光電界センサの複素アンテナ係数に関する研究

自動車安全部　※長谷川 智紀　松村 英樹　伊藤 紳一郎
電気通信大学　岩崎 俊
NEC トーキン　鳥畑 成典

1. はじめに

近年、電子機器の発達にともない、あらゆる場所に電子機器が利用されるようになった。自動車も例外にもれず、多くの電子機器が装着されるようになり、電子機器からの EMI(ElectroMagnetic Interference) や自動車のイグニションによる EMI の測定が必要となってきた。

EMI による電磁波の測定に用いるものとして、アンテナがある。アンテナは、多種多様な形状があるため、アンテナ毎に特性が違う。そのため、同じ電界強度を測定した場合でも、整合出力電圧が異なる。そこで、 EMI 測定においては、アンテナの電界・電圧変換係数であるアンテナ係数を用いる。アンテナ係数が既知であるアンテナを用い、周波数による出力電圧の差異を補正し、電界値として比較を行うことが規格により定められている。

一方、電子機器への影響は時間領域における波形の「立ち上り時間」と「ピーク値」が重要であると考えられる (図 1)。これは、鋭く、強い電界ほど、電子機器に与える影響は大きいと考えられるためである。しかし、アンテナ係数を用いた周波数領域における大きさによる比較では、「立ち上り時間」「ピーク値」を判断することはできない。これは、アンテナ係数において、位相情報が欠落しているため、得られた整合出力電圧から、時間領域における電界波形を得ることができないためである。

そこで、アンテナ係数の算出の際に、大きさの比ではなく複素数の比として用い、位相情報を保持したアンテナ係数である複素アンテナ係数 [1] を用いることにより、時間領域における電界波形を取得することが可能であることが報告されている [2]。

本報告では、測定空間の電界への影響が少ないとされている光電界センサの複素アンテナ係数の決定を試みる。そして、光電界センサを用いる際の問題点について検討を行う。

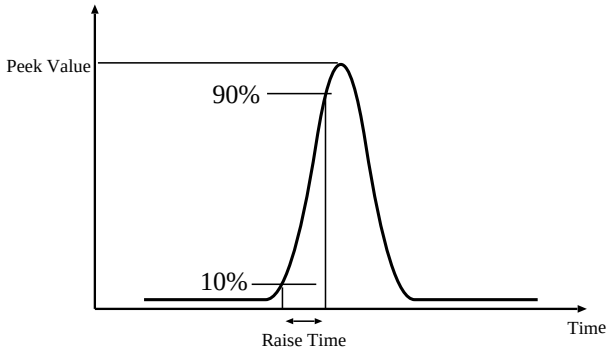

図 1: 立ち上り時間とピーク値

2. 複素アンテナ係数

アンテナ係数 $F(\omega)$ は、図 2に示すように入射電界 $E(\omega)$ と整合出力電圧 $V_o(\omega)$ としたとき、次の式で表すことができる。

$$F(\omega) = |E(\omega)|/|V_o(\omega)| \qquad (1)$$

ただし、 ω は角周波数である。

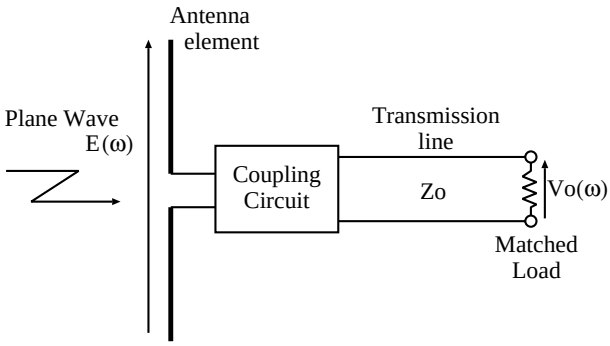

図 2: 複素アンテナ係数の定義

式 (1) では、電界 E と整合出力電圧 V_o の大きさのみを用いている。そのため、位相情報が欠落し、

整合出力電圧 V_o で位相を含んだ測定が可能であっても、アンテナ係数に位相情報が含まれていないため、電界における位相は補正されない。周波数領域における大きさの比較であれば、位相情報は必要でないが、時間領域における波形の比較・検討を行う際、位相情報の欠落は問題となる。

