

電気光学結晶を利用したセンサの利点と新たな応用について

佐々木 愛一郎[†] 森村 浩季[†] 加々見 修[†]

[†] NTT 先端集積デバイス研究所 〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

E-mail: [†] {sasaki.aiichiro, morimura.hiroki, kagami.osamu}@lab.ntt.co.jp

あらまし 電気光学結晶を利用したセンサ(EO センサ)は、様々な周波数帯の電界や電気信号を検出する手段として古くから利用されてきた。またこれまでに複数の EO センサが商用化されている。その一方で、EO センサの特徴を十分に活かしたキラーアプリが見出されているとは、必ずしもいえない状況にある。このような状況の打開に向けて、本稿ではまず EO センサの長所と短所を再整理する。前者として「高速性・低侵襲性・絶縁性」の3点が挙げられる一方、後者としては特に「感度の低さ」を認識することが重要である。また本稿では、EO センサの長所の1つである絶縁性に着目した新しい応用例を紹介する。近年では人体通信やワイヤレス給電など、MHz 帯の電界や磁界を利用したシステムの研究開発が盛んになっている。このようなシステムで使われる MHz 帯の電界や磁界が、概して放射界ではなく準静界であることに起因し、電子計測器の存在自体がシステムの変性してしまうという問題が存在する。このため汎用的な電子計測器だけでシステムの変性を正しく評価することは困難であるが、EO センサの長所である絶縁性を利用することにより、このようなシステムの正確な評価が可能になる。

キーワード 電気光学結晶, 電気光学センサ, 電界, 電気信号, アプリ

On advantages and applications of sensors using electrooptic crystals

Ai-ichiro SASAKI[†] Hiroki MORIMURA[†] and Osamu KAGAMI[†]

[†] NTT Device Technology Laboratories, NTT Corporation 3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa,
243-0198 Japan

E-mail: [†] {sasaki.aiichiro, morimura.hiroki, kagami.osamu}@lab.ntt.co.jp

Abstract Sensors that adopt electrooptic crystals, which are called EO sensors, have been utilized for detecting electric fields and signals with various frequency bands since a long time ago. Several EO sensors have already been commercialized by several manufacturers. However, we cannot definitely say that killer applications of EO sensors have already been found. To break this situation, we reconsidered both advantages and disadvantages of EO sensors. It is emphasized that EO sensors possess three advantages; large bandwidth, low invasiveness, and isolation. On the other hand, a remarkable disadvantage of EO sensors is poor sensitivity. We introduce novel application examples in which isolation nature of EO sensors is utilized. Recent year, systems that use electric of magnetic fields of MHz-frequency bands are actively studied. For example, these are intrabody communication and wireless power transfer. Electromagnetic fields used in such systems are not radiation but quasistatic. Owing to this fact, there exists severe problem that measurement apparatuses can easily change characteristics of the systems under test. Although it is difficult to correctly evaluate characteristics of such systems only with purely-electrical apparatuses, precise evaluation becomes possible by utilizing isolation nature of EO sensors.

Keyword Electrooptic crystal, Electrooptic sensor, Electric field, electrical signal, applications

1. はじめに

電気光学結晶に電界を印加すると、光に対する結晶の屈折率が変化する。電気光学(Electro-Optic; EO)結晶のこのような性質は、高速光変調器として今日広く利用されている。また EO 結晶と光を併用すると、電界を検出することもできるので、EO 結晶は電界センサとしても古くから研究されてきた。以降本稿では、EO 結晶と光を利用した電界センサのことを、EO センサと呼ぶこととする。

EO センサの歴史は古く、1970 年代から研究が始まり [1], 1980 年代には高速電気信号を検出する手法として最初のブームを迎えた [2]。純電気的なセンサと異なる様々な性質を有する EO センサは、その後複数のメーカーによって商用化されてきた。

そのような長い歴史にも関わらず、EO センサがごく限られた用途で使われているものの、未だに計測ツールとして広範に用いられているとは言えないのが実情であろう。また EO センサをはじめとした「電磁界光計測技術」が体系化されておらず、「ある種の混乱状態が存在する」とも指摘されている [3]。

