゼロに極めて近くなるため、動作点の変化は非常にゆっくりとなる。この状況で外部から雑音を加わると動作点の変化に悪影響を及ぼし、振幅変動が起こらないといった振動子の動きにエラーが生じることに繋がる。このような状況は、理論物理学の世界では critical slow-down と呼ばれている。

しかし、上記の点は確率共鳴現象の理論に従うと、雑音を巧く利用して微弱な電磁波を捉えられる可能性を示唆している。電磁波が微弱 (= 外力が微弱) のため、動作点が赤色矢印付近を超えることができない状況において、雑音を加えることにより動作点を越えさせ、微弱な電磁波の変化を捉える可能性がある。このような研究結果は、検討項目(ア)でのねらいである雑音の振る舞いを定式化し、確率共鳴現象の発現有無の可能性を明確に示唆するものであり、NMR 分野に貢献する貴重な理論検討結果である。本研究成果は「5. 主な発表論文」の雑誌論文 として報告がなされているものである。

また、NMR にて発生した機械振動を検出する機構においても「3. 研究の方法」に記した(ア)について検討した。NMR 自体の大きさがサブマイクロスケールと非常に小さいため、振動が生じたとしても、その振動の大きさを高精度に測定することは容易ではない。これを実現する方法として、例えば図3のように、カーボンナノチューブ (CNT) からなる片持ち梁の振動量を測定するために、CNT 先端からの電子放出量を測定する方法がある。数十 nm 程度のナノギャップを挟んで CNT が二つの電極 (Cathode/Anode) の間に存在する場合、両電極に電圧 V_{ext} を印加すると CNT 先端付近に強い電界 E が生じ、電子が CNT 先端から放出される。この放出量は Fowler-Nordheim の法則からナノギャップの大きさや印加電圧の大きさに依存することが知られている。CNT 先端が揺動すればナノギャップの距離が変化することで放出される電子の量 (= 電流 $I(t)$) も変化する。この変化を捉えることで、CNT の振動量を推定することができる。

課題となるのは、得られる電流が通常ナノアンペアオーダーと、非常に微弱となる事である。到来する電磁波等により CNT 先端が振動したとしてもその振動を捉えるための観測値が非常に微弱だと振動を精度よく測定することはできない。もちろん、微弱であるがゆえに雑音の影響を大きく受けてしまう。そこで本研究では雑音を活用した微弱電流検出の可能性を検討した。

確率共鳴現象を巧く利用するためには非線形性の存在が前提となる。本研究では、電子電界放出を記述する Fowler-Nordheim の法則にその非線形が存在することを見出した。電子放出により得られる電流は数式を用いると

$$I(t) = C_1 E^2 e^{-C_2/E}$$

のように記述される。ここで C_1 および C_2 は材料特性などから決まる定数である。図4に電流の数値例を示す。上式からわかるように、電流は CNT 先端近傍の電界に対して、非線形的に変化することがわかる。この電界は印加電圧 V_{ext} に比例するため、図4のような結果となる。ここでは、およそ $V_{\text{ext}} = 52.5[\text{V}]$ 付近で非線形的な振る舞いがみとれる。

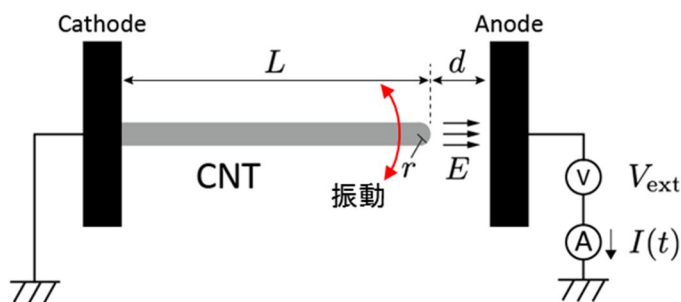


図3 電子電界放出を利用した CNT 片持ち梁の振動測定

そこで、このような非線形領域において雑音を活用することで電流の増強を考えた。具体的には、印加電圧に白色ガウス雑音を加えたものを想定した。これは実デバイスでは頻繁に見られる状況である。しかし、電圧に雑音を与えただけでは、意図する電流の増幅効果は得られなかった。雑音を加えると、単に電流もそれに応じて大きく揺らぐだけであった。