そこで、電界と整合出力電圧を複素数として扱い、得られるアンテナ係数を複素数とした複素アンテナ係数を用いることにより、時間領域における電界波形に対応させる。

複素アンテナ係数は、式 (1) から

$$F_c(\omega) = E(\omega)/V_o(\omega) \qquad (2)$$

となる。

複素アンテナ係数を測定する方法としては、3 アンテナ法 [3] や基準アンテナ法等がある。

3. 光電界センサ

測定に用いた光電界センサの仕様を表 1に、構造を図 3に示す。

今回用いた光電界センサは、ニオブ酸リチウム ($LiNbO_3$) の結晶上にチタン (Ti) を拡散することにより、マッハツェンダ型光干渉計を形成した物である。干渉計は 2 つの光波路からなり、そのうちの一つに対し電界検出部として、高さ 2mm、幅 1mm の二等辺三角形 2 個から構成される微小ダイポールを設置する。この微小ダイポールのエレメント間に生じる電圧により、ポッケルス効果が生じ、光波路の屈折率が変化し、光伝搬速度が低下する。もう一方の光波路はポッケルス効果を受けずミラー部に反射、伝搬する。この 2 つの光波路が合流する部分において振幅変調され、この振幅を測定することにより電界強度を測定することができる。

図 3に示すように、用いられる金属はダイポールエレメント部とミラー部のみであり、微小であることから、アンテナによる電磁界の乱れを極力少なくすることができる。

4. 実験

4.1. 構成

前章で示した光電界センサを用い、3 アンテナ法による複素アンテナ係数の測定を試みた。

測定構成を図 4に示す。3 アンテナ法に用いたアンテナは、光電界センサの他に、送信及び送受信用に 500MHz 半波長ダイポールを 2 本用いた。アンテナ間距離は 1m とした。測定装置はベクトルネットワークアナライザ Anritsu Willtron 37225A を用い、測定周波数は 40 〜 1040MHz、周波数間隔 5MHz、IF10Hz、送信出力 0dBm で測定を行った。

表 1: 光電界センサの仕様

項目	仕様	参考
センサ形状	$\phi 6 \times 30$mm	ガラス封入
感度	120〜160dBμV/m	BW 1kHz, S/N 6dB 時
周波数帯域	30 〜 1000MHz	±10dB
ダイポール形状	4.1×1mm	

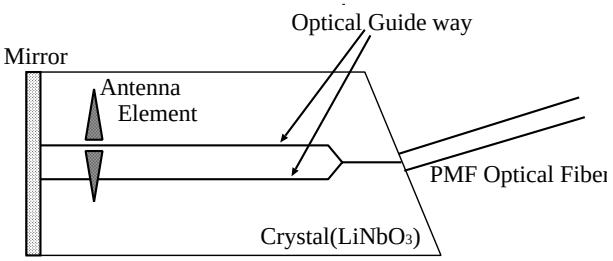

図 3: 光電界センサの構造

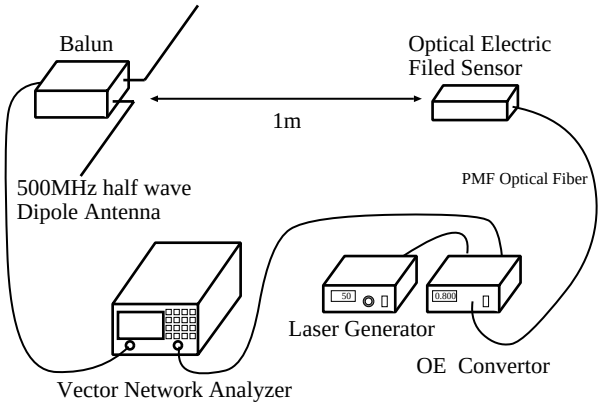

図 4: 3 アンテナ法測定構成

4.2. 3 アンテナ法

今回、複素アンテナ係数を求める方法として 3 アンテナ法を用いた。この手法は、3 つのアンテナを用意し、そのうち 2 つを送受信アンテナとして用い、透過 S パラメータ S_{21} を測定する。これを、3 通りの組合せについておこなう。このとき、距離 R におけるアンテナ $\#i$ からアンテナ $\#j$ への透過 S

パラメータを

$$A_{ij}(R) = [S_{21}]_{\#i \to \#j} \tag{3}$$

とすると、アンテナ 1 における複素アンテナ係数は次のようになる。

$$F_{c1} = \sqrt{\frac{\eta_0 A_{23}(R) e^{-jkR}}{j Z_0 \lambda A_{21}(R) A_{13}(R) R}} \tag{4}$$

ただし、 k は光の速度を c、周波数を f としたときの波数 $k = 2\pi f/c$、 λ は波長、 η_0 は自由空間中の波動インピーダンス、 Z_0 は電源及びアンテナの負荷インピーダンスである。