このような状況を考慮し、本論文では EO センサの利点を整理すると共に、筆者のグループにおける EO センサの新しい応用例を紹介し、EO センサ普及に向けた議論の題材としたい。

2. EO センサの特性と分類

図 1 に EO センサの応用例を示す。図 1 から、EO センサの応用は 2 種類に分類されることがわかる。

1 つは、EO センサの高速性を活かした応用である。高速性は EO センサの重要な性質の 1 つだが、これは EO 効果と光の双方の高速性に拠る。EO 効果自体の応答帯域は、直流から光周波数領域にまで渡る。現実的には、EO 結晶自身のサイズや、結晶に取り付けられたアンテナの構造にも依存するが、特に THz 波の検出には EO センサがしばしば用いられる [4]-[6]。また EO センサの高速性を活かした応用では、光自身の高速性も重要な役割を担う。このような応用では、しばしばサブピコ秒の光パルスが用いられるが、これは電気的には発生困難な極めて高い周波数成分を含む信号を、短光パルスによって簡単に手に入れることができるからである。EO センサにおいては、EO 結晶・被検出電界・光・検出信号の四者を、それぞれミキサ・RF・LO・IF と解釈することができる [7]。EO センサは、超広帯域ダウンコンバージョンシステムと解釈できる。

図 1 に戻ると、EO センサのもう 1 つの重要な性質は絶縁性であることがわかる。EO センサのヘッド部 (EO 結晶) と測定器をリンクするのは光 (ファイバ) なので、センサヘッドを測定系から電気的に絶縁することができる。被測定対象によっては、測定系からの絶

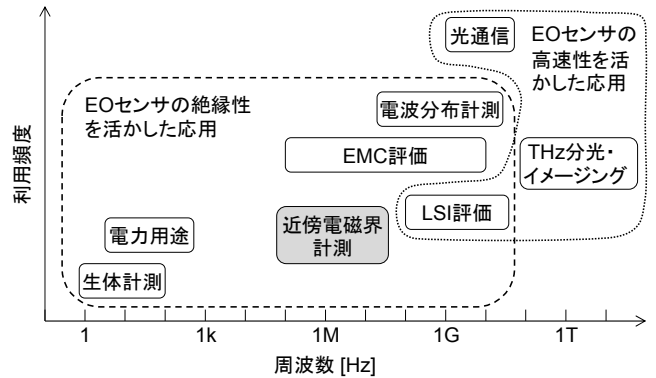


図 1. EO センサの応用例。

縁が必須である場合がある。また必須でなくても、精度の高い測定を行うために、被測定対象を測定系から絶縁することが望まれる場合がしばしばある。被測定対象を測定系から絶縁するのは、純電気的なセンサでは困難であり、EO センサの利点が際立つ。

以降では、EO センサの絶縁性を活かした用途について議論する。

3. EO センサを用いた標準的な測定系

ここでは例として、被測定物近傍の電波を測定する場合を考えてみる。3 つの測定系による電波計測の概念を図 2 に示す。図 2(a)は、純電気的な手法による電波計測である。被測定物近傍に置かれた受信アンテナと測定器は、同軸ケーブルなどの電気ケーブルで接続される。アンテナで受信された電波は同軸ケーブルによって電気信号として測定器に届けられるが、ケーブルによる不要電波の放射や散乱電波の発生などの悪影響があるため、様々な対策を行っても精度の高い測定が困難であるとされる [8]。ただし、図 2 の中で最も感度が高いのは (a) の系であり、微小信号計測には最も適している。

電気ケーブルによる悪影響を排除するのに有効とされるのが、図 2(b) に示した電波計測系である [9]-[10]。アンテナで受信された電波の信号は、EO 変調素子で光信号に変換され、光ファイバで測定系に届けられる。光ファイバは絶縁体なので、少なくとも不要電波が放射されることはなく、また散乱電波も格段に低減されると考えられる。ただし感度は図 2(a) の系に劣る。

