



位相情報を含んだ近傍磁界測定によるクロストーク観察

Observation of Crosstalk by Near Magnetic Field Measurement Including Phase Information

菅原祐介^{a), b)}・後藤太一^{b)}・石山和志^{b)†}

^{a)}東北大学大学院 工学研究科, 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6 (〒980-8579)

^{b)}東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

Yusuke Sugawara^{a) b)}, Taichi Goto^{b)}, and Kazushi Ishiyama^{b)†}

^{a)} Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{b)} RIEC Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

In recent years, as electronic devices have advanced, the component mounting density on electronic boards has grown, leading to circuit noise issues. Addressing this requires technology capable of precisely measuring high-frequency magnetic fields. We have been studying magneto-optical effects and high-frequency near-field measurements using pulsed lasers. In previous studies, we demonstrated the feasibility of measuring the magnetic field distributions across diverse electronic circuits, including actual circuits in commercial electronic devices. However, it is difficult to identify a noise source only by the intensity and frequency of the magnetic field obtained by magnetic field distribution measurement. This study proposes a visualization of noise propagation paths utilizing the phase information obtained by a magnetic field measurement system. For validation, we measured the magnetic field emitted by crosstalk noise, a typical type of noise in electronic circuits. We observed a time lag between the primary signal and the noise, as well as noise amplification over time. Our findings show the potential of our measurement method in pinpointing noise sources.

Key words: magnetic optical effect, garnet, magnetic field measurement, noise in circuits, crosstalk noise

1. はじめに

近年、電子機器の高性能化に伴い電子基板における部品の実装密度が向上し、回路内のノイズによる問題が発生している¹⁾。ノイズ対策はノイズ源や伝搬方法に応じて、ノイズフィルタやシールドを施すことが効果的だが、そのためにはノイズ源の特定が必要である。従来のノイズ源特定方法として、金属ループコイルを用いた近傍磁界測定がある^{2) 3)}。しかし、プローブが金属製であるため測定対象の磁界分布を乱すことや、測定感度とループ径の間にトレードオフの関係があるため空間分解能に限界があることが問題となっている^{4) 5)}。実装密度が高い電子基板におけるノイズの種類や伝搬経路は様々であるため、ループコイルで得られる磁界の強度と周波数のみでノイズ源を特定することは困難である。それらに加えて磁界の位相情報を取得することができればリングングやクロストークなど、発生した可能性のあるノイズが複数あってもノイズの特徴検出によって実際に発生したノイズを特定可能であると考える。

我々は磁気光学効果⁶⁾とパルスレーザを用いた高周波近傍磁界測定の研究を行っている^{7) 8)}。非磁性の素材である磁性ガーネット膜を用いることで、金属ループコイルと比べて低侵襲かつ高分解能な近傍磁界測定が可能である。本磁界測定システムでは、測定対象の磁界とパルスレーザを同期し、測定磁界の特定位相でのみレーザを発光させるストロボ法を用いることで、位相情報を含んだ磁界測定を可能としている⁹⁾。しかし、位相情報を用いた磁界測定によるノイズ観察を行った例はなく、ノイズの特徴検出が可能であるか検証されていない。そこで本研究では、位相情報を含

む磁界測定によってノイズの特徴検出が可能であると示すことを目的とする。検証実験として、電子回路中のノイズとして代表的であるクロストークノイズが作り出す磁界を測定し、特徴の観察を行った。

