

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820163

研究課題名(和文) 磁性体発振素子アレイの注入同期機構の数理最適化

研究課題名(英文) Mathematical Optimization of Injection Locking Scheme for an Array of Spin Torque Nano Oscillators

研究代表者

中田 一紀 (Nakada, Kazuki)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・研究員

研究者番号：40404107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁性体発振素子アレイの同期特性の向上による高出力化に向けて、位相縮約法による注入同期機構の数理的な最適化手法について探究した。まず、発振素子単体のダイナミクスを記述するLLGS方程式から位相応答関数を求め、対応する位相方程式を導出した。次に、得られた位相方程式から、注入同期の周波数引き込み範囲を最大化する入力波形とともに、注入同期の安定性を最適化する入力波形をそれぞれ求めた。また、磁性体発振素子アレイの相互同期機構の性能を向上させるために、パルス電流による離散的な相互作用を導入し、その効果を位相縮約理論の観点から最適化した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have studied on the mathematical optimization of the injection locking scheme for an array of spin torque nano oscillators (STNOs) using the phase reduction approach with the purpose of increasing the output power of an ensemble of STNOs by enhancing their synchronization. First, we derived a phase equation from the LLGS equation that describes the macroscopic magnetization dynamics of a single STNO. Next, we estimated optimal waveforms for maximizing the locking range and the stability of the injection locking scheme based on the derived phase equation. Furthermore, we introduced discrete pulse current interactions among STNOs for improving the performance of the mutual synchronization scheme for the STNO array and optimized the effects of such interactions from the viewpoint of the phase reduction theory.

研究分野：磁性体 / 半導体集積デバイス, 無線通信

キーワード：磁性体発振素子 注入同期 位相縮約 無線通信 スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスにおいて、電子の持つ電荷とスピンの自由度を利用した集積電子デバイス、すなわちスピンデバイスの研究が進展している。これまでスピンデバイスとしてさまざまなものが提案されているが、特に、スピン流によって誘起される磁化ダイナミクスを動作原理とする磁気抵抗メモリや磁性体発振素子 [1, 2]、強磁性細線素子は、工学的応用のみならず、数理的な解析対象としても興味深いものとして捉えられている。

磁性体発振素子は、高い熱安定性と広帯域にわたる周波数可変性を持ち、かつ省電力化を実現できるため、次世代のミリ波・マイクロ波発振デバイスの有力候補として着目されている [1]。しかし、素子単体では出力に限界があり、その限界を打破するために複数の素子を同期させることによる高出力化が必要となっている。そこで磁性体発振素子の同期機構としてさまざまなものが提案されており [3]-[9]、そのひとつである注入同期機構 [8, 9] に注目が集まっている。

研究開始当初の状況としては、その実証的な研究とともに、理論的な研究が進展していた。しかし、それらの研究では、磁性体発振素子の特性を素朴にモデリングしたものを基礎としており、注入同期という現象そのものを直感的に理解することには役に立つものの、実際に観測される注入同期の非線形現象としての様相を深く理解するまでには至っていなかった。また、実験から得られた結果の理論的な解析も進められていたが、注入同期機構の設計の最適化にまで踏み込んだ研究は、まだ行われていなかった。

その一方で、非線形物理の分野では、位相縮約法 [10] による非線形振動子の注入同期の最適化の理論体系が確立されつつあった。位相縮約法は、本来であれば多次元の力学系として記述される非線形振動子のダイナミクスを位相という 1 変数のダイナミクスに縮約し位相モデルとして近似的に記述する手法である。位相モデルとして記述することで非線形振動子の普遍的な性質を捉えることができるため、異分野にわたり、さまざまな応用に向けた解析の基礎として適用範囲が広がりつつあった。注入同期の最適化についても、位相記述に基づくことで、多様な制約条件のもとでの最適入力を統一的に導出する手法が確立されつつあった [11, 12, 13]。