図 2(c) は、金属による被測定電磁界の擾乱を極限まで抑えるために、EO 変調素子のアンテナさえも除去した測定系である。図 2(c) のように、一切の金属を使わずに電磁界を検出できるのは EO センサの特色であり、純電気的な手法に対するアドバンテージと思われる。アンテナが無いためセンサヘッドの小型化が可能であり、DUT (Device Under Test) 近傍の電界を高い空間分解能で計測するのに向いている。ただしアンテナで

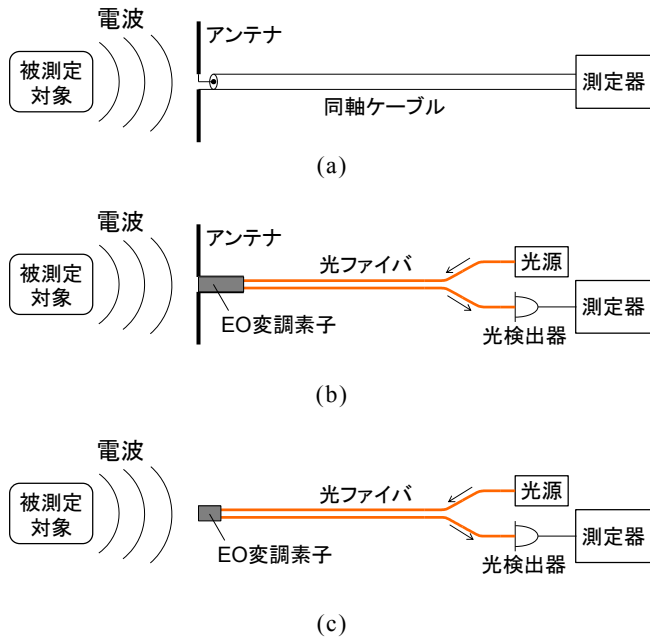


図 2. 被測定対象近傍の電波計測. (a) 純電氣的な手法による電波計測. (b) EO センサとアンテナを組み合わせた電波計測. (c) アンテナを利用しない EO センサによる電波計測.

感度を稼ぐことができないので、図 2 の中では(c)の測定系が最も感度が低く、その感度は EO 結晶固有の性質(誘電率、屈折率、ポッケルス定数)のみで決まる。金属を含まない特色を活かし、強電界計測への適用も提案されている[11]。強電界下では、図 2(c)に示した EO センサの感度の低さが問題とならないので、強電界領域の高空間分解能測定は、EO センサの有望なアプリケーションとなる可能性がある。

以上の理由から、一般に EO センサは、「被測定電磁界への擾乱が小さい」と評価されている。図 2 を見ると、EO センサでは金属ケーブルが使われていないので、確かに擾乱が小さいと思われる。また図 2(c)はセンサヘッドにも金属が含まれないので、アンテナを有する系と比べて擾乱が小さな測定が可能と予想される。ただし、誘電体である EO 結晶やファイバは空気と異なる誘電率を有しているので、擾乱を完全に抑えることは不可能である。EO センサの真の有効性を示すには、EO 結晶やファイバが被測定電磁界に与える影響の定量的な検討を行い、純電氣的な測定系に対するアドバンテージを明確に示す必要があるだろう。

4. EO センサの新しい応用

ここ 10 年を振り返ると、Near-Field Communication (NFC)[12]やワイヤレス給電[13]-[14]、そして人体通信[15]など、実用化されたものから研究段階の技術まで、MHz 帯以下の電界や磁界を利用した技術が登場した。

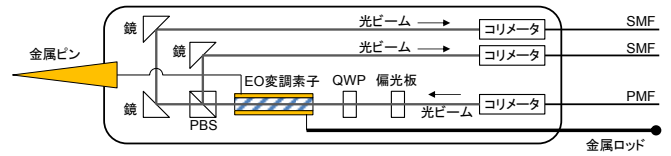


図 3. MHz 帯信号計測に適した EO センサの構造.

