レーザオリジナル

レーザを利用した高周波電磁界計測

佐 薙 稔*・杉 原 洋*・中 島 将 光*

(1987年6月3日 受理)

Measurement of RF Electromagnetic Fields Utilizing Lasers

Minoru SANAGI*, Hiroshi SUGIHARA*
and Masamitsu NAKAJIMA*

(Received June 3, 1987)

This paper describes the measurement of RF electromagnetic fields utilizing lasers. The system consists of a sensor in which light is modulated by RF electromagnetic fields to be measured, and a demodulator to detect the amplitude and phase of the RF fields. Two kinds of sensors are explained and some methods of light detection accompanying the frequency conversion are proposed. A simple model experiment was made demonstrating the validity of the system.

Key Words: Sensor, Light modulation, Light detection, Electromagnetic fields, Frequency conversion

1. まえがき

エネルギー及び情報伝送の重要な媒体としての高周波は通信、核融合プラズマ加熱、半導体製造装置や電子レンジなどに用いられる。その場合、電磁界の状態、つまり振幅および位相の空間分布を知る必要がある。従来は電磁界中にアンテナを挿入し、そこで受け取った信号を同軸ケーブル等で外まで導いてセンサ計測する方法がとられてきた。しかし、この方法では、導体によって電磁界が乱れてしまうという欠点があった。また、同軸ケーブルは高周波における損失が大きく、ケーブルが長くなると取り扱いも不便であった。

光はその超高周波性から、高周波の情報の伝

達に適している。光はまた、電磁界中を伝搬しても相互に干渉を起こさない。そして、光学素子は主として誘電体で構成されているので、それらを電磁界中に挿入しても電磁界へ与える影響は少ない。したがって、高周波電磁界の計測に非常に適している。つまり、信号を検出して直ちに、その信号を光に載せ、検出部まで光として伝送してやればよい。そのため、光を用いた高周波電磁界計測の研究が進められている。Avalosら¹⁾は、ループアンテナで検知した電磁界を半導体レーザー (LD) のバイアスに導き、光強度を変調することにより、2~3 GHzのマイクロ波電磁界の振幅を測定している。この方式の場合、バイアス電圧を被測定電磁界の外から導線などで取り込むと電磁界が乱されてしま

* 京都大学工学部電子工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

* Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University (Yoshidahommachi, machi, Sakyo-ku, Kyoto 606)

うので、電池を用いたり、ループアンテナを用いて電界中から電力を取り入れたりするなどの工夫がなされている。Chang²⁾は、光を変調するのに電気光学効果を用いている。KDP結晶はある方向に電界をかけると、その中を伝搬する光の偏光面が回転するので、結晶の前後に偏光子を置けば出力光は強度変調されることになる。これを用いて、3.1GHz、0~20kV/cmの電界を測定している。強度変調された光をストリークカメラで検知し、デジタル信号に変換したのちプロットに出力する。この方法によれば、電界の各空間ベクトル成分の振幅のみならず位相までも知ることができる。

これまでの、光をどのように変調するかに重点がおかれ、変調光を検波し、処理を行う部分については、直接検波するという簡単な方法が取られてきた。しかし、対象となる電磁界の周波数が高くなるとその高い周波数での、増幅および処理がむずかしくなる。そこで、この点についても検討する必要がある。

本論文では、まず光を用いた高周波電磁界計測の概略について述べる。次にセンサ部の具体的な例をあげ、それらの動作を理論的に解析する。そして、後の信号処理を容易にすべく、新しい検波方式^{3,4)}を提案し、簡単なモデル実験の結果⁴⁾について述べる。

2. 高周波電磁界測定系

光波による高周波電磁界計測の測定系の概略的な構成は次のようになる。光源から出た光波をセンサ部（プローブおよび光変調器）で、電磁界の情報を得て変調する。変調光を検出部まで伝送して、そこで検波し処理を行う。