スピントロニクスの分野においても、磁性体発振素子に関して、その歳差運動モードに着目することによって位相モデルとして記述できることが示唆されていた。したがって、注入同期の最適化理論を磁性体発振素子に適用することによって、従来よりも、効率的かつ系統的に注入同期を最適化することが期待できる状況にあった。しかし、そのようなアプローチはまだ試みられていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁性体発振素子アレイの同期特性の向上による高出力化に向けて注入同期機構の導入とその数理的最適化と物理的設計／実装を試みることにある。

その目的の達成に向けて、位相縮約法による注入同期の最適化理論 [11, 12] に基づき、磁性体発振素子単体のダイナミクスおよび素子間の相互作用を最適化することを具体的な課題として研究を進めた。

3. 研究の方法

本研究では、磁性体発振素子の動作原理となるデバイスダイナミクスを数理的な視点から捉えることによって、見通しの良い解析を行い、注入同期機構の物理的設計／実装を最適化する。

まず、磁性体発振素子の磁化ダイナミクスをデバイスモデリングにより数理的に記述する。次に、位相縮約法に従い数理モデルから対応する位相モデルを導出する。そして、位相縮約法による注入同期の最適化理論を磁性体発振素子に適用し、注入同期の周波数引き込み範囲や同期安定性を最大化する最適入力を求める。さらに、磁性体発振素子アレイの素子間相互作用を位相縮約理論の観点から最適化する。

磁性体発振素子のデバイスモデリング

まず、磁性体発振素子の磁化ダイナミクスを数理的に記述するためのデバイスモデリングについて説明する。

磁性体発振素子 (図 1) は、自由層と固定層の 2 つの磁性体と絶縁層となる非磁性体から構成される。ここで、自由層の磁化は単一の磁区構造を持つものとして、そのダイナミクスは、次式の LLGS (Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski) 方程式：

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H} + \alpha \mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt} + \gamma \beta J \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{M}) \quad (1)$$

によって記述される [2]。ここで、 \mathbf{m} および \mathbf{M} は自由層と固定層の磁化をそれぞれ表している。また、 α は Gilbert ダンピング定数、 β はスピン注入効率に対応した物理定数、 γ は磁気回転比であり、磁場は、

$$\mathbf{H} = H_a \hat{e}_x + (H_k m_x \hat{e}_x - H_{d2} m_z \hat{e}_z) / |\mathbf{m}| \quad (2)$$

で与えられるものとする [5]。この実効磁場 \mathbf{H} のもと、スピン偏極した電流 J によって生じるスピン移行トルク項がダンピング項とバランスすることで、歳差運動を生じる。

さらに、歳差運動の際に磁化の長さは一定であるとすると、その運動は球面上に拘束されているものとみなせる。したがって、磁性体発振素子の磁化ダイナミクスは、球面座標上で考えると解析や数値計算の際に取り扱いやすくなる。そのダイナミクスは、式 (1) を球面座標系に

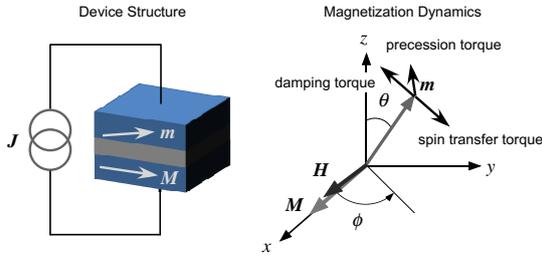


図 1. 磁性体発振素子. 標準的なデバイス構造, および磁化ベクトルの球面座標表示.

