

光応用電磁界計測技術を用いた東北・北関東復興支援事業

黒川 悟 飴谷 充隆 廣瀬 雅信

産業技術総合研究所 計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

E-mail: { satoru-kurokawa, m.ameya, masa-hirose }@aist.go.jp

あらまし 東北・北関東地域は、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、企業などに EMC (Electromagnetic Compatibility) に関する測定サービスを提供する当該地域の公設試験研究機関も、建物の破損、測定サービスの中断など企業支援を一時中断することを余儀なくされました。このため我々は、当該地域の公設試験研究機関の EMC 測定結果の再検証などを共同研究として実施する事業を 2011年9月から開始しました。本報告では、我々が実施する光応用電磁界計測技術を用いた EMC 測定用電波暗室の特性評価法、EMI(Electromagnetic Interference)測定結果の検証法を述べる。

キーワード 東北地方太平洋沖地震、復興支援、フォトダイオード、無バイアス、EA 変調器、光デバイス、ネットワークアナライザ、スペクトラムアナライザ、マイクロ波フォトニクス

Reconstruction Assistance Project for Tohoku and North Kanto Area using Photonics-Applied Electromagnetic Measurement Technology.

Satoru KUROKAWA Michitaka AMEYA and Masanobu HIROSE

National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

E-mail: {satoru-kurokawa, m.ameya, masa-hirose}@aist.go.jp

Abstract Tohoku and Kanto area had damaged by Tohoku - Pacific Ocean Earthquake on 11 March 2011. Local government research institutes in this area that provide EMC measurement suspended the EMC measurement services because some EMC measurement facilities damaged by the earthquake. Therefore, we have started a joint research project that carry out some measurements to evaluate the performance of EMC anechoic chamber and EMI measurement results of local government research institutes from September 2011. In this paper, we describe our reconstruction assistance project for the EMC measurement using the photonics-applied electromagnetic measurement technology.

Keyword Tohoku - Pacific Ocean Earthquake, Reconstruction assistance project, Photo diode, Zero biased optical device, Electro-absorption modulator, Optical device, Vector network analyzer, Spectrum analyzer, Microwave photonics

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東北・北関東地域は非常に大きな被害を受けた。企業などに EMC 測定サービスを提供する東北・北関東地域の公設試験研究機関（以下、公設研）も被害を受け、各種測定サービスを中止せざるを得ない状況になった。茨城県、栃木県、産業技術総合研究所(以下、産総研)を除く、東北・北関東地域の公設研の電波暗室に大きな被害はなかったが、測定結果の再検証が必要となった。このため産総研では、東北・北関東地域の公設研の EMC 測定結果の再検証などを共同研究として実施する事業を 2011年9月から開始した。当復興支援事業では、産総研が供給をおこなっている日本の標準アンテナにトレーサビリティが確立されたアンテナを用いた測定を行い、さらに、基準となる産総研の電波暗室で測定結果と比較することにより、放射 EMI 測定結果の同等性を確立することを目的とした。各公設研を利用する東北・北関東の各企業の製品の

測定結果は、試験所認定機関から認定を受けた試験所での測定結果との同等性が確立されたこととなり、非常に低コストに製品開発を実施できることとなる。

当研究室では、日本国の基準となる標準アンテナの開発だけでなく、その精密測定を可能とする光デバイスを用いたアンテナ測定技術も開発している。これまでに、光ファイバで接続された広帯域アンテナ、光デバイスを用いた EMI 測定装置を開発した。さらに、経済産業省地域イノベーション創出共同体形成事業では、関東甲信越圏の 12 公設研との共同研究により、これらの技術を用いた放射 EMI 測定結果の同等性検証手法の開発や精密測定を実現するマニュアル整備を行い、公設研を通じた利用企業の支援を実施してきたところである。現在は、中国地方や九州地方の公設研との共同研究も実施しているところである。

国際的な放射 EMI 規制[1]は、主に米国以外の規制では、30 MHz~6 GHz まで、米国の規制は 30 MHz~18 GHz となっている。日本企業では、米国向けの輸出機器も多いことから、