2. 原理・測定方法

2.1 原理・測定方法

Fig. 1に本研究で使用した磁界測定システムの概略を示す。プローブとして用いた磁性ガーネット膜は1 cm 角のMatesy社Matesy Type Bであり、片面に反射膜(誘電体多層膜)が形成されている。測定対象であるマイクロストリップライン(MSL)に磁性ガーネット膜を近接させ、パルスレーザを膜面垂直方向に照射した。磁性ガーネット膜内部の磁化状態は、MSLが発する磁界によって変化しパルスレーザの偏光状態を変化させるため、偏光の変化から磁界の変化を検出することができる¹⁰⁾。入射と反射によって光路長が膜厚の2倍となるため、得られるファラデー回転角も2倍となる。偏光状態の変化には、磁性ガーネット膜の表面で起きる極カー効果と、膜内を通過した光に起きるファラデー効果の二種類がある。しかしレーザ光は膜に対して垂直に入射するため、膜表面で起きる反射に比べて、内部を通過して反射膜で反射する光のほうが支配的である。したがって、検出したすべての反射光の回転角をファラデー回転角によるものとした。反射光は偏光ビームスプリッタ(Polarizing beam splitter: PBS)によってP偏光とS偏光に分離し、それぞれの光を2つのフォトディテクタを用いて検出した。P偏光とS偏光の強度の差分を取ることでファラデー回転角としている。ファラデー回転角は1°に満たない範囲で変化するためファラデー回転角と測定磁界は比例しており、P偏光

Corresponding author: K. Ishiyama
(e-mail: kazushi.ishiyama.d8@tohoku.ac.jp).

と S 偏光の差分を磁界強度として読み取っている。

ストロボ法を用いた位相情報の測定方法について説明する。本システムでは、MSL に入力する信号に低周波のバースト変調を加えており、バースト変調に用いている矩形波をロックインアンプの参照信号として使用している。これによりディテクタで読み取った光強度を積算し、ロックインアンプで低周波の信号として読み取れることを可能としている。パルスレーザは測定磁界の特定位相で発光を繰り返している。そのため入力信号の位相を変化させることで、位相ごとの磁界測定が可能となっている。

2.2 クロストークノイズの特徴

クロストークノイズは複数の伝送線路間の誘導性・容量性結合によって発生するノイズである¹¹⁾。アナログ回路が被害者となった場合信号が乱れ、デジタル回路の場合定められた閾値を越えて High / Low の誤りを引き起こす、などの問題が起きる。クロストークノイズは加害者となる素子から見た被害者となる素子との位置関係によって、近端クロストークと遠端クロストークに分けられる。本実験では、発生したノイズの持つ特徴を観察しやすいことから、遠端クロストークを測定対象として選んだ。

今回観察した遠端クロストークの特徴は2つである。1つ目はノイズの立ち上がりが加害者である入力信号の立ち上がりよりも遅れることである。クロストークノイズは誘導性・容量性結合によって発生するため、誘導性・容量性ノイズの合計であるといえる。Fig. 2 に加害者となる配線に正のステップ信号を入力したときのクロストークノイズの波形の概略を示す。Assailant signal は加害者線路に入力した信号の電圧波形、Crosstalk noise は被害者線路遠端の電圧波形である。加害者線路に信号が流れると被害者線路にノイズが伝搬する。このとき線路の実効誘電率の違いによって、誘導性ノイズは容量性ノイズよりも速く線路中を伝わる。よってその合計であるクロストークノイズは一度立ち下がったあと立ち上がるため、加害者である入力信号の立ち上がりと比べて遅れることとなる。どの程度遅れるかは線路同士の結合度や信号の立ち上がりの速さに依存しており、線路長 4 mm では約 30 ps の遅れが見られる¹²⁾。

2 つ目はノイズが遠端に伝搬するにつれて線形に増幅していくことである¹¹⁾。Fig. 3 に容量性結合のみを考えたノイズ増幅の様子である。遠端クロストークノイズについての説明のため、遠端方向に流れる電流のみを示している。高周波信号が流れる線路であるため分布定数線路として振る舞っており、容量性結合である浮遊静電容量が分布している。加害者線路に信号が流れると、その立ち上がりが電圧源として振る舞うため、浮遊静電容量を通じて被害者線路にノイズが伝搬する。加害者線路の信号が進むと被害者線路にノイズが伝搬するが、このとき先ほど伝搬したノイズも進んでいるため、そこに新たなノイズが重なることになる。これを繰り返しながら進むことでノイズは雪だるま式に重畳することとなる。誘導性ノイズも同様に増幅していくため、2つのノイズが同じ大きさであれば打ち消されることとなるが、そうでない場合は遠端に伝搬するにつれて増幅することとなる。したがって、遠端クロストークノイズは遠端に向かうにつれて線形に増幅する。