変換することで

$$\frac{d\theta}{d\tau} = U \cos \theta \cos \phi + \alpha(H_{dz} + H_k \cos^2 \phi) \sin \theta \cos \theta - V \sin \phi - H_k \sin \phi \cos \phi \sin \theta \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{d\tau} = [-U \sin \phi - (H_{dz} + H_k \cos^2 \phi) \sin \theta \cos \theta - V \cos \phi \cos \theta - \alpha H_k \sin \phi \cos \phi \sin \theta] / \sin \theta \quad (4)$$

となる [5]. ここで, $U = \alpha H_a - \beta J$, $V = H_a + \alpha \beta J$ による変数変換と $\tau = \gamma / (1 + \alpha^2) t$ による時間の規格化を導入している.

磁性体発振素子の位相記述

次に, 磁性体発振素子の磁化ダイナミクスをその歳差運動モードに着目し, 位相モデルとして縮約して記述する方法について示す.

磁性体発振素子には, in-plane precession (IPP) mode と out-of-precession (OPP) mode という異なる複数の歳差運動モードがある [1, 2, 5]. IPP モードはバイアス電流が臨界電流を越えて Hopf 分岐することによって生じ, OPP モードはさらに電流が増加し heteroclinic 分岐することによって生じる. IPP mode の場合, Hopf 分岐の標準型として縮約されることから, Adler 方程式として位相記述できる [4]. そのため, 従来手法によって, 注入同期の解析や最適化を行うことができる. それに対して, OPP モードの場合, 位相モデルとして記述するためには工夫が必要になる. たとえば, あるパラメータ領域では近似的に $\sin \theta \approx R + K \cos \phi$ が成り立つので, θ を消去することにより, ϕ のみのダイナミクスから

$$\frac{d\hat{\phi}}{d\tau} = \omega_0 + \omega_1 \cos(\hat{\phi}) + Z_J(\hat{\phi})J(\tau) + Z_H(\hat{\phi})H(\tau) \quad (5)$$

として, その位相記述が得られる [5]. ここで $\hat{\phi} = -\phi$ とした. また, $Z_J(\hat{\phi})$ および $Z_H(\hat{\phi})$ は, それぞれ交流電流 $J(\tau)$ および磁場変動 $H(\tau)$ に対する位相感受関数

$$Z_J(\hat{\phi}) = \beta Z_u(\hat{\phi}) + \alpha \beta Z_v(\hat{\phi}) \approx \beta Z_u(\hat{\phi}) \quad (6)$$

$$Z_H(\hat{\phi}) = -\alpha Z_u(\hat{\phi}) + Z_v(\hat{\phi}) \approx Z_v(\hat{\phi}) \quad (7)$$

であり,

$$Z_u(\hat{\phi}) = \frac{\sin \hat{\phi}}{R + K \cos \hat{\phi}} \quad (8)$$

$$Z_v(\hat{\phi}) = \frac{\cos \hat{\phi} \sqrt{1 - (R + K \cos \hat{\phi})^2}}{R + K \cos \hat{\phi}} \quad (9)$$

である. ここで, R, K はシステムパラメータである. いずれもデバイスパラメータやバイアスパラメータによって決まるものであり, それらの物理的パラメータに対して, ダイナミクスを特徴づける数理的パラメータとなっている.

位相記述に基づく注入同期機構の最適化

ここでは, 注入同期の最適化理論 [11, 12, 13] に基づいて, 磁性体発振素子アレイの注入同期機構の周波数引き込み特性や同期安定性を最適化する手法について示す.

非線形振動子 (発振素子) のダイナミクスは, 次の位相方程式 $\dot{\psi} = \omega + Z(\psi)I(t)$ に縮約される [10]. ここで, ψ は位相変数, ω は固有角周波数, $Z(\psi)$ は位相感受関数である. さらに, 入力 $I(t)$ を周期信号 $f(\Omega t)$ とすると, 新しい位相変数 $\phi = \psi - \Omega t$ に関する平均化によって, 次の位相方程式 $\dot{\phi} = \Delta\omega + \Gamma(\phi)$ が得られる. ここで, $\Delta\omega = \Omega - \omega$ であり, $\Gamma(\phi) = \langle Z(\theta + \phi)f(\theta) \rangle$ は位相結合関数, $\langle \cdot \rangle$ は一周期平均を表している.