この手法の利点として、用いる 3 つのアンテナの全てにおいて、複素アンテナ係数が未知なものでも、個々の複素アンテナ係数を測定することができることである。

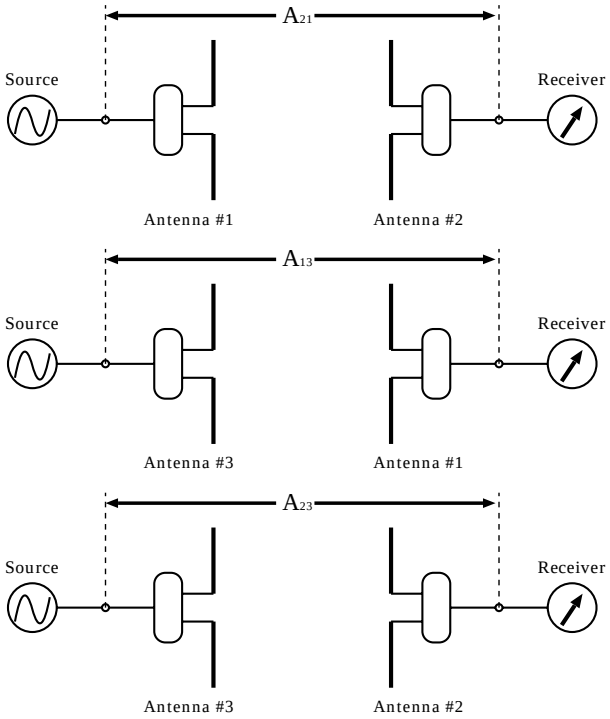

図 5: 3 アンテナ法

4.3. 測定結果

まず、 3 つのアンテナにおける S_{21} の測定結果を図 6,7に示す。

図 6,7において、 antenna1-OE_Sensor 及び antenna2-OE_Sensor が送信に 500MHz 半波長ダイポール、受信に光電界センサを用いたときの S_{21}、Antenna1-Antenna2 が送信・受信ともに 500MHz 半波長ダイポールを用いた時の S_{21} である。

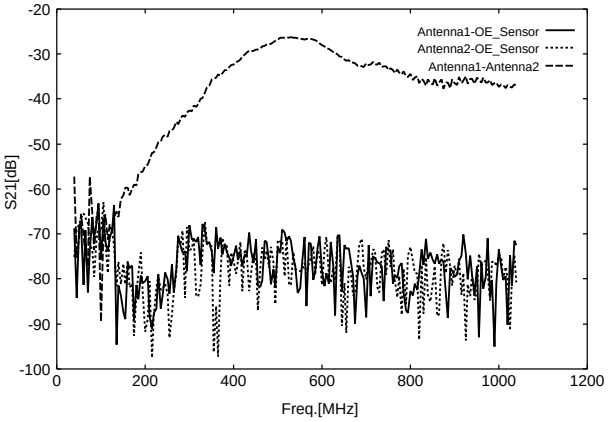

図 6: 測定結果 (S21, 大きさ)

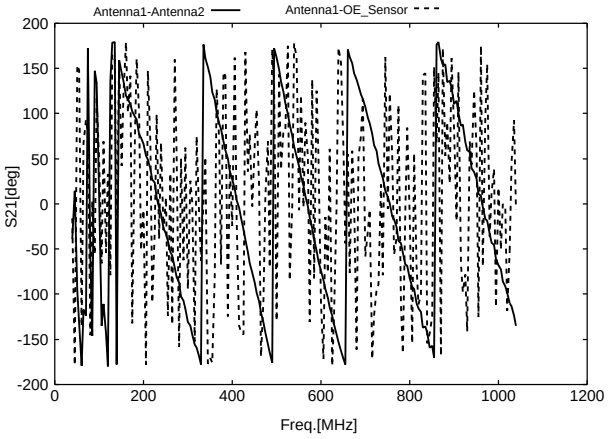

図 7: 測定結果 (S21, 位相)

これらの結果から、送受信共に半波長ダイポールの場合は、 S_{21} が大きいのに対し、受信に光電界センサを用いた場合では、 -70dB 以下とほとんど受信されていないことがわかる。そのため、複素アンテナ係数を決定するために重要である位相も図 7のように測定できていないことがわかる。

5. 問題点と考察

前章で示した通り、光電界センサを受信アンテナとして用いた場合、複素アンテナ係数を決定するために必要な受信感度が得られていないことがわかった。これは、この光電界センサに用いられているダイポールアンテナ部分の長さが約 4mm と微小であるため、受信感度が低下しているためである。

今回の結果から、現状の光電界センサでは複素アンテナ係数の決定は不可能であることがわかった。

また、仮に受信感度が十分であった場合、実際に複素アンテナ係数で必要とされる位相が測定可能であるかが問題となる。

そこで、光電界センサで受信可能な距離までアンテナ間距離を狭め、位相が測定できるかどうかを確認した。アンテナ間距離を 10cm における測定結果を図 8,9に示す。また、図 9の 300 〜 800MHz の部分を拡大したものを図 10に示す。

