

# DSP技術を適用した次世代型センシング技術 の開発に関する研究( )

黒川 悟<sup>\*1</sup>

佐藤 亨<sup>\*2</sup>

西川 憲次<sup>\*3</sup>

田村 禎啓<sup>\*4</sup>

## [要 旨]

各種電気電子機器から放射される不要電波(以下、放射EMI)対策としては、機器を構成するモジュール等の設計、試作段階から対策を実施することが最も有効な方法の一つである。このため我々は、機器を構成するモジュール等の設計、試作段階に、社内の通常の実験室等で実施できる放射EMI測定手法を開発することを目的として、微小ダイポールアンテナを用いた時間領域測定により、機器から放射する不要電波を測定する手法を試みた。

その結果、本手法を用いることにより、企業の通常の実験室等電波環境の劣悪な環境において、比較的容易に放射EMIの原因箇所起因する不要電波を観測しながら対策を実施することができる可能性を示すことができた。

また、測定に用いる電気-光変換器、10GHz程度までのスペクトラムを有する高速パルス発信器、方向性結合型センサの開発も実施したので合わせて報告する。

## 1 緒 言

各種電気電子機器から放射される不要電波については、国際的なEMC規制が実施されている。

このため各企業では、認証機関での不要放射電波測定(以下、放射EMI測定)を実施することが必須であり、製品開発にかかるコスト、期間の増大をまねいており、特に中小企業では大きな問題となっている。

これらの問題を解決する有効な方策としては、機器を構成するモジュール等の設計、試作段階か

ら放射EMI対策を実施することがあげられるが、認証機関での放射EMI測定にかかるコストは高額であること、測定設備の慢性的な混雑でなかなか利用できない等の理由により、多くの企業では、製品化の最終段階で放射EMI測定を実施している。

また、放射EMI測定を最も安価に実施する手法としては、企業内の通常の実験室内でEMI測定を実施することが考えられるが、放送電波、携帯電話電波等の外来電波や、機器が放射する電波の壁面等からの反射波等が存在するため、EMI測定に用いるスペクトラムアナライザ等の周波数領域測定器での測定は非常に困難である。

このため我々は、機器を構成するモジュール等の設計、試作段階に、社内の通常の実験室等で実

---

\* 1 機械電子課 技師

\* 2 京都大学大学院情報学研究科 教授

\* 3 京都セミコンダクター

\* 4 アルモテック

施できる放射EMI測定手法を検討した。

測定アンテナとして、放射EMI測定周波数領域にアンテナの共振周波数を含まない微小ダイポールアンテナを用い、オシロスコープによる時間領域測定により、機器が放射する電波を測定する手法を試みた。本手法は、電波半無響室だけでなく、企業の通常の実験室でも、外来電波や壁面の反射波の影響を低減した放射EMI対策が実施できるため、機器の放射EMI対策用測定に有効である。

まず、パルス状電波を用いて、測定する場の電波伝搬特性を測定する手法を説明し、本手法で求めた放射EMIスペクトルとスペクトラムアナライザを用いて求めたスペクトラムを比較し、本手法の有効性を示す。次に、測定に用いる増幅器、方向性探知センサの概要を示す。

また、本研究で開発した電気 - 光変調デバイスの特性とその簡易評価法としての時間領域測定手法を合わせて報告する。

## 2 . パルス電波を用いた時間領域測定による測定場の伝搬特性測定法

企業の通常の実験室等電波環境の劣悪な場所において、機器が放射する不要電波測定を実施する場合、外来電波、壁や天井からの反射波が存在するため、オープンサイトや電波半無響室での測定結果とは大きな誤差が生じると考えられる。

このため我々は、測定を実施する場の電波の伝搬特性をパルス状電波と微小ダイポールアンテナを用いて測定し、事前に求めておいた自由空間での伝搬波を用いてパルス圧縮処理を行い、不要電波測定に必要な直接波と床面からの反射波の合成波のみを窓関数を用いて分離し、そのスペクトルを求めることにより、オープンサイトや電波半無響室での測定結果に近い測定結果を得る方法を検討した。

なお、測定周波数帯域は300MHz ~ 1000MHzとしている。

### 2 . 1 測定に用いる微小ダイポールアンテナの概要

測定には、300MHz ~ 1000MHz帯域での測定に用いるアンテナとして、その周波数帯域に共振周波数を含まないエレメント長40mm + 40mmのダイポールアンテナを用いる。

試作したダイポールアンテナの $S_{11}$ 特性は、100MHz ~ 1000MHzで - 2 dB程度、共振周波数1679MHzでは - 17.8dBである ( 図 1 )。