これらのシステムでは情報やエネルギーを携帯端末に送るために、電波だけではなく、電界や磁界が利用されている。このようなシステムを評価するには、携帯端末が受信した情報やエネルギーを正確に測定するのが望ましいが、(後で説明するように)それは簡単ではない。本章では、このようなシステムの評価に EO センサが有効であることを、具体例を交えて説明する。

4.1. MHz 帯信号計測に適した EO センサ

MHz 帯以下の電磁界計測用に我々が開発した EO センサの構造を図 3 に示す。レーザ光源などから出射された直線偏光が、偏波保持ファイバ(PMF)によって EO センサに導かれる。センサ内で空間に放射された光ビームは、1/4 波長板(QWP)によって円偏光に変換された後、EO 変調素子に入射する。簡易な構造でセンサの感度安定性を高めるには、自然複屈折を有さない結晶が適しているため、THz 検出などで専ら利用されている ZnTe を EO 変調素子材料として利用した。EO 変調素子で偏光変調を受けた光ビームは、PBS で 2 つの強度変調光に変換・分離された後、単一モードファイバ(SMF)によって差動フォトレシーバなどに導かれ、電気信号に変換される。

EO 変調素子には 2 つの電極が形成されており、それぞれ金属ピンと金属ロッドに接続されている。信号を検出する際には、通常金属ピンを DUT のモニタ点に接触させる。一方金属ロッドは、測定の目的に応じて DUT のグラウンド(GND)に接触させる場合もあれば、フローティングで利用する場合もある。本センサの詳細は[16]-[17]に譲り、以降では 2 つの具体例を用いて、EO センサの絶縁性を活かした利用法を紹介する。

4.2. 電界検出への応用

MHz 帯の電界検出への応用例として、人体通信チャネルの評価について説明する。人体通信とは、情報に乗せた MHz 程度の電界の伝送路として人体を利用し、複数の端末間でデータをやりとりするものである。人体通信のシステム例を図 4(a)に示す。送信端末には電極 T+と T-が取り付けられ、T+と T-の間に送信電圧を発生させる。受信端末には電極 R+と R-が接続され、R+と R-の間に生じた電圧を受信する。図 4(a)から想像されるように、人体通信で対象となるのは主にモバイル端末である。したがって端末の回路や電極は常にフローティング状態であることに注意する必要がある。

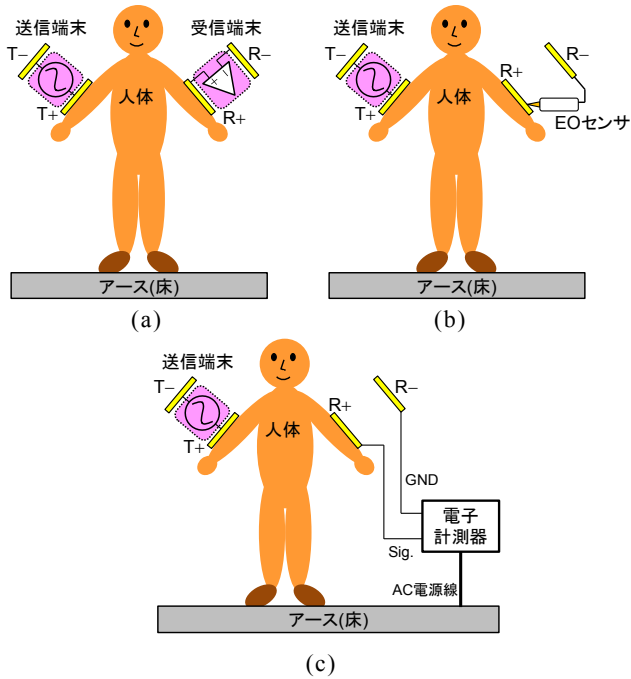


図 4. 人体通信システムとその評価系. (a) 基本的な人体通信システム. (b) EO センサを利用した人体通信チャネルの評価. (c) 電子計測器を利用した人体通信チャネルの評価.