上記の位相方程式に基づいて, 注入同期機構の周波数引き込み範囲や同期安定性を最適化する周期入力の条件が求められる. たとえば, 周波数引き込み範囲を最大化する周期入力, $f_{\text{opt}}(\theta) \propto Z(\theta + \phi_+) - Z(\theta + \phi_-)$ (ϕ_{\pm} : 定数) [11] であり, 同期安定性を最大化する周期入力, $f_{\text{opt}}(\theta) \propto -Z'(\theta)$ [12] となることが示されている. さらに, これらの結果をもとに, さまざまな制約条件のもとでの最適入力を統一的に求める理論体系が確立されている [13].

この理論的枠組みのもと, 磁性体発振素子のダイナミクスから位相感受関数を求め, それに基づいて注入同期の性能を向上させる最適入力を理論的に求める.

位相記述に基づく相互同期機構の最適化

磁性体発振素子アレイの相互同期機構として, スピン波 [3] や磁気渦 [6], 電流 [7] のように, 素子間の物理的な相互作用に応じて, さまざまなものが提案されている. このような相互作用を位相結合関数として位相記述することで, 物理的に異なる相互作用項の効果を定性的かつ定量的に比較することができる.

そこで, 磁性体発振素子アレイのさまざまな相互同期機構に対応した位相結合関数を数值的に計算し推定することで, 素子間の相互作用項を評価する. また, その結果に基づいて, 素子間の相互作用を最適化する物理的パラメータを見積り, 設計値を決定する.

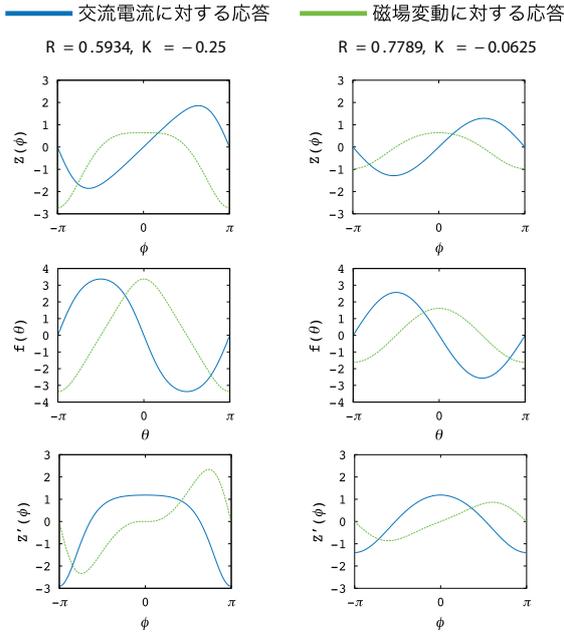


図 2. 磁性体発振素子の位相感受関数と注入同期の最適入力.

4. 研究成果

ここで、本研究で得られた成果について示す.

磁性体発振素子の注入同期機構の最適化

はじめに、位相縮約法による注入同期の最適化理論に基づき、磁性体発振素子の注入同期の最適入力を求めた結果について示す.

図 2 に、OPP モードで動作する場合の磁性体発振素子の位相感受関数と対応する最適入力について示す. ここで、システムパラメータ R, K は、デバイスパラメータやバイアスパラメータから計算した値としている. R と K との比が -1 に近づくにつれて、最適入力の波形は正弦波からより非線形性の強いものになる. したがって、磁性体発振素子の注入同期を最適化するうえで、入力波形に含まれる高調波成分が本質的に重要であることが理論的に示唆される.