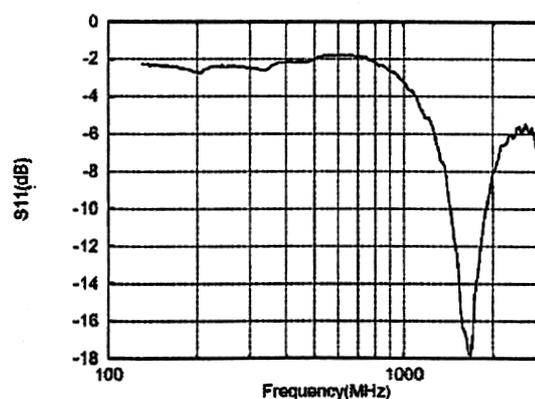


図 1 試作したダイポールアンテナの $S_{11}$ 特性

### 2 . 2 外来電波の除去手法

通常の室内で測定を実施する場合、放送波、携帯電話電波等様々な外来電波が観測される。

EMI測定では、EUTから放射される電波のみを測定するため、これら不要な外来電波を除去しなければ、通常の室内でのEMI測定は困難である。

しかし、EUTから放射される電波は、その放射源がEUTであるために、外来電波とは無相関である。このため、オシロスコープによる時間領域測定を、EUTから放射される電波に同期を取り、加算平均することにより、容易に不要な外来電波を大幅に削減可能である。

受信アンテナで測定したEUTからの放射電波の時間信号を $E_t$ 、不要な外来ノイズ信号を $E_n$ とすると、オシロスコープの平均化機能を用いて $m$ 回の平均化を行うと、 $E_t$ は $m$ 倍、 $E_n$ は $1/m$ 倍となるため、 $E_t$ と $E_n$ の比は $(1/m)^2$ となる。例えば100回

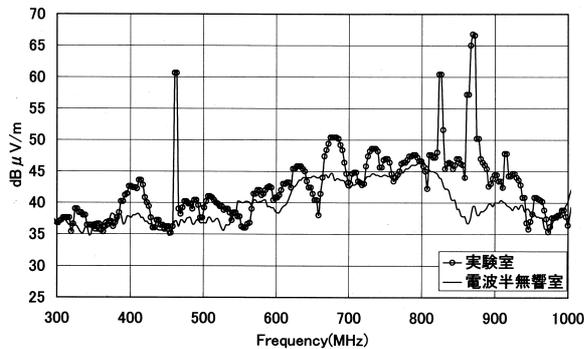


図2 スペクトラムアナライザでの測定結果

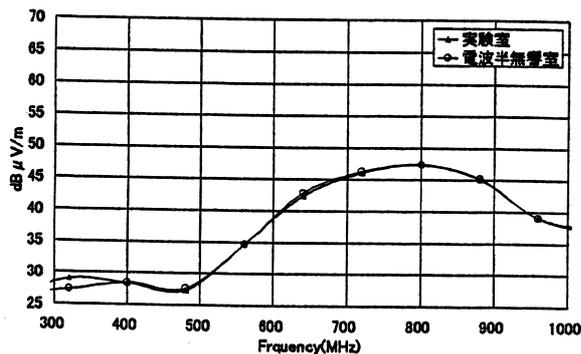


図3 オシロスコープ測定結果から得たスペクトラム

の平均化を行うと、不要な外来電波はEUTからの放射電波に比べて80dB低い値となる。

参考のため、スペクトラムアナライザによる実験室、電波半無響室での測定結果を図2に示し、オシロスコープの平均化機能により測定し、次節以降で述べる短時間フーリエ変換処理により求めた周波数スペクトラムを図3に示す。オシロスコープの平均化機能による測定結果から求めた周波数スペクトラムは、外来の電波を除去した測定結果となっていることがわかる。

### 2.3 パルス電波を用いた時間領域測定による測定場の伝搬特性測定

企業の通常の実験室等で対策用の測定を実施する場合、利便性を考えると、測定用アンテナの高さは固定して測定することが好ましい。また、部屋の大きさも限られることから被測定対象機器からの水平距離もより短いことが望まれる。

このため我々は、試作したダイポールアンテナを測定用アンテナとして使い、床面からの高さ1m、被測定対象機器からの水平距離を1m、3mの場合について測定を実施する場所での伝搬特性の測定を試みた。測定は、