図 4(b)は, EO センサを利用して受信信号を評価するためのセットアップである. 図 3 に示した EO センサの金属ピンとロッドをそれぞれ R+ と R- に接触させ, 電極間に生じた電圧波形を測定する. このように EO センサを電極に接触させたとしても, R+ と R- は図 4(a) と同様にフローティング状態に維持されるので, EO センサによって受信信号を正確に評価することが可能である.

一方, 図 4(c)は電子計測器(例えばオシロスコープやスペクトラムアナライザ)を利用して受信信号を測定する場合のセットアップである. R+ と R- は, それぞれ電子計測器の信号(Sig.)端子とグラウンド(GND)端子に接続される. 通常電子計測器は AC 電源で駆動されるので, 電子計測器の GND 端子とアースが短絡もしくは低いインピーダンスで結合する. その結果 R- がアースに短絡され, R- はフローティングでなくなるために, 受信信号を正確に評価できなくなる.

人体通信チャネルは等価回路で表すことができるので, 図 4 に対応する等価回路モデルを図 5 に示す. 図 5(c)のように, 電子計測器を接続した場合には, AC 電源線の存在によって等価回路のトポロジーが変化する. このように, 電子計測器を接続することによって人体通信チャネル自体が変化するので, 電子計測器で携帯端末の受信信号を正しく評価するのは困難である. それに対して図 5(b)の回路トポロジーは, 図 5(a)

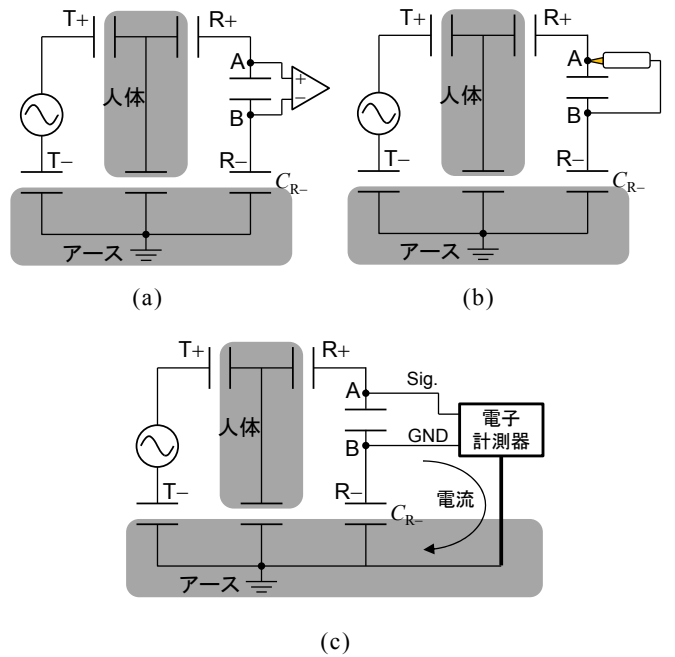


図 5. 人体通信システムとその評価系の等価回路モデル. (a) 基本的な人体通信システム. (b) EO センサを利用した人体通信チャネルの評価. (c) 電子計測器を利用した人体通信チャネルの評価.

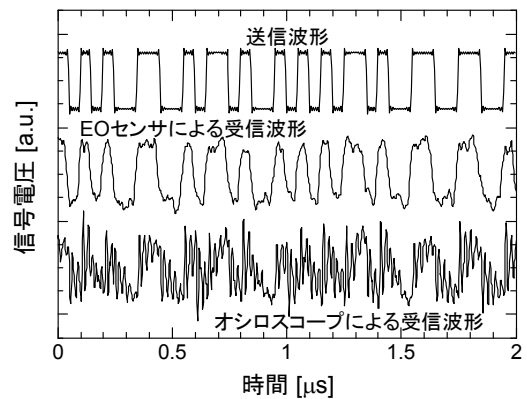


図 6. 人体通信における送信波形と受信波形の比較.

と同一であるので, EO センサを電極に接続しても人体通信チャネルが変化しないことがわかる. これが, EO センサの絶縁性の重要な利点である.