実際のクロストークノイズは信号の急峻な変化である矩形波の

立ち上がり・立ち下がりが原因となって発生するため、主に加害者となる信号は矩形波である。本実験では測定システムの磁界検出感度を考慮して高出力の信号を用いる必要があるが、高出力かつ高周波の矩形波を生成することは困難であるため、正弦波を用いて実験を行った。そのため被害者線路に伝搬するノイズは一般的なクロストークノイズとは異なるが、前述した 2 つの特徴は現れると考えられるためクロストークノイズとして扱って問題ないとした。

2.3 測定に使用した MSL

Fig. 4 に測定対象として製作した MSL を示す。製作に使用した基板は基板厚み 1.2 mm、銅箔厚み 0.018 mm の両面銅箔基板であり、材質は FR-4 である。エッチング処理を行い線路の作成を行ったのち、コネクタの取り付けを行った。信号線幅は単線へ 1 GHz の信号を入力した際に線路の特性インピーダンスが 50 Ω となる 2.3 mm に設計した。線路が近接する範囲についても同様の線幅である。2本の線路は 0.5 mm の間隔をあけて 60 mm 平行している。測定の際は Port 1 から信号を入力し Port 2 を 50 Ω 終端することで加害者線路として、Port 3・4 を 50 Ω 終端することで被害者線路として使用した。

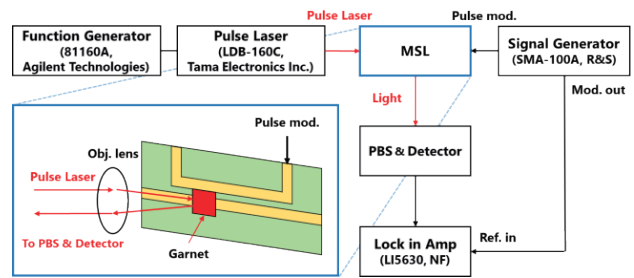


Fig. 1 Schematic of RF magnetic field measurement system.

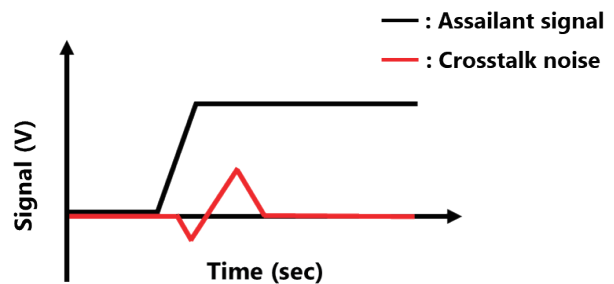


Fig. 2 Schematic of time lag between crosstalk noise and assailant signal.

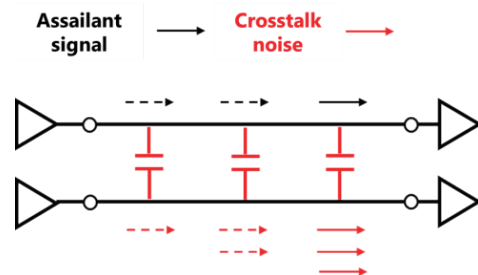


Fig. 3 Schematic diagram of how crosstalk is amplified as it propagates.

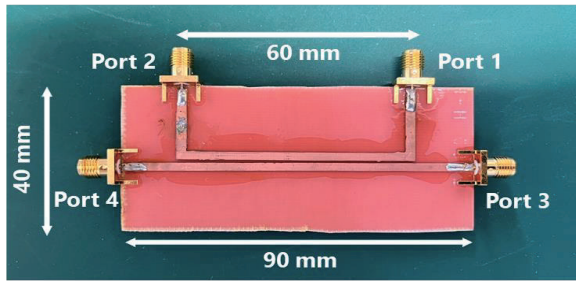


Fig. 4 Microstrip lines used for measurements.