電波暗室

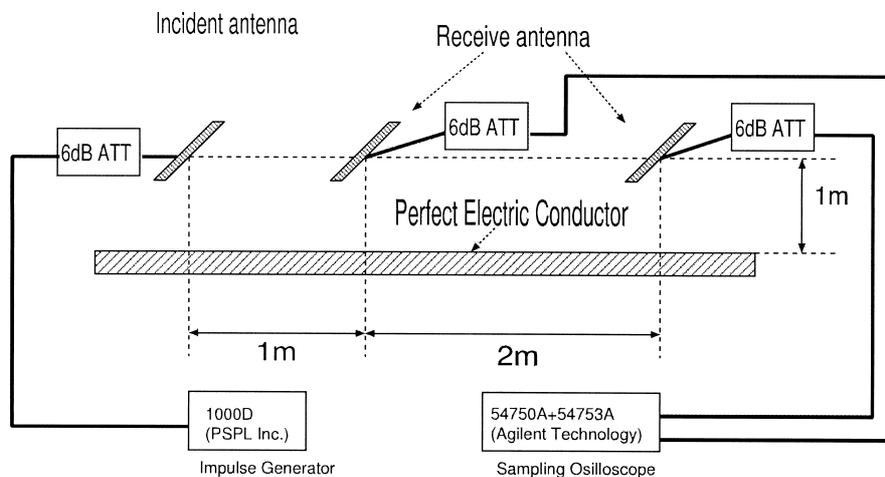


図4 実験構成図

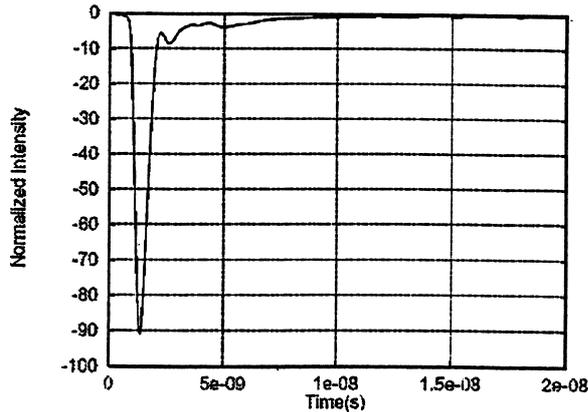


図5 アンテナへの入力波形

### 電波半無響室

床面を完全反射板とした実験室（以下実験室）で実施した。

送信は、米国Picosecond Pulse Labs社1000Dインパルス発信器の出力を試作アンテナに入力する方法とし、観測にはAgilent Technology社等価サンプリングオシロスコープ54750A + 54754Aを用い、サンプリング間隔24.4psで平均化回数500回として測定を実施した。実験構成図を図4に、アンテナへの入力波形を図5に示す。

なお、入力波のレベルは、後で示す1mの位置に配置したダイポールアンテナでの観測値の最大値で規格化した値である。

また、電波暗室での測定は、自由空間での測定結果と同様の結果を得るため、天井高さ4.5mの暗室において、送信、受信アンテナ共に床面から2mの高さに配置して測定を行った。

### 2.3.1 送信アンテナから水平距離1mでの測定結果

電波暗室での測定結果（図6）は、純粋な直接波であるため、その他の場での測定結果（図7、8）に表われている直接波の到来から4ns後に到来する2波目が床面からの反射波であることが容

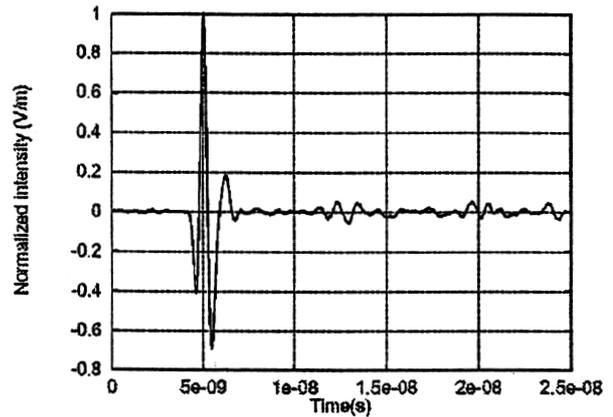


図6 電波暗室での受信波形（1m）

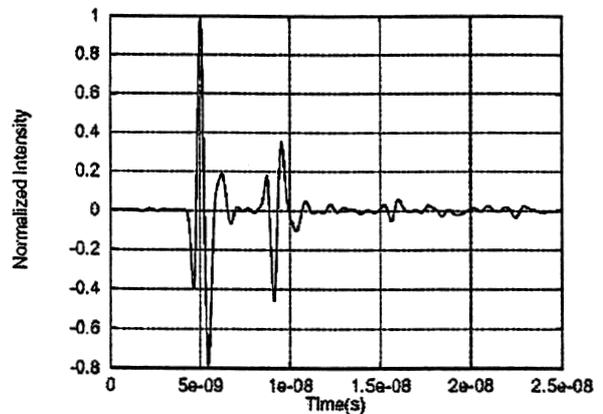


図7 電波半無響室での受信波形（1m）

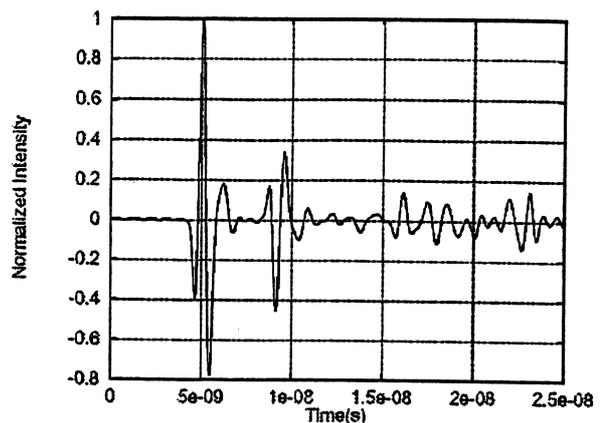


図8 実験室での受信波形（1m）

易に推定できる。

実験室での測定結果（図8）では、床面からの反射波の到来後、天井や壁面からの反射波が到来

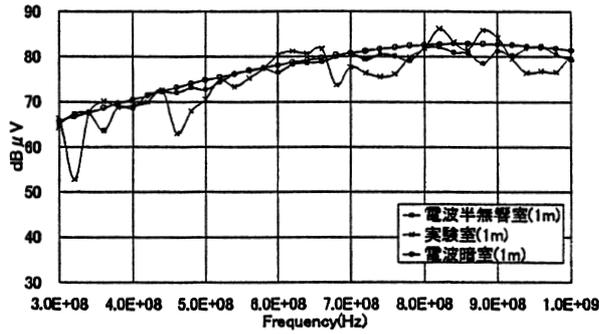


図9 受信波形のスペクトラム(1m)