さて、センサ部において光を変調する方法には、大きく分けて直接変調と外部変調の二つがある。直接変調とは光源に加える電流または電圧を変化させることによって光を変調する方法である。この方法は高効率で、電子回路の工夫だけで、比較的簡単に実現できる利点を持つ。外部変調とは外部光源から一定の光を出射させ、その光を被測定電磁界中に置かれた外部変調器

に通すことによって変調する方法である。変調する場合には電気光学効果や音響光学効果等が用いられるが、電磁界計測の場合には電気光学効果を用いるのが適当であろう。

変調された光を検出部まで伝送する媒体として、光ファイバーは高耐電圧性、絶縁性、小型といった特徴によって最適である。伝送する距離があまり長くないので、使用できるファイバーの種類に特に制限はない。

最も簡単な変調光の復調は、フォトダイオード等を用いて光を直接検波する方法である。従来はこの方法が用いられてきたが、被測定電磁界の周波数が高いと、検波後の信号増幅および処理が困難になる。そこで、光検出と同時に取り扱い容易な低い周波数に変換するという新しい方法を提案する。その方法としては検波器の検波効率を変調する方法⁴⁾や前もって光を変調してから検波する方法³⁾がある。このようにすると、光検出器の応答限界以上の周波数の電磁界測定の可能性も出て来る。

3. センサ部

直接変調を用いるとセンサ部に光源を組み込むことになるので、光源が被測定電磁界の中に存在することになり、光源のバイアスをどのように供給するかが問題である。直接変調が可能な光源としては発光ダイオードや半導体レーザーがあるが、変調周波数が高くとれる半導体レーザーの方が適している。

外部変調によれば光源を被測定電磁界の外に置くことができるし、変調周波数も直接変調よりも高くとれるといった利点がある。外部変調器を利用したセンサ部として、Fig.1のような反射型変調器を用いた構成⁵⁾が考えられる。基板上に導波路を作製し、その導波路の一つの端面に光ファイバーを固定し光を入射させる。もう一方の端面には反射鏡を作製し、光を入射端に向けて反射させる。入射端にもどってきた光を入射の時と同一のファイバーで取り出した後、ビームスプリッタで検出部へ導く。ダイポールアンテナによって検出した電磁界を導波路

の両側にある電極に導き、光を変調する。この構成にすると光は往復する間に変調を受けるので、感度が良くなる利点がある。電気光学効果を利用した外部変調の方式としてはいろいろあるが、ここでは位相変調と強度変調の一種である導波一放射モード結合型変調⁶⁾を取りあげる。

位相変調された光を復調するには干渉を用いて強度変調光に変換する必要がある。Fig.1のような構成にすると、ファイバーに出力される光には変調器を通ってきた光と、ファイバーから変調器への入力端で反射して変調を受けていない光とがある。この二つが干渉を起こすため、変調部を通った光が位相変調を受けると強度変調光に変換される。この場合、入射光の強度 I_{in} に対する出射光 I_{out} の比を、電界 E^e に対して、示すとFig.2のようになる⁵⁾。ただし、変調器の

Fig.1 An example of structure of the sensor utilizing a reflection type light modulator.

Fig.2 Characteristics of the sensor using a phase modulator.

導波路の損失をパラメータにとっている。この計算においては次のように諸条件を設定した。導波路の基板には LiTaO_3 を用い、変調には電気光学効果の最も大きい r_{33} を用いた。光の波長は 633 nm とする。ファイバーと光変調器の導波路との結合損失は 3 dB とし、ファイバーからの入力端での反射はファイバと導波路の屈折率によるものとした。電界の周波数は 2.46 GHz とし、寸法はアンテナ長 $h=6.1\text{ mm}$ 、電極長 $l=5\text{ mm}$ 、電極間隔 $s=10\text{ }\mu\text{m}$ とした。電界がないときに変調器を通った光と通っていない光との位相が 90° ずれているとして計算した。計算結果より、設定した条件では 1 kV/cm 程度の電界を測定することができることがわかる。