3. 実験結果および考察

3.1 線路近傍磁界の分離

本論文ではノイズが作る磁界を測定することでノイズの特徴観察を行う。しかし、線路近傍磁界は加害者線路と被害者線路に流れる電流の足し合わせである。したがって、被害者線路近傍磁界をノイズが作る磁界として扱えるかどうかは、被害者線路近傍磁界が含む加害者線路に流れる電流が作る磁界の割合に依存していると言える。そこで線路近傍磁界を測定し、信号磁界成分とノイズ磁界成分への簡単な分離を行うことで、被害者線路近傍磁界をノイズ磁界として問題がないか検討した。

Fig. 5 に磁界測定を行った範囲、Fig. 6 に測定結果を示す。Fig. 6 からノイズフロアは約 $2 \mu\text{V}$ 、被害者線路近傍磁界は約 $7 \mu\text{V}$ 、線間磁界は約 $42 \mu\text{V}$ 、加害者線路近傍磁界は約 $40 \mu\text{V}$ であることが読み取れる。したがって、被害者線路近傍磁界はノイズフロアを差し引くと約 $5 \mu\text{V}$ であるのに対し、線間磁界が含む被害者線路近傍磁界は約 $2 \mu\text{V}$ である。線間磁界はそれぞれの線路に流れる電流が作る磁界のピークが重なったものではなく、裾野に近い部分が重なったものであると考えられる。したがって、被害者線路近傍磁界約 $5 \mu\text{V}$ の大部分はノイズが作り出した磁界であり、線間磁界が含む被害者線路近傍磁界約 $2 \mu\text{V}$ はその一部分であるといえる。よって、本論文では被害者線路近傍磁界をノイズが作り出すノイズ磁界、加害者線路近傍磁界を加害者信号が作り出す加害者磁界として扱う。

3.2 ノイズと入力信号の時間差の観察結果

遠端クロストークノイズの特徴の1つ目である立ち上がりの時間差を観察するため、位相ごとにMSLの磁界分布測定を行った。MSLのPort 1に10 kHzでバースト変調した1 GHz, 24 dBmの正弦波を入力した。磁性ガーネット膜は厚さ $80 \mu\text{m}$ の両面テープによってMSL表面と平行になるように近接させた。測定はFig. 7に黄線で示した12 mmの範囲で0.05 mmごとに行い、各点で信号を200回取得したのち、平均値をとることで磁界強度とした。また、測定磁界の位相は0 degから360 degまで20 deg刻みで掃引した。Fig. 8(a)に位相ごとの磁界分布測定結果を示す。加害者・被害者線路はそれぞれ $y = 2.0 \text{ mm}$, -2.0 mm 付近に位置している。加害者線路の上下に強い磁界が、また被害者線路の下側に弱い磁界が表れていることが確認できる。Fig. 8(a)に赤矢印で示した

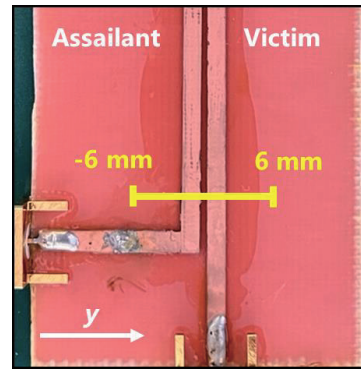


Fig. 5 Area where a magnetic field measurement was taken.

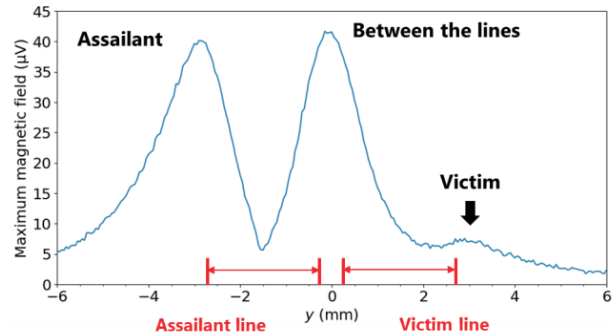


Fig. 6 Magnetic field strength of assailant, victim and between the lines.