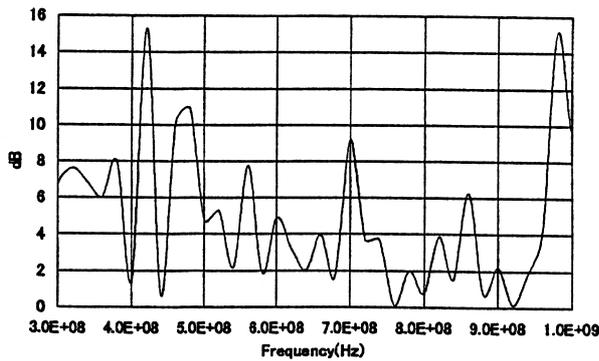


図10 実験室測定結果と電波半無響室測定結果の誤差の絶対値(1m)

していることがわかる。

各測定結果のスペクトラムを比較すると、実験室での測定結果は、電波暗室での測定結果とは、15dB以上の誤差を生じる周波数が存在する結果となっている。

実験室で測定を実施する場合、受信レベルは小さいものの、天井や壁面からの反射波が到来することによりスペクトラムは大きな誤差を生じてしまうが、時間領域測定結果を比較すれば、15ns後程度までの結果は、ほぼ同一の結果となっている。このことは、被測定機器から1m程度の距離の場合、適当な時間幅の窓を用いて波形切り出しを行い比較することにより、実験室においても、電波半無響室と同様の評価が実施できる可能性のあることを示している。

なお、フーリエ変換の時間フレーム長は100ns

(周波数分解能 1 MHz)としている。

### 2.3.2 送信アンテナから水平距離3mでの測定結果

電波暗室での測定結果(図10)での1波目は、純粋な直接波である。その他の場での測定結果では直接波と床面からの反射波である2波目とが重なり合って測定される。

また、実験室での測定結果(図12)では、直接波の到来から7ns以降に、天井や壁面からの反射波が到来している。

測定結果から、試作したダイポールアンテナを用いた測定でも、送信アンテナから3mの位置に配置した場合、直接波と反射波とを分離した測定

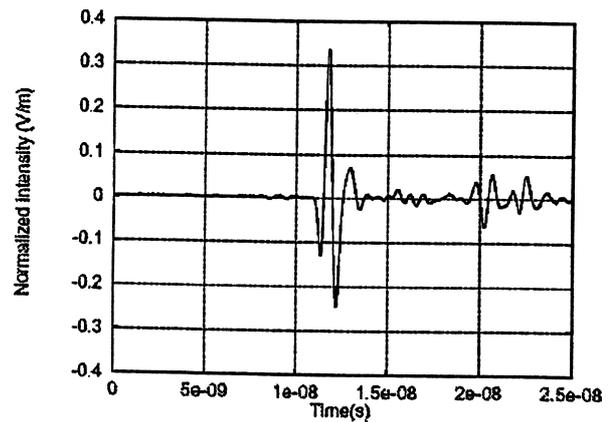


図11 電波暗室での受信波形(3m)

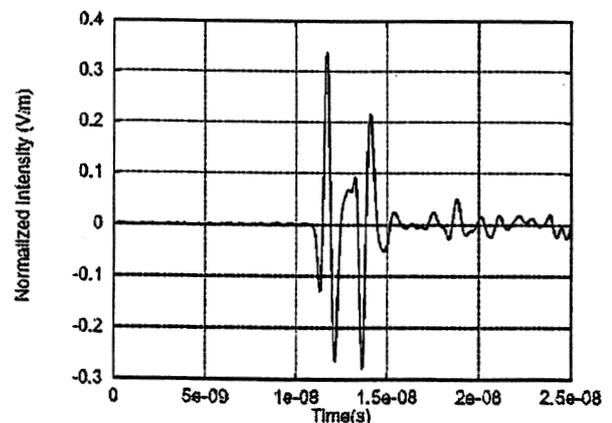


図12 電波半無響室での受信波形(3m)

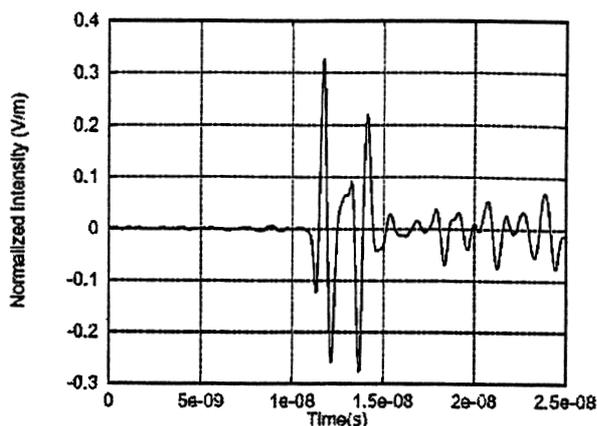


図13 実験室での受信波形 (3 m)