人体通信における送受信波形の比較を図 6 に示す. 送信波形(上段)と比較すると, EO センサで受信した波形(中段)は良好であるが, 電子計測器(オシロスコープ)で得られた波形(下段)には高周波成分が混入し, 波形が劣化していることがわかる. 高周波成分の混入は, 電子計測器を接続することによって R- がアースされることが原因と推定される. 人体通信の利用シーンでは, R- はフローティングに保たれるので, EO センサによってはじめて, 正しいチャネル評価が可能になる.

4.3. 磁界検出への応用

近年のワイヤレス給電の研究開発ブームに伴い、磁界の空間分布を計測する必要性が増えている。最後に、磁界分布計測における EO センサの有効性について説明する。

EO 結晶は磁気光学効果[19]を有していないので、EO 結晶に磁界をかけても光の屈折率変化は起きない。そこで EO 結晶で磁界を検出するために、EO 結晶に受信ループアンテナを取り付け、磁界を電圧(=起電力)に変換してから検出する方法が報告されている[20]。本稿では、ループアンテナを搭載しない図 3 のプローブを利用し、間接的に磁界分布を正確に測定する方法について説明する。

磁界分布測定系を図 7 に示す。磁界を生成するループアンテナは x - y 面に固定されている。磁界ベクトル \mathbf{B} の各成分 B_x, B_y, B_z を検出することが可能な三軸磁界受信端末(電池駆動)を用意し、端末が検出した電気信号を EO センサでプロービングする。EO センサ自身は磁界を検出できず、また微小電磁界計測には不向きだが、感度の高い磁界受信端末で増幅した電気信号を EO センサでモニタすることにより、電子計測器(=受信端末)の高感度性と EO センサの絶縁性の双方を活かした磁界測定が可能になる。

試作した三軸磁界受信端末の構成を図 8 に示す。三軸受信ループアンテナで検出された 10.7MHz の磁界信号は独立にアンプで増幅された後、455kHz の IF 信号($V_x^{IF}, V_y^{IF}, V_z^{IF}$)に変換される。これら 3 成分の IF 信号に対してノルム演算

$$V_{NRM}^{IF} = \{(V_x^{IF})^2 + (V_y^{IF})^2 + (V_z^{IF})^2\}^{1/2} \quad (1)$$

を施すことで、磁界ベクトルの大きさ $|\mathbf{B}|$ に比例した IF 信号 V_{NRM}^{IF} を得ることができる。三軸磁界受信端末の写真を図 9 に示す。

図 8 に示した実験では、 z 軸上に配置した磁界受信端末とループアンテナの距離を変えながら、EO センサで $V_x^{IF}, V_y^{IF}, V_z^{IF}$ を測定し、後処理で V_{NRM}^{IF} を求めた。結果を図 10 に示す。磁界受信端末は電池で駆動されているため、端末回路の GND はフローティング状態にあり、EO センサでプロービングしてもフローティング状態は維持される。しかしオシロスコープを端末に接続すると端末回路の GND がアースされ、端末の GND 状態が変化する。図 10 の結果を見ると、フローティング状態では計算値と測定値がよく一致し、磁界分布を正確に測定できていることがわかる。一方、オシロスコープを端末に接続した時(earth)には不要信号が混入し、計算値と測定値の乖離が大きくなる。本稿では詳細な原因分析を行わないが、オシロスコープなどの電子計測器を端末に接続すると、端末回路の GND がアースされることで電流パスが発生し、ループアン