そこで本研究では、雑音を含む電流の平均化という簡易な信号処理を導入した。その結果、図5に示されるように、印加する雑音の標準偏差 σ に応じて電流は増幅され、40%程度の増幅効果が見込まれることが理論的に明らかとなった。さらに、雑音の標準偏差を適切に設定することで獲得できる増幅効果は変化することも判明した。この結果は「3. 研究の方法」に記した(イ)である確率共鳴現象により得られるゲインをエンハンスする方法を理論的に明確にしたものであり、NMRでの振動測定という重要な技術分野に貢献する貴重な理論検討結果である。本研究成果は「5. 主な発表論文」の雑誌論文として公表済みである。また、同項目のその他の欄に記載したように、本研究成果について掲載論文誌からインタビューを受けており、本研究成果のインパクトは大きい。

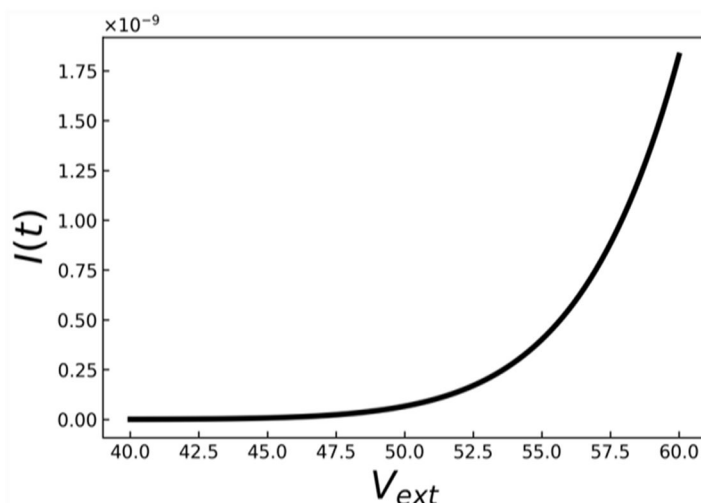


図4 電流 $I(t)$ の数値例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Y. Tadokoro, H. Tanaka, and M. I. Dykman, Driven nonlinear nanomechanical resonators as digital signal detectors, *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 8, 2018, p. 11284
DOI:10.1038/s41598-018-29572-7

Y. Tadokoro, K. Funayama, and H. Tanaka, Noise-enhanced field emission current from a carbon nanotube cantilever, *Electronics Letters*, 査読有, Vol. 54, No. 12, 2018, pp. 770-772
DOI:10.1049/el.2018.0881

〔学会発表〕(計3件)

Y. Tadokoro, K. Funayama, and H. Tanaka, Stochastic resonance in field emission current on carbon nanotube, in 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2018), 査読有, 2018, pp. 698-700

Y. Tadokoro, H. Tanaka, and M. I. Dykman, Signal detection with a noisy nanomechanical bifurcation amplifier, in 8th International Conference on Unsolved Problems on Noise (UPoN), 査読有, 2018, pp. 96-97.

Y. Tadokoro, H. Tanaka, and M. I. Dykman, Signal detection with a noisy nanomechanical bifurcation amplifier, in 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2019), .

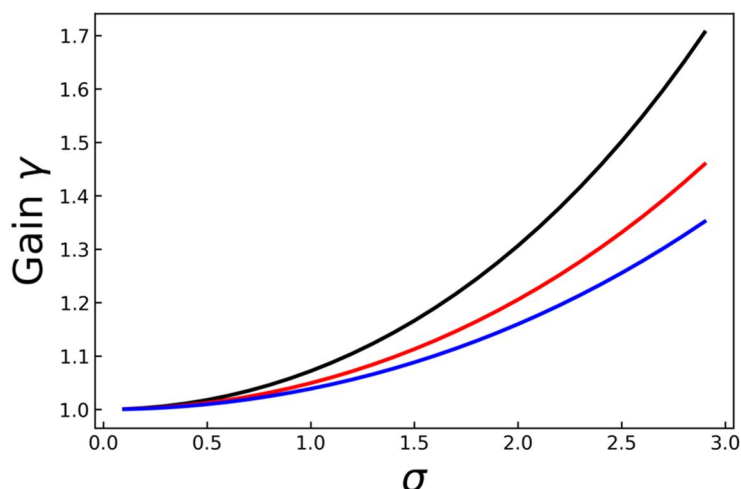


図5 電流 $I(t)$ の確率共鳴現象による増幅効果

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

発表論文(雑誌論文)に関するインタビュー記事が雑誌に掲載

Electronics Letters , Vol. 54, No. 12, 2018, p. 730

DOI: 10.1049/el.2018.1385

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。