導波一放射モード結合型変調では電界をかけると導波モードと放射モードが結合し、伝搬するにつれて光の強度は減衰していくので、強度変調ができる。基板に LiTaO_3 を用い、パラメータを適当に設定して、Nbを熱拡散して導波路を作製するとかなりの効率で変調できることがわかっている⁷⁾。この場合の動作の様子を位相変調器を用いた場合と同様な条件で計算した結果をFig.3に示す⁵⁾。ただし、変調器を通った光と通っていない光は同相であるとし、導波路のパラメータは効率が最もよくなるように設定されているものとする。設定した条件では 20 kV/cm

Fig.3 Characteristics of the sensor using a modulator with guided-to-radiation mode coupling.

程度までの電界が測定できる。

電気光学効果を有する物質は一般には誘電率が大きく、そのために被測定電磁界中にこのセンサを挿入すると電磁界をかなり乱してしまう恐れがある。変調器自身の感度を高めるとか、低雑音の増幅を行うことによってセンサ部の大きさを小さくする努力が必要である。上に挙げた例では、被測定電磁界はかなり強いのでセンサの大きさは波長の数%程度である。

4. 変調光の検波と信号処理

4.1 効率変調検波方式

光検波器の効率は一般には入射光強度に対する出力電流の比として与えられる。しかし、ここでは検波器だけでなく、外部回路も含めて考え、出力を電圧の形で取り出すものとする。したがって、検波効率を

$$\eta = \frac{dv}{dp}$$

と定義する。ここで、 v は出力電圧で、 p は入射光強度である。微分で定義したのは以下で述べるように強度変調光を検波することを考えるためである。周波数 ω_e で強度変調された光信号

$$p = P_0 + P_1 \cos(\omega_e t + \phi_e) \quad (2)$$

を検波器に入射させると、その交流検波出力電圧 v は P_1 があまり大きくなければ、検波効率 η と入射光電力 p の積として

$$v = \eta P_1 \cos(\omega_e t + \phi_e) \quad (3)$$

と表わされる。今、検波効率 η は光検波器の両端の電圧の関数になっていると考える。ここではバイアス電圧 v_b の関数になっていると考え、簡単のため η とバイアス v_b が一次の関係にあるとすれば

$$v = A(v_b + B) P_1 \cos(\omega_e t + \phi_e) \quad (4)$$

とおける。但し、 A, B は定数である。この v_b を局部発振周波数 ω_m で変調して

$$v_b = M_0 + M_1 \cos \omega_m t \quad (5)$$

とおき、(4)式に代入すると、

$$\begin{aligned} v &= A(M_0 + M_1 \cos \omega_m t + B) \\ &\quad \times P_1 \cos(\omega_e t + \phi_e) \\ &= A(M_0 + B) P_1 \cos(\omega_e t + \phi_e) \\ &\quad + A M_1 P_1 [\cos\{(\omega_e - \omega_m)t + \phi_e\} \\ &\quad + \cos\{(\omega_e + \omega_m)t + \phi_e\}] / 2 \end{aligned} \quad (6)$$

となる。変調周波数 ω_m を適当に選ぶと、増幅および処理のしやすい $\omega_e - \omega_m$ の中間周波成分

$$v_1 = A M_1 P_1 \cos\{(\omega_e - \omega_m)t + \phi_e\} / 2 \quad (7)$$

を得る。フィルタでこの成分を取り出して、包絡線検波すれば、検出すべき高周波電界の振幅 P_1 に比例する量が得られる。この方法を以下では変調波ヘテロダイン検波と呼ぶことにする。

一方、位相 ϕ_e を検出するには、 $\omega_e = \omega_m$ として v_1 を直流分としてやればその大きさが $\cos \phi_e$ に比例することになる。これを変調波ホモダイン検波と呼ぶことにする。