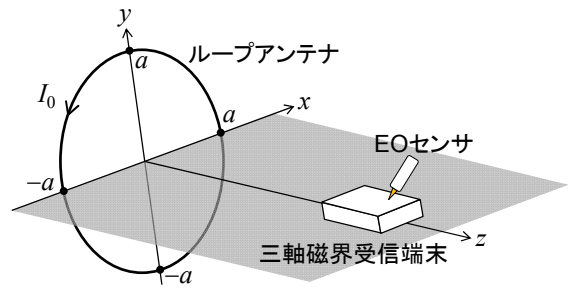


図 7. 三軸磁界受信端末によるループアンテナ近傍の磁界分布測定系。

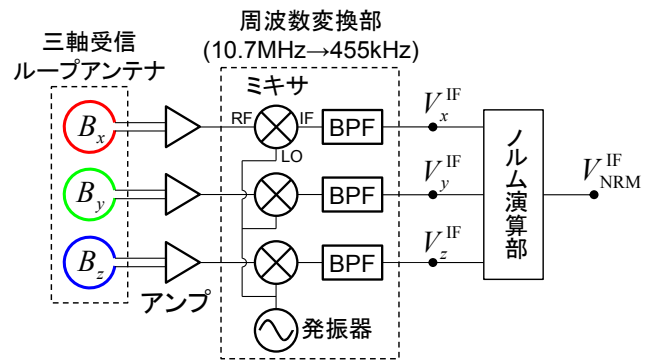


図 8. 三軸磁界受信端末の構成。

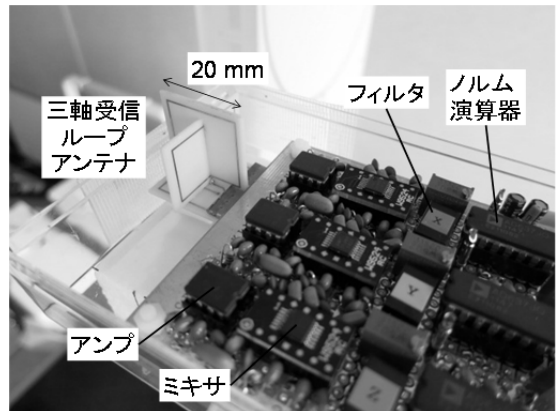


図 9. 三軸磁界受信端末。

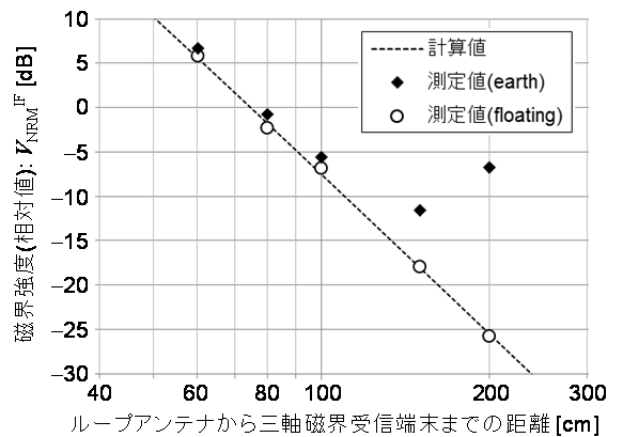


図 10. ループアンテナ中心軸上の磁界分布。

テナからの不要電界が混入したものと推定される。このような問題を電子計測器のみで回避するのは極めて困難であるが、EO センサを利用すれば、容易に解決することができる。MHz 帯電磁界を利用したシステムを正しく評価するには、EO センサの絶縁性を活かした計測法が有効である。

5. まとめ

EO センサの更なる普及を目的とし、EO センサの特徴を見直した。EO センサは、高速性・高空間分解能・低侵襲性・絶縁性、の4点において、電子計測器に対するアドバンテージを有していると考えられる。一方、感度の面では電子計測器に分があり、一般にEO センサは微小信号計測には適さない。EO センサを活かすには、利点と欠点を正しく理解することが重要である。

本稿では特に、EO センサの絶縁性を活かした応用例を紹介した。近年研究開発が活発化しているMHz帯の電界や磁界を利用したシステムは、特に測定系の影響を受けやすく、電子計測器単体での正しい評価が正しい結果を与えないことが多い。絶縁性の高いEO センサは、MHz帯の電界や磁界などニアフィールドを利用したシステムの評価に極めて有効であり、今後メジャーな測定ツールとして普及する可能性を十分に秘めている。今後の展開に期待したい。