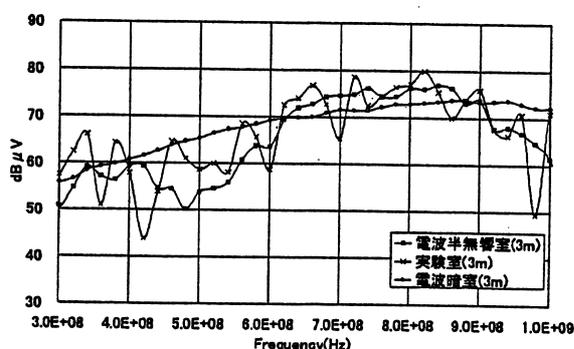


図14 受信波形にスペクトラム (3 m)

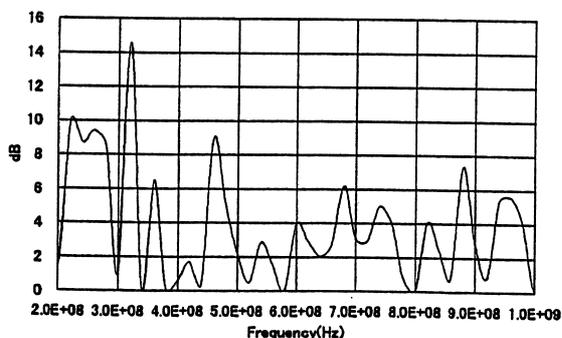


図15 実験室測定結果と電波半無響室  
測定結果の誤差の絶対値 (3 m)

は非常に困難であることがわかる。

通常EMI測定では、電波半無響室での測定結果 (図11) を測定値としているが、図13に示す測定結果のフーリエ変換結果では、電波半無響室での結果と実験室での結果には、ある周波数では

15dB程度の差があることがわかる。このことは、実験室での測定結果をそのままEMI測定結果として採用すると、非常に大きな測定誤差が生じることを示している。

実験室で測定を実施する場合、天井や壁面からの反射波が到来することによりスペクトラムは大きな誤差を生じてしまうが、時間領域測定結果を比較すれば、17ns後程度までの結果は、ほぼ同一の結果となっている。このことは、被測定機器から3 m程度の距離の場合でも、1 mの場合同様に適当な時間幅の窓を用いて波形切り出しを行い比較することにより、実験室においても電波半無響室と同様の評価が実施できる可能性のあることを示している。

なお、フーリエ変換の時間フレーム長は100ns (周波数分解能 1 MHz) としている。

### 2.3.3 短時間フーリエ変換によるスペクトル推定

前節で得られたオシロスコープでの測定結果は、波源の観測信号に時間同期を掛けて測定することにより、外来信号を除去することができたが、同一の波源から放射された不要電波の天井や壁面からの反射信号はそのままでは除去することが困難であり、実験室での測定結果と電波半無響室での測定結果には最大で十数dBの誤差が生じることとなる。

そこで我々は、電波暗室での受信波形を用いてウィナーフィルターを構成し、実験室での受信波形のパルス圧縮を行い、機器が放射する電波の到来波遅延プロファイルを求め、EMI測定に不必要となる天井や壁面からの反射信号を判別し、除去することを試みる。ウィナーフィルターを用いたパルス圧縮後の波形を図16に示す。

パルス圧縮結果は、機器が放射する電波の直接

波とその床面からの反射波が明確に判別できる。床面からの反射波は直接波の到来から約 2 ns後に、約 6 ns以降に天井や壁面からの反射波が到来していることが明確に判別できる。

このため、EMI測定に必要な直接波と床面からの反射波のみを適当な窓関数により切り出し、逆圧縮することにより、測定不要な天井、壁面から

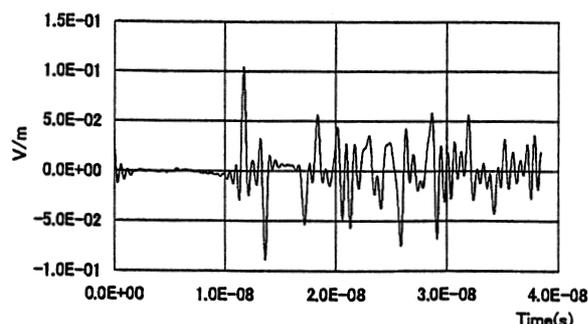


図16 実験室測定結果のパルス圧縮波形

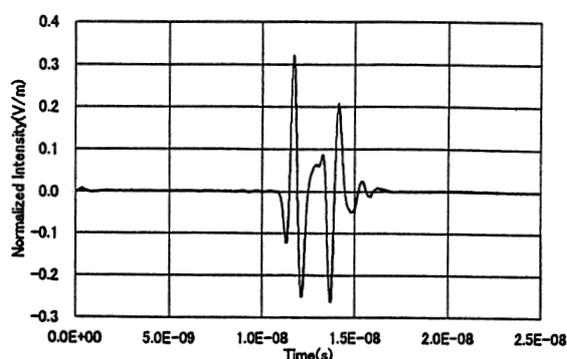


図17 理想的なオープンサイトでの測定結果の推定波形

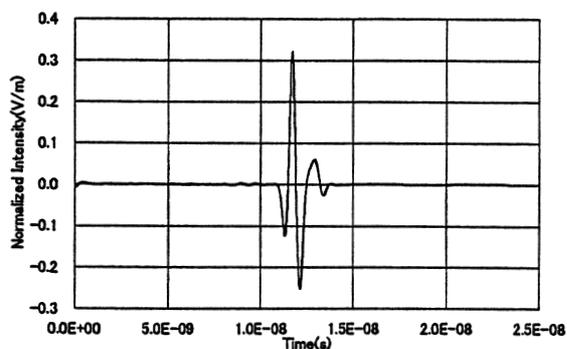


図18 自由空間での測定結果の推定波形

の反射波を除去する方法とした。なお窓関数は、矩形窓の最初と最後10%をハニングウインドウとしたものを用いている。

図17に本手法により推定した直接波と床面からの反射波のみの合成波形（理想的なオープンサイトでの測定結果の推定波形）、図18に直接波のみの推定波形（自由空間での測定結果の推定波形）を示す。