以上のように検波器の検波効率を変調することによって光信号を検波するので、これら二つの方式を効率変調検波方式ということにする。この方式は、現在用いられている直接検波方式において検波器のバイアスを局部発振周波数 ω_m で変化できるように変更するだけでよく、比較的簡単に電子回路のみで実現できる利点がある。

以上においては検波効率 η とバイアス電圧 v_b が一次の関係にあるとしたが、実際にはそのような単純な関係ではない。検波出力電圧は入射光強度 p とバイアス電圧 v_b との複雑な関数であって、高次の非線形項によっていろいろな周波数成分が生じる。しかし、3次の項では $\omega_e - \omega_m$ の成分は生じないので、4次以上の項が大きいかわり、フィルタで $\omega_e - \omega_m$ の成分を取り出すだけで、元信号に比例した出力が得られる。

ここで検波効率について簡単にふれておく。検波器の効率 η が検波器の両端電圧によって変化する仕組みには主として2通りある。1つは、バイアス電圧が光子→電子の変換効率そのものを変化させるためにバイアス電圧—検波効率特

性が得られるものであり、他の1つは検波器の電流-電圧特性の非線形性によって両端電圧-検波効率特性が生じるものである。前者の場合には、バイアスを局部発振周波数 ω_m で変化させることによって、光子→電子変換時に変調波ヘテロダイン動作を行なって $\omega_e - \omega_m$ の周波数の出力信号を得る。通常、検波器の周波数応答限界は、主に電子の走行効果やダイオード自身および外部回路の容量といった光子→電子変換後の事象に起因するものであるから、 $\omega_e - \omega_m$ をこの限界周波数より低く選べば、検波器の周波数応答限界を超えた情報信号 ω_e であっても効率変調方式によって取り出すことができる可能性がある。

4.2 二重変調方式 (位相検出)

実際に位相 ϕ_e を検出する場合には、変調波ホモダイン動作によって直流分になった電圧だけでなく検波器に存在する他の直流成分が重畳するために、位相信号を安定に分離することが難しい、そこで次のような方法を考える。すなわち、検波器入射光強度を低周波 ω_a で変調する。つまり、

$$\begin{aligned} P_1 &= P_1' (1 + a \cos \omega_a t) \\ P &= P_0 + P_1' (1 + a \cos \omega_e t) \\ &\quad \times \cos (\omega_e t + \phi_e) \end{aligned} \quad (8)$$

とすれば、検波出力成分は

$$v_1 = A M_1 P_1' \cos \phi_e (1 + a \cos \omega_a t) / 2 \quad (9)$$

となる。この中間周波信号をもう一度検波すれば、 $\cos \phi_e$ が得られ、位相角 ϕ_e を求めることができる。

4.3 光変調検波方式

(2)式と同様な振幅変調を受けている被変調光を考える。

$$p = P_0 + P_1 \cos (\omega_e t + \phi_e) \quad (10)$$

変調された光を電氣的に検波する前に、一定の周波数 ω_m の信号により、

$$M_0 + M_1 \cos \omega_m t \quad (11)$$

という特性で強度変調すると、変調後の信号は

$$\begin{aligned} p &= \{P_0 + P_1 \cos (\omega_e t + \phi_e)\} \\ &\quad \times \{M_0 + M_1 \cos \omega_m t\} \\ &= P_0 M_0 + P_0 M_1 \cos \omega_m t \\ &\quad + P_1 M_0 \cos (\omega_e t + \phi_e) \\ &\quad + P_1 M_1 [\cos \{(\omega_e - \omega_m) t + \phi_e\} \\ &\quad + \cos \{(\omega_e + \omega_m) t + \phi_e\}] / 2 \end{aligned} \quad (12)$$

となる。この光信号を光検波器に入射させたとき、 $\omega_e - \omega_m$ の周波数成分のみをフィルタによって取り出すか、あるいは光検波器が ω_e 、 ω_m の周波数成分の信号に応答できないときであっても、 $\omega_e - \omega_m$ の周波数成分には応答できるように ω_m を設定すれば、中間周波成分の検波出力電圧として、(7)式とほぼ同じ、

$$v_1 = P_1 M_1 \cos \{(\omega_e - \omega_m) t + \phi_e\} / 2 \quad (13)$$

が得られる。この検波方式は前もって光を変調してから検波するので、光変調検波方式と呼ぶことにする。位相を検出する場合にも、前に述べた効率変調方式と場合と同様にすればよい。