加害者磁界と青矢印で示したノイズ磁界を取り出してプロットした磁界波形をFig. 8(b)に示す。加害者磁界とノイズ磁界は反対位相となっているため、加害者磁界を反転させて同位相となるようにプロットしている。磁界強度が $0 \mu\text{V}$ となる位相に注目して比較すると、ノイズ磁界は加害者磁界と比べて約 45 deg 遅れている。入力信号の周波数は1 GHzであり周期は1 nsであるため、 45 deg の位相差は時間差に変換すると125 psと計算される。前項で触れた通り、先行研究では線路長4 mmで約30 psの時間差が見られた。波形や線路間の結合度など条件が本実験と異なることから単純な比較はできないが、使用したMSLの線路長は60 mmであるため125 psの時間差は妥当であり、遠端クロストークノイズに見られる立ち上がりの時間差という特徴を観察できたといえる。

3.3 ノイズが増幅する様子の観察結果

遠端クロストークノイズの特徴の2つ目である遠端に伝搬するにつれ増幅する様子を観察するため、信号の伝搬方向に範囲をとって磁界波形の測定を行った。測定範囲はFig. 7に白線で示した被害者線路近傍27 mmの範囲とし、3 mmごとに測定を行った。また、測定磁界の位相は0 degから360 degまで2 deg刻みで掃引した。そのほかの測定条件は3.2と同様である。Fig. 9(a)に磁界波形の測定結果を、Fig. 9(b)に縦軸に磁界のPeak to peak、横軸に測定位置を取った振幅の比較を示す。Fig. 9(b)の直線は $x = 9 \text{ mm}$ の値を外れ値とした際の近似直線である。外れ値はあるものの遠端に向かうにつれ磁界が線形に増幅している様子が見取れる。また、Fig. 9(a)を見ると遠端に向かうにつれて磁界の位相が変化しているため、その妥当性についても検討する。 $x = 0, 27 \text{ mm}$

の位相差を見ると約 50 deg である。入力信号の周波数は 1 GHz であるため、波長短縮効果を考慮した信号波長は約 160 mm と計算される。よって信号が 27 mm 進むと磁界の位相は約 60 deg 進むこととなるため、測定結果に見られる 50 deg の位相差は妥当であるといえる。したがって、遠端に向かうにつれて線形に増幅している磁界はノイズが作り出したものであり、遠端クロストークノイズに見られる遠端に伝搬するにつれ増幅する特徴を観察できたといえる。

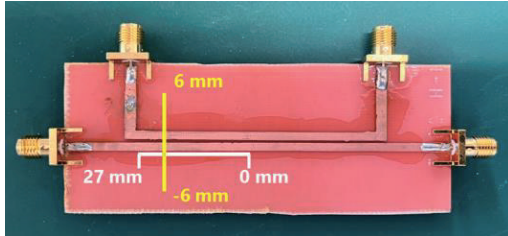
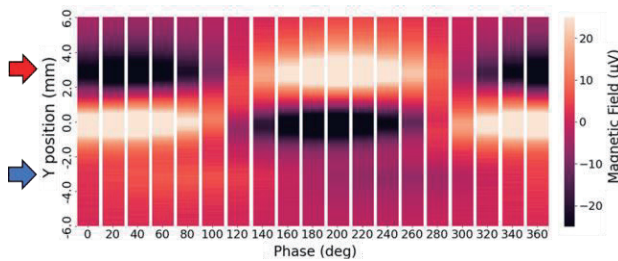
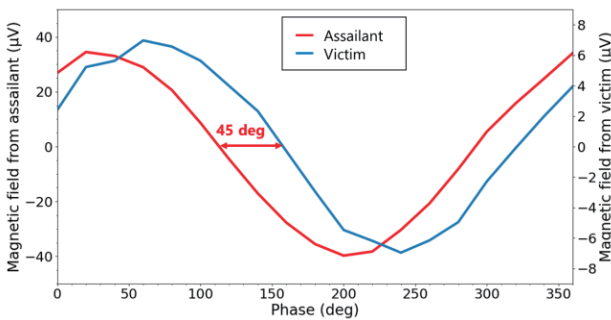


Fig. 7 Area where magnetic field measurements were taken.