この結果に基づき、磁性体発振素子の注入同期を最適化するための設計手法について考察する. もし設計仕様として、デバイスパラメータやバイアスパラメータが与えられる場合、それらに対して最適となる周期入力 $f_{\text{opt}}(\theta)$ を求めるには、 $Z(\phi)$ のシステムパラメータ R, K を磁性体発振素子のデバイスパラメータから計算し、それをもとにして最適入力 $f_{\text{opt}}(\theta)$ を求めれば良い. また、あらかじめ所望となる周期入力の波形が定まっている場合、それが最適となるような $Z_{\text{opt}}(\phi)$ を求め、それに $Z(\phi)$ の特性が近づくようにシステムパラメータを選び、さらにそれを実現するような物理的なデバイスパラメータやバイアスパラメータを設定すれば良い.

磁性体発振素子アレイの相互同期機構の最適化

次に、磁性体発振素子アレイの素子間の相互作用の位相記述に基づき、その最適化を試みた

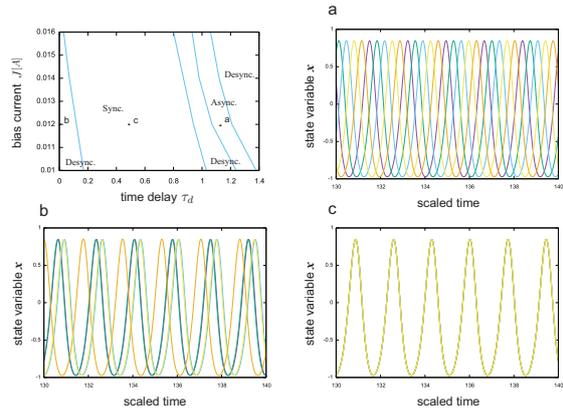


図 3. 磁性体発振素子アレイの相互同期. 相図と同期モード. a 完全非同期状態, b 非同期状態, c 同期状態.

結果について示す.

これまでの研究は、連続的な相互作用をするものがほとんどであったが、ここでは、パルス電流による離散的な相互作用を導入したものを考える. 具体的には、ある発振素子の出力電圧 (出力抵抗) が最大値になる瞬間にパルス電流を生成し、カレントミラーを介したパルス電流により、周囲の素子と相互作用するアレイ構成を考える.

このとき、磁性体発振素子の出力抵抗は、次式:

$$R = \frac{R_P + R_{AP}}{2} - \frac{R_{AP} - R_P}{2} \sin \theta \cos \phi \quad (10)$$

に従うように固定層の磁化の向きを定めるものとする. ここで、 R_P, R_{AP} はそれぞれ平行, 反平行状態にある素子の抵抗値を表すものとする. また、カレントミラーを介したパルス電流は α 関数で近似できるものとして、その時定数 μ と伝達遅延 τ_d をパラメータとして持つものとする. さらに、相互結合の強さは電流を注入する向きを正として、ここでは負になるような回路構成を考える.

図 3 の相図に示されるように、伝達遅延 τ_d がある程度あった場合に完全に同期するモードが生じることが分かる. また、 τ_d がある値の範囲では、完全に非同期となるモードが生じることが分かる. このそれぞれの同期モードの安定性は、パルス電流による相互作用を解析的に記述し、それと発振素子の位相感受関数を畳み込み積分することによって得られる位相結合関数によって、理論的に解析することができる. このとき、位相結合関数の平衡点付近の勾配を最大化するように各パラメータを選ぶことで、相互同期機構の最適設計を行うことができる.

また、図 3 の相図から発振周波数を決定するバイアス電流 J が変化した場合にも同期が成立する伝達遅延 τ_d の範囲を見積もることができる. 発振素子の周波数が変動しても伝達遅延が変化しない場合、ある程度の時間の伝達遅延に設定しておくことで、広い周波数範囲で同期が達成されることが示唆される. これは、注入同期と

相互同期を両立させるうえで有用な知見である。さらに、磁性体発振素子アレイの応用として、フェーズドアレイとして動作させる場合、このことは重要な意味を持つ。図3から、完全非同期状態となるパラメータ範囲はそれほど広くないので、注入同期によって発振周波数を制御した場合、相互同期がうまく働かなくなることが生じ得る、そこで、位相記述に基づいて、完全非同期状態を生じるパラメータ領域を拡大するように最適設計することで、フェーズドアレイとしての動作を安定化することができる。