本手法では、機器が放射する電波のEMI測定に必要な波だけを観測することが可能であるため、企業の通常の実験室でも、電波半無響室やオープンサイトでの測定結果と相関のある結果を得ることが可能である。

しかし本手法では、事前に何らかの方法で自由空間伝播波形をある程度予測することが必要であり、機器から 1 m程度の近傍での測定結果から予測する手法をこれまでに提案している<sup>1)</sup>が、今後の課題である。

また、企業内の実験室で測定を実施する場合、受信アンテナを固定して測定を実施することが可能であれば、利便性が飛躍的に向上すると考えられる。これは、受信信号から、直接波のみを推定することができれば、機器が放射する電波の放射パターンを考慮しなければ、ある程度可能となる。

本提案手法では、直接波のみを明確に推定可能なため、アンテナを固定した測定の可能性を示すことができたと考えられる。

### 3 受信信号用増幅器の開発

試作アンテナで受信する電波を時間領域測定器で十分なレベルで測定するために用いる増幅器を試作した。試作した増幅器の増幅特性 ( $S_{21}$ ) の周波数特性測定結果を図19に示す。

試作増幅器は、2 GHz程度まで20dB以上の増

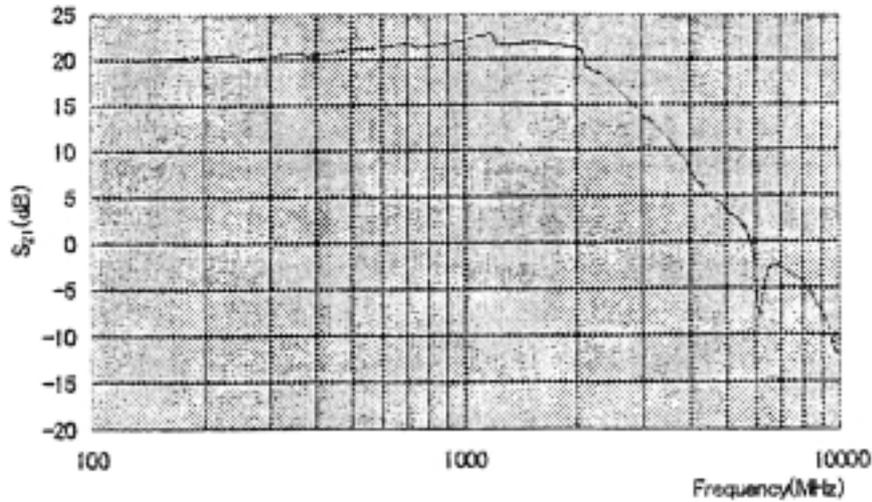


図19 試作した電波増幅器の周波数特性

幅度を有することが確認できた。本増幅器を2段階用いることにより40dB程度の増幅器を実現可能である。

なお、増幅器にはStanford Microdevices社製MMICを用いている。

#### 4 高速パルス発生器の開発

EMI測定に用いるセンサなどの特性を測定するために用いる高速パルス発生器を開発した。

本発生器は、正弦波発生器、RFアンプ、ステップリカバリダイオードで構成され、出力パルス半値幅100ps、出力電圧10V程度を実現してる。試作発生器の出力波形を図20に、周波数スペクトラムを図21に示す。

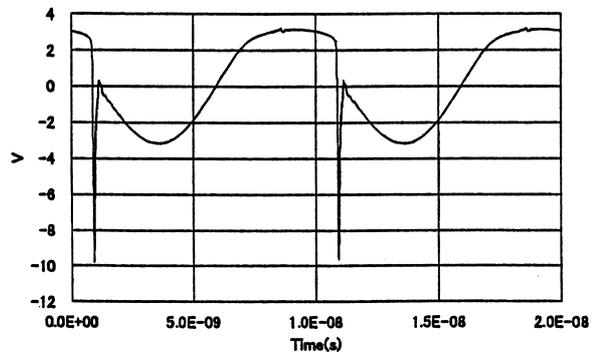


図20 高速パルス発生器の出力波形

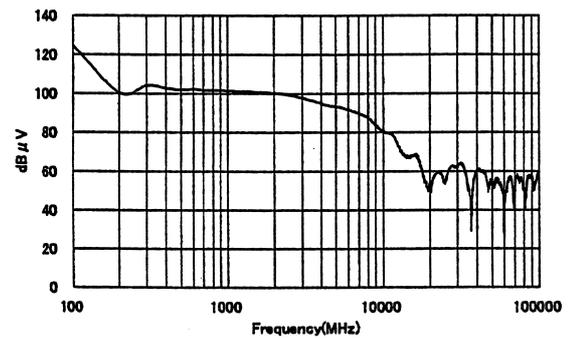


図21 高速パルス発生器の出力波形の周波数スペクトラム

#### 5 アンテナでの受信電波を光に変換するセンサの開発

##### 5.1 電気 - 光強度変調器の開発

アンテナで受信した電波をレーザー光の強度変調に変換し、機器が放射する不要電波を測定するための電気 - 光強度変調器、光 - 電気変換器の基本試作を行った。合わせて、本センサに用いるレーザー光源として、光波長1310nmのレーザー光源の試