5. 実験

5.1 予備実験

前章で提案した効率変調検波方式によって、理論通りに強度変調された光信号が検波できるかどうかをまず確かめる。発光素子として半導体レーザー、受光素子としてpin-フォトダイオードを用いた。実験系をFig. 4に示す。LDを周波数1000kHzで変調し、PDのバイアス電圧 v_b は検波効率の変化を大きくするために、電流-電圧特性において非線形性の激しいところで動作点が大きく動くように設定して、周波数1020kHzで変調した。

Fig. 5 (a)はLDを1000kHzで変調した場合 (上) のPD検波出力 V_o (下) である。Fig. 5 (b)はLDに変調をかけず、PDバイアス電圧 (上) のみ変調した場合のPD出力である。Fig. 5 (c)にはLD、PDバイアス電圧共に変調した

Fig.4 Experimental setup for the efficiency-modulated light detection.

場合のPD出力(上)と、それを20kHzのバンドパスフィルタに通した時の出力波形(下)を示した。効率変調検波方式は十分に動作することが確認された。

5.2 センサ計測モデル実験

次に、本来の測定対象である高周波電磁界のモデルとして簡単な回路網を作り、回路各部の電圧の振幅と位相とを測定する。そして、計算値との比較を行なうことにする。変調方式として簡単のため直接変調を用い、プローブによって高周波信号を取り出して、LDを変調するものとした。測定対象はFig.6に示すようにRC回路網に周波数1000kHzの信号源から給電したものをを用いた。センサの各測定点 P_n ($n=1 \sim 10$)の電圧は n が大きいく(信号源から遠ざかる程)振幅は減少し、位相は遅れていく筈である。使用したLDの動抵抗が 6Ω と低く、各測定点にそのまま接続すると各 P_n 点での電圧が大きく変化してしまうので、これに抵抗を直列接続したものをを用いた。この抵抗値は大きいほど良いが、あまり大きくすると十分な電流がLDに流れなくなるので 100Ω とし、これを接続することによる各 P_n 点での電圧振幅・位相の変化はあらかじめ計算時に補正しておく。信号源の周波数が1000kHzの時の各 P_n 点の電圧振幅・位相の計算値を各々Fig.9に実線で示した。振幅に関し

(a)

(b)

(c)

Fig.5 Experimental results of the efficiency-modulated light detection.

(a) Top: modulation voltage across the LD (20mV/div). Bottom: detection voltage across the PD (5mV/div)

(b) Top: bias voltage across the PD. Bottom: detection voltage across the PD (5mV/div)

(c) Top: heterodyne-detected voltage (20mV/div). Bottom: output voltage extracted from the 20kHz filter (0.05mV/div)

Fig. 6 RC model circuit for measurement.

では P_1 点における測定値を1とした場合のこれに対する各 P_n 点の電圧振幅の大きさを示し、位相は P_1 点での測定値を 0° とし、これに対する各 P_n 点の電圧位相のずれの絶対値を示している。

実験は、まず振幅の検出から行なった。この時の実験系をFig. 7に示す。PDはバイアス電圧を周波数1020 kHzで変調し、変調波ヘテロダ

Fig. 7 Experimental setup for detection of amplitude.

Fig. 8 Experimental setup for detection of phase.