成果のまとめ

本研究では、位相縮約理論の観点から、磁性体発振素子アレイの注入同期機構の性能を向上させるための数理的な最適設計手法について探究した。その結果、磁性体発振素子の位相感受関数のシステムパラメータを最適化することで、磁性体発振素子の物理的なデバイスパラメータを効率的かつ系統的に決定できることを示した。また、発振素子間の相互作用を位相結合関数として数理的に記述することで、異なる物理的な相互作用の効果を比較し、従来の連続的な相互作用に対して、パルス電流による離散的な相互作用の持つ優位性を示した。さらに、注入同期機構と相互同期機構が相補的に機能するための条件を明らかにした。

今後のさらなる発展的な課題として、無線通信への応用に向けて、磁性体発振素子アレイのフェーズドアレイとしての動作を最適制御する方式について、位相縮約法による解析を進めている。また、実装についても、周辺回路の構成を考え、その性能向上に取り組んでいる。

参考文献

- [1] D. Stiles and J. Miltat, Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures III, 101, 225–308, 2006.
- [2] I. D. Mayergoyz, G. Bertotti, and C. Serpico, Nonlinear Magnetization Dynamics in Nanosystems, Elsevier, 2009.
- [3] S. Kaka, et al., Nature, 437, 389–392, 2005.
- [4] A. Slavin and V. Tiberkevich, IEEE Trans. Magnetism, 45(4), 1875–1918, 2009.
- [5] D. Li, Y. Zhou, B. Hu, and C. Zhou, Phys. Rev. B, vol. 84, 104414, 2011.
- [6] A. Ruotolo, et al., Nat. Nanotechnol. 4, 528, 2009.
- [7] A. Pikovsky, Phys. Rev. E, 88, 032812, 2013.
- [8] H. Rippard, et al., Phys. Rev. Lett., 95(6), 067203, 2005.
- [9] B. Georges, et al., Phys. Rev. Lett., 101(1), 017201, 2008.
- [10] Y. Kuramoto, Chemical Oscillations, Waves and Turbulence, Springer, New York, 1984.
- [11] T. Harada, et al., Phys. Rev. Lett., 105, 088301, 2010.
- [12] A. Zlotnik, et al., Phys. Rev. Lett., 111, 024102, 2013.
- [13] H.-A. Tanaka, Physica D, 288(15), 1–22, 2014.

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 5 件）

- ① 中田 一紀, スピントロニクスデバイスのダイナミカルシステムデザイン, IEICE CCS/NLP 研究会, 東京, 6月12日, 2015年.
- ② Kazuki Nakada, Keiji Miura, “Pulse-Coupled Synchronization in an Array of Spin Torque Nano Oscillators,” *IEEE Intermag*, Beijing, China, May 15, 2015.
- ③ Kazuki Nakada, Satoshi Yakata, Takashi Kimura, Hisa-Aki Tanaka, “Optimal Design of an Injection Locking Scheme for Spin Torque Nano Oscillators,” *IEEE Intermag*, Dresden, Germany, May 5, 2014.
- ④ 中田 一紀, 田中 久陽, 家形 諭, 木村 崇, 位相縮約に基づく磁性体発振素子の注入同期機構の最適化設計, 日本応用数理学会年会, 福岡, 9月11日, 2013年.
- ⑤ 中田 一紀, 田中 久陽, 家形 諭, 木村 崇, 位相縮約による磁性体発振素子の注入同期の解析, IEICE CCS 研究会, 滋賀, 6月4日, 2013年.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 一紀 (KAZUKI NAKADA)
電気通信大学・情報理工学研究所・研究員
九州大学・大学院理学研究院・研究員
研究者番号: 40404107