この結果を見る限り、位相は測定可能であることがわかる。しかし、アンテナ間距離 10cm と近距離であるにもかかわらず、位相変化が速いことがわかる。このように、位相変化が速い場合、測定精度が複素アンテナ係数の精度に大きく影響を与える可能性がある。この原因は、おそらく光電界センサのセンサ部分と光・電圧変換器との間にある光ファイバが長いため、位相変化が速くなったと考えられる。

6. まとめ

今回、光電界センサの複素アンテナ係数の測定を試みた。複素アンテナ係数を決定することができれば、光電界センサを用いた時間領域における電界波形を推定することが可能となる。

500MHz 半波長ダイポールを用いた 3 アンテナ法による測定の結果、アンテナ間距離 1m では光電界センサの感度不足のため、測定が不可能であることがわかった。

一方、測定可能なアンテナ間距離においては、位相の測定が可能であることもわかった。

今後の課題として、光電界センサの感度の向上と、感度向上した光電界センサによる複素アンテナ係数の測定がある。

参考文献

1) S.Ishigami, H.Iida,and T.Iwasaki,“Complex Antenna Factors of Transient Field Sensors”, 1995 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings,pp.252-255,S12-1,1995

2) 中田浩史, 中西学, 浜田リラ, 岩崎俊,“対数周期ダイポールアレーアンテナによる広帯域パルス電磁波の波形再生”, 電気学会計測研究会資料,IM-02-32(2002.6)

3) S.Ishigami, H.Iida, and T.Iwasaki, “Measurements of complex antenna factor by the near-field 3-antenna method”, IEEE Trans. Electromagn.Compat., Vol.38, No.3, pp.424-432, Aug. 1996.

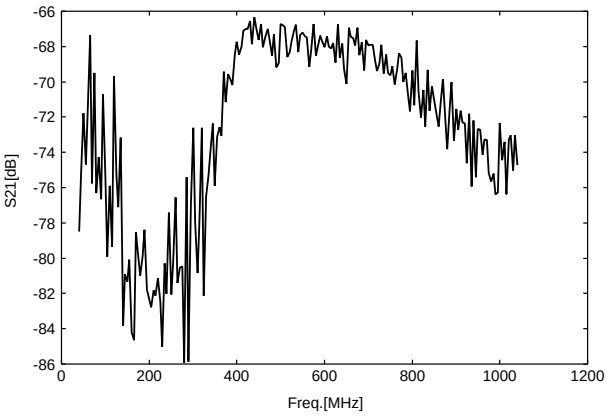

図 8: アンテナ間距離 10cm における 500MHz 半波長ダイポールと光電界センサの S_{21}
(大きさ)

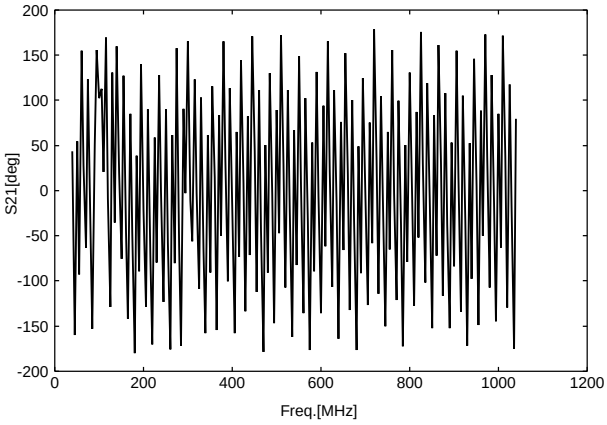

図 9: アンテナ間距離 10cm における 500MHz 半波長ダイポールと光電界センサの S_{21}
(位相)

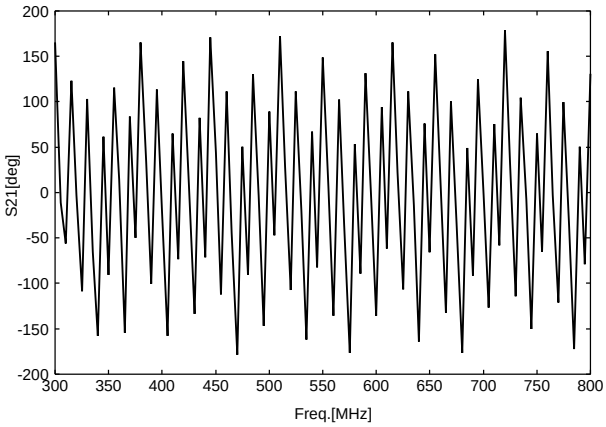

図 10: アンテナ間距離 10cm における 500MHz 半波長ダイポールと光電界センサの S_{21}
(位相,300 〜 800MHz)