Fig.9 Theory and experiment for the RC model circuit. (a) Amplitude (b) Phase

イン動作させて、フィルタで20kHz成分を取り出し、増幅した後、その振幅を測定した。この測定値もP₁点における測定値で正規化したものをFig.9 (a)に記した。これを計算値と比較すると、 n が大きいところではずれが多少あるが、良く一致している。

次に位相 ϕ_e の検出実験を行なった。Fig.8はその実験系である。LDの電流—光出力特性が完全な線形ではないので、(8)式に相当する電流を流すと光に変換された時点でこれも検波（周波数変換）され低周波 ω_a 成分の光が生じてしまう可能性がある。従って、(8)式のLD電流のバイアス値及び振幅は慎重に選んで、検波素子のバイアスを変調しない時には低周波 ω_a 成分が出力されないように設定する必要がある。換言すればLDの光変調特性の良好な線形性が要求さ

れる。Fig.8中の移相器はRC回路網P₁点とPDに印加される角周波数 $\omega_m = \omega_e$ の電圧の位相をそろえる、即ち $\phi_e = 0^\circ$ とするためのものである。なお、この移相器出力には若干の波形の乱れがあった。実験では20kHzで振幅変調した1000kHzを測定対象に加え、PDのバイアスは周波数1000kHzで変調した。この時の低周波20kHz成分の振幅測定値は(9)式からわかるように $\cos \phi_e$ と振幅の積に比例するので、振幅の測定値で割れば、 $\cos \phi_e$ のみの変化分が得られる。この値の逆余弦をとれば ϕ_e が得られる。これをFig.9 (b)に示した。計算値と比べると、 n が小さいところではこれもかなり一致していることがわかる。 n が大きくなるとずれが生じているが、信号が小さくなるので、測定精度の点から誤差が大きくなったのであろう。

6. むすび

本論文ではレーザーを用いた高周波電磁界計測について述べた。2章でシステムの概要について説明し、3章でセンサ部のいくつかの具体的な例をあげ、動作を解析した。4章ではこれまであまり研究されなかった、変調光を検波し、信号処理を行う部分について新しい方法を提案した。対象となる周波数が高くなると、後の処理が難しくなる。したがって、光を検波すると同時に周波数変換することを考える。そのための方法として、検波器の検波効率を変調する効率変調検波方式と、前もって光を変調してから検波する光変調検波方式の二つを提案した。また、位相の検出を容易にするための方法についても述べた。5章では効率変調検波方式による実験結果について述べた。まず、1MHzで予備実験を行い、次にモデル実験として、簡単な回路網の各部の電圧の振幅と位相を検出した。この結果かなりの精度で振幅と位相が検出できることが確かめられた。

今後の課題としては提案した検波方式について更に高い周波数で実験を行い、動作を確かめることである。また、本論文で述べたような方式によると光検波後、信号の増幅が容易である

ので、増幅する場合に利得を大きくとることができる。ここでは論じなかったが、どれほどの感度が得られるかはシステムの内部の雑音、特にレーザーの雑音が問題になると考えられる。したがって、感度と雑音との関係を明らかにすることも重要である。そして、実際に測定系を製作し、高周波電磁界の振幅と位相を測定することである。

謝辞

実験に協力された布施優氏（現在松下電器）に感謝する。本研究の一部は文部省科学研究費特定研究「光波利用センサ」61121006および放送文化基金の援助を受けた。

参考文献

- 1) M. T. Avalos and R. M. Sega: 1984 IEEE MIT-S Digest, 515.
- 2) J. Chang, C. N. Vittitoe, B. T. Neyer and W. P. Ballard: J. Appl. Phys., **57** (1985) 4843.
- 3) M. Nakajima and T. Kawabata: First Optoelectronics Conference (OEC '86) Technical Digest, Tokyo, 1986, D5-5.
- 4) 布施, 佐藤, 中島: 光ファイバーセンサワークショップ, WOFS3-13 (1986).
- 5) 杉原, 崔, 中島: 光ファイバセンサワークショップ, WOFS5-6 (1987)
- 6) D. Marcuse: IEEE J. Quantum Electron., **QE-11** (9175) 759.
- 7) 小野寺, 奥田, 粟井, 中島, 池上: 信学論 (C), (C), **J67-C** (1984) 70.