作も実施した。

試作した電気 - 光強度変調器のAgilent Technology社光コンポーネントアナライザにより測定した周波数感度特性を図22に、前節で試作

した高速パルス発生器を用いて測定した時間応答波形を図23に、その結果からフーリエ変換により算出した周波数感度特性を図24に示す。

測定結果は、試作した電気 - 光強度変調器が、10GHz程度までの周波数について利用できること

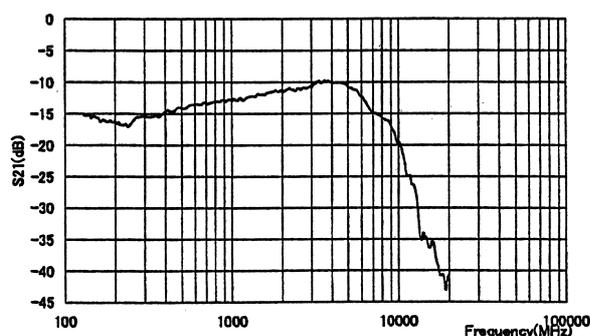


図22 光コンポーネントアナライザでの周波数感度特性測定結果

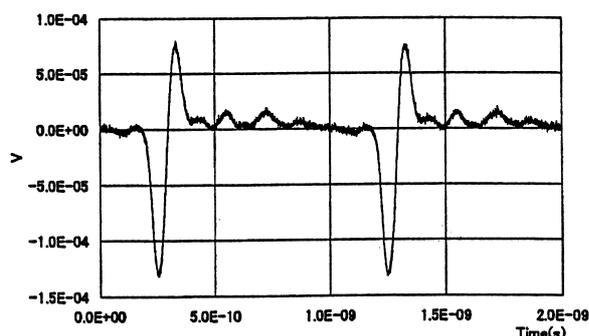


図23 等価サンプリングオシロスコープでの測定結果

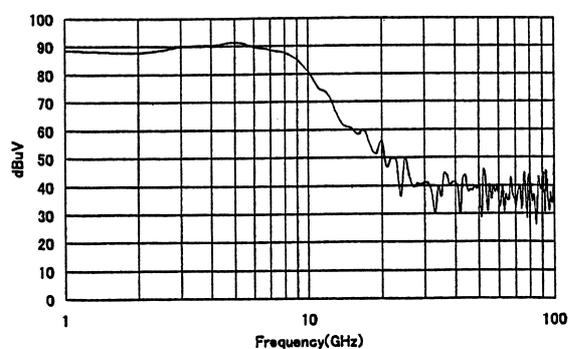


図24 等価サンプリングオシロスコープでの測定結果の周波数スペクトラム

示している。

開発した電気 - 光強度変調器は、同軸コネクタを有する構造としているため、既存のEMI測定アンテナや微小ループアンテナ等を接続して利用することができるため、同軸ケーブルを必要とせずに電磁界強度測定が可能である。

## 5.2 光 - 電気変換器の開発

開発した電気 - 光変換器により強度変調されたレーザー光を電気信号に変換するセンサを試作した。試作は、光ファイバを接続するコネクタに集光用レンズを有する構造の受光径45  $\mu\text{m}$ と80  $\mu\text{m}$ のPINフォトダイオードを用いて行った。

なお、受光径80  $\mu\text{m}$ のPINフォトダイオードを用いた電気 - 光変換器には、前節までに説明した、増幅器を内蔵している。試作結果では、80  $\mu\text{m}$ のPINフォトダイオードを用いた電気 - 光変換器がEMI測定に最も周波数特性の優れた物であることが解った。45  $\mu\text{m}$ のPINフォトダイオードについては、1 GHz ~ 5 GHz程度まで利用できることを示す測定結果となっていることから、国際規格化の動向が進む1 GHz以上のEMI測定に利用することができるものと期待できる。

## 6 電波伝搬方向探知センサの開発

不要電波放射の原因となっている個所を特定することのできる、電磁界の伝播方向や線路での共振状態を測定可能なセンサとして、マイクロストリップ線路を用いた方向性結合器型のセンサを試作した。