文 献

- [1] 桑原伸夫, “電気光学効果を用いた電磁界センサの歴史と今後の課題,” 信学論(B), vol.J97-B, no.3, pp.235-242, March 2014.
- [2] 永妻忠夫, 久武信太郎, “電気光学効果を利用した電磁界計測技術の動向,” 信学論(B), vol.J97-B, no.3, pp.243-252, March 2014.
- [3] 土屋昌弘, “光技術を活用する電磁界計測手法,” レーザー研究, vol.33, no.6, pp.365-372, June 2005.
- [4] Z. Jiang and X.-C. Zhang, “Terahertz imaging via electrooptic effect,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.47, no.12, pp.2644-2650, Dec. 1999.
- [5] Y. Cai, I. Brener, J. Lopata, J. Wynn, L. Pfeiffer, J. B. Stark, Q. Wu, X.C. Zhang, and J. F. Federici, “Coherent terahertz radiation detection: Direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection,” Appl. Phys. Lett., vol.73, no.4, pp.444-446, 1998.
- [6] S.-G. Park, M. R. Melloch, and A. M. Weiner, “Comparison of terahertz waveforms measured by electro-optic and photoconductive sampling,” Appl. Phys. Lett., vol.73, no.22, pp.3184-3186, 1998.
- [7] A. Sasaki and T. Nagatsuma, “Millimeter-wave imaging using an electrooptic detector as a harmonic mixer,” IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol.6, no.5, pp.735-740, Sept./Oct. 2000.
- [8] 大沢隆二, “光電界センサによる電波測定の技術と実測例,” RF ワールド, no.12, pp.33-47, Nov. 2010.
- [9] 鳥畑成典, “導波路型光電界センサの実用化と将来展望,” レーザー研究, vol.33, no.6, pp.384-388, June 2005.
- [10] 日高直美, 菅間秀晃, 土屋明久, 辻野真吾, 石田武志, 橋本修, “マイクロ波帯域において高感度な光電界センサ,” 信学論(B), vol.J97-B, no.3, pp.253-262, March 2014.
- [11] 日高邦彦, 河野照哉, “ポッケルス素子による放電空間中の電界測定,” 静電気学会誌, vol.7, no.2, pp.114-123, July 1983.
- [12] R. Want, “Near field communication,” IEEE Pervasive Computing, vol.10, no.3, pp.4-7, Jul.-Sep. 2011.
- [13] K. Takeno, “Wireless power transmission technology for mobile devices,” IEICE Electron. Express, vol.10, no.21, Nov. 2013.
- [14] I. Awai, “Basic characteristics of “Magnetic resonance” wireless power transfer system excited by a 0 ohm power source,” IEICE Electron. Express, vol.10, no.21, Nov. 2013.
- [15] T. Zimmerman, “Personal area networks: Near-field intrabody communication,” IBM Syst. J., vol.35, nos.3/4, pp.609-617, 1996.
- [16] A. Sasaki and M. Shinagawa, “Principle and application of a sensitive handy electrooptic probe for sub-100-MHz frequency range signal measurements,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.57, no.5, pp.1005-1013, May 2008.
- [17] A. Sasaki, A. Furuya, and M. Shinagawa, “Study of semiconductor electro-optic modulators for sensing extremely-low-frequency electrical signals,” Sensors and Actuators A, vol.151, no.1, pp.1-8, 2009.
- [18] A. Sasaki, R. Okuizumi, T. Mizota, H. Morimura, and O. Kagami, “An isotropic receiver for area discrimination with magnetoquasistatic fields,” Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. 2014, no.TH3G-31, pp.968-970, Sendai, Japan, Nov. 2014.
- [19] S. Wakana, E. Yamazaki, S. Mitani, H. Park, M. Iwanami, S. Hoshino, M. Kishi, and M. Tsuchiya, “Performance evaluation of fiber-edge magneto-optic probe,” J. Lightw. Technol. vol.21, no.12, pp.3292-3299, Dec. 2003.
- [20] E. Suzuki, S. Arakawa, H. Ota, K. I. Arai, and R. Sato, “Optical magnetic field probe with a loop antenna element doubly loaded with LiNbO₃ crystals,” IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no.11, pp.1989-1996, Nov. 2004.