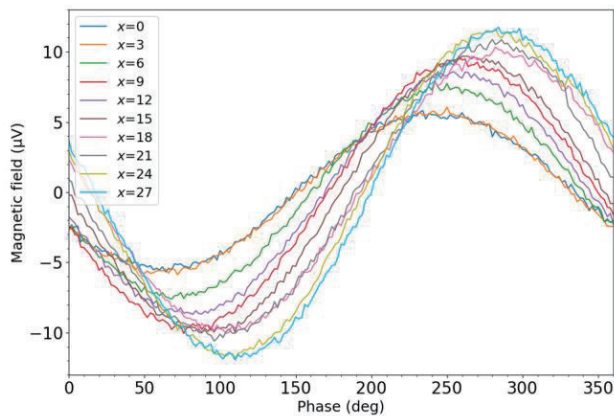


(a) Colormap of measured magnetic field

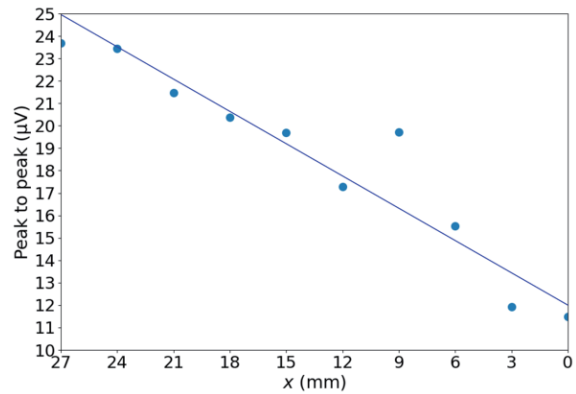


(b) Magnetic field waveforms of assailant and victim

Fig. 8 Measured magnetic field distribution.



(a) Magnetic field waveforms of crosstalk noise depending on measurement position



(b) Peak to peak of magnetic field depending on measurement position

Fig. 9 Measured magnetic field waveforms.

4. まとめ

磁気光学素子とパルスレーザを用いた、位相情報を含んだ磁界測定が可能な磁界測定システムによるノイズの特徴検出が可能であることの検証を行った。検証実験として遠端クロストークノイズが作り出す磁界を測定し、その特徴を観察することに成功した。したがって、位相情報を含んだ磁界測定によってノイズが作り出す磁界を観察することで、そのノイズをクロストークノイズであると特定可能なことを示した。また発生したと考えられるノイズが複数ある状況でもクロストークノイズを判別できる可能性があり、ノイズ源特定手法として有効であることを示した。しかし、実際のノイズが作り出す磁界は小さいため、実用的なノイズ源特定方法として使用するためには検出感度の向上が不可欠である。課題解決のため、磁性ガーネット膜以外の材料の検討や測定システムのノイズ低減を進めていきたいと考える。

References

- 1) M. Yamaguchi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **28**, 686 (2004).
- 2) J. Dyson: *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-21**, 446 (1973).
- 3) N. Tamaki, N. Masuda, T. Kuriyama, J. C. Bu, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *IRICE Trans. Electro.*, **J87-C**, 335 (2004).
- 4) H. Funato, T. Suga: *J. Jpn. Inst. Electro. Packaging*, **14**, 195 (2011).
- 5) J. Shi, K. Slattery, M. Yamaguchi, K. I. Arai, and R. DuBroff: *2003 IEEE Int. Symp. Electromagn. Compatibility*, TH-A-P1-11, Istanbul, Turkey (2003).
- 6) M. Inoue, M. Levy, and A. V. Baryshev: *Magnetophotonics from theory to applications* (Springer, New York, 2014).
- 7) H. Nasuno, S. Hashi, and K. Ishiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 4011 (2011).
- 8) D. Tatsuoka, S. Hashi, K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **4**, 37 (2020).
- 9) T. Karita, R. Ishida, T. Goto, K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **7**, 40 (2023).
- 10) A. Barman, T. Kimura, Y. Otani, Y. Fukuma, K. Akabane, and S. Meguro: *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 123905 (2008).
- 11) E. Bogatin: *Signal and Power Integrity-Simplified*, p. 389, (Maruzen Shuppan, Tokyo, 2018).

- 12) F. Zahedi, E. Mehrshahi, and A. Jahanian: *IEEE Trans. Circuits Syst.*, **69**, 4168 (2022).

2023年10月12日受理, 2023年11月24日再受理, 2023年12月06日採録