試作センサは、そのマイクロストリップ線路上の実効線路長が測定周波数の波長の1/4程度以下において、伝播方向を10dB程度の差で測定することが可能である。

また、試作センサは、入射波、反射波のレベル

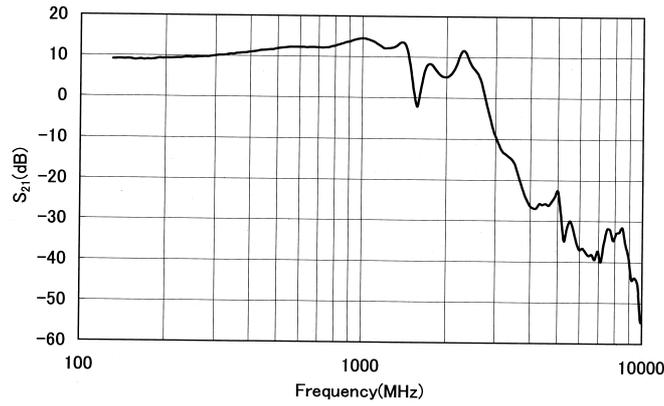


図25 増幅器を内蔵した80 μmPIN Photo Diodeを用いた光 - 電気変換器の周波数特性測定結果

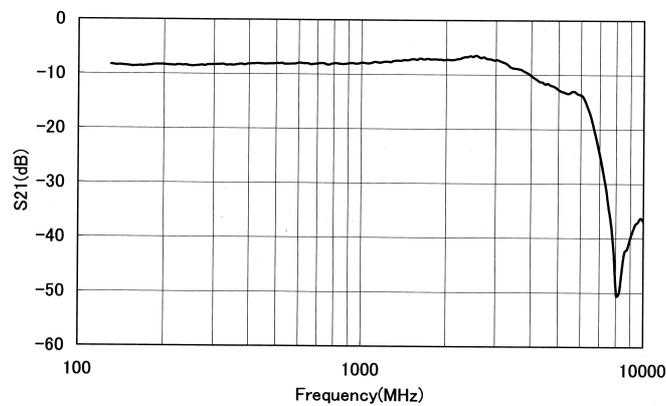


図26 受光径45 μmPIN Photo Diodeを用いた光 - 電気変換器の周波数特性測定結果

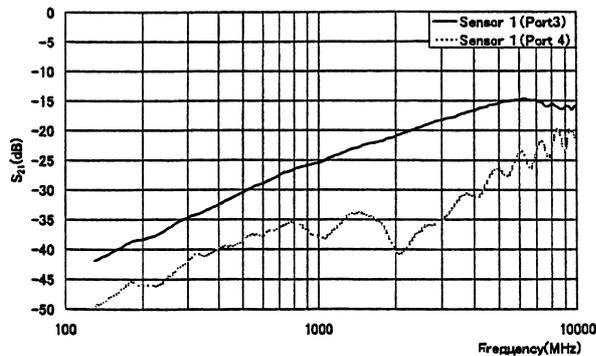


図27 センサ1の結合度測定結果

を位相も合わせて測定できるため、これらを同時に測定することにより、伝送線路の終端条件を測定することも可能であり、放射EMIの最も大きな原因の一つである線路上での共振状態を即座に特定可能である。

試作センサの周波数特性を図27に示す。

## 7 結 言

当該研究では、オープンサイトや電波半無響室で実施しているEMC測定を企業内の実験室等のコンクリートで囲まれた室内でも実施することのできる手法として、時間領域測定を用いて実施する手法を提案した。

本提案手法では、外来電波だけでなく、天井や壁面からの反射波の影響も最小限にして機器が放射する電波の測定を実施できる可能性を示すことができた。

また、測定に用いる次世代型の電磁界センサとして、アンテナで受信した電磁波を光の強度変調に変換し、測定器まで伝送するセンサ関連機器の開発とその評価を実施し、現在のEMC規格で義務づけられている測定周波数範囲での利用、並び

に、現在規格化が進められている1GHz以上のEMC測定にも利用できると思われる物を開発することができた。

本研究成果の今後速やかな普及を実施し、企業の製品開発に有効に利用できる物として企業化していくこととしたい。

## 8 謝 辞

本研究において、貴重な御意見を頂いた電子技術総合研究所 小見山耕司氏、岡山大学工学部和田修己助教授、中小企業庁地域活性化連携事業費補助金共同研究者である、福島県ハイテクプラザ、茨城県工業技術センター、東京都立産業技術研究所、長野県情報技術試験所、岡山県工業技術センター担当者の皆様に感謝いたします。

なお本研究は、中小企業庁地域ものづくり対策事業費中小企業地域開発産学官連携促進事業費により実施しています。

## (参考文献)

- 1) 黒川悟、佐藤亨、“FDTD法と室内空間時間領域測定を用いた自由空間放射測定推定の試み、”電子情報通信学会技術研究報告、EMCJ2000-24、(2000-6)
- 2) 黒川悟、佐藤亨、“微小ダイポールアンテナを用いた室内空間伝搬推定実験、”電気学会研究会資料電磁理論研究会、EMT-00-74、(2000-10)
- 3) 黒川悟、佐藤亨、“実験室内近接場測定に基づく自由空間放射推定、”電子情報通信学会論文誌(B)投稿中
- 4) 黒川悟、佐藤亨、“マイクロストリップ線路型ノイズ源探知センサの開発、”電気学会研究会資料電磁理論研究会、EMT-01-59、(2001-6)

- 5) 西川憲次、黒川悟、安達雅浩、井尻和夫、“周期構造ダイポール型変調電極を有する光導波路型変調器の開発、”電気学会研究会資料電磁理論研究会、EMT-00-71(2000-10)