東北・北関東復興支援事業では、米国規制にも対応可能な放射 EMI 測定結果の同等性検証手法の開発を実施し、東北・北関東に立地する企業を公設研を通じて支援することを目的としている。

1 GHz～18 GHz の放射 EMI 測定では、測定周波数が高くなればなるほど、測定に用いる同軸ケーブルでの減衰が大きく、測定器を電波暗室内に設置するなどの工夫が必要となる。このため、公設研などの放射 EMI 測定機関では、1 GHz 以下の測定時と違った対応が必要となっている。そこで東北・北関東復興支援事業では、光ファイバでリンクしたアンテナを用いて測定を実施することにより、1 GHz 以下での測定と同様に、測定器を電波暗室の外に設置した測定を可能とする技術を開発した。さらに、1 GHz～18 GHz の放射 EMI 測定用電波暗室での測定結果の基準となる産総研電波暗室での測定結果との同等性を確立するための比較測定方法も提案し、光ファイバでリンクしたアンテナを擬似的な放射源として用いることにより、各企業の機器を模擬した比較測定を可能とすることを目的とした。

本報告では、まず、平成 20 年度～22 年度に実施した経済産業省地域イノベーション創出共同体形成事業、平成 23 年度から実施している東北・北関東復興支援事業で実施する、放射 EMI 測定に関する比較試験等の概要を述べる。次に、比較試験で用いる光デバイスを用いた広帯域アンテナシステムの概要を述べる。

2. 事業の概要

放射 EMI に関する国際的な規制が実施されており、日本国内企業についても、自社製品の規制対応が必須となっている。日本国内では EMI の規制に関する JIS 規格 (Japanese Industrial Standards) [2] が整備されている。規格適合試験については、公益財団法人日本適合性認定協会 (JAB: Japan Accreditation Board) [3]、株式会社電磁環境試験所認定センター (VLAC: Voluntary EMC Laboratory Accreditation Center) [4] 等の認定する試験所 (以下、認定試験所) での測定が必要となっている。しかし各企業では、製品開発時の EMI 測定は、各都道府県政令市等の公設研が有する EMI 測定設備を利用した測定を行い、製品レベルでの認定取得のための測定を認定試験所で実施することが多くなっている。各公設研では、製品開発時の EMI 測定を目的としているため、必ずしも試験所としての認定は必要といえず、公設研での測定結果と認定試験所での測定結果との同等性確立が課題となっている。

このため当該事業では、測定には、国家標準にトレーサビリティの確立された測定装置等を用い、産総研が有する測定設備を基準の測定場として測定を実施し、各公設研が所有する放射 EMI 測定用電波暗室での測定結果と比較を行うことにより、測定結果の同等性を確立することとした。図 1 に該事業で実施する公設研、企業支援の考え方を示す。

測定は、共通の測定プロトコルを作成し、各公設研で同一プロトコルによる測定を実施した。実施した測定は以下のとおり。

- (1) コムジェネレータ+小型バイコニカルアンテナを擬似被試験器とした放射 EMI 測定
測定周波数範囲:30 MHz～1 GHz
- (2) 光デバイスでリンクした広帯域アンテナを擬似被試験器とした放射 EMI 測定
測定周波数範囲:30 MHz～1 GHz
- (3) 送受信アンテナに広帯域アンテナを用いたサイトアッテネーション測定
測定周波数範囲:30 MHz～1 GHz

- (4) 全自動 Site VSWR 測定
測定周波数範囲:1 GHz～6 GHz(FCC 対応 18GHz)
- (5) 光デバイスでリンクした広帯域アンテナを擬似被試験器とした放射 EMI 測定
測定周波数範囲:1GHz～6GHz(FCC 対応 18GHz)

(2)～(5)の測定は、ベクトルネットワークアナライザを用いたベクトル量での測定を行っているため、周波数領域での測定結果のみの比較だけでなく、時間領域での測定結果比較が実施できるため、電波暗室壁面や天井等からの反射波をその到来時間によって比較することが可能であり、測定結果の差の原因を比較検討することが可能である。なお、各測定の手順の詳細については、Web[5]で公開しているため、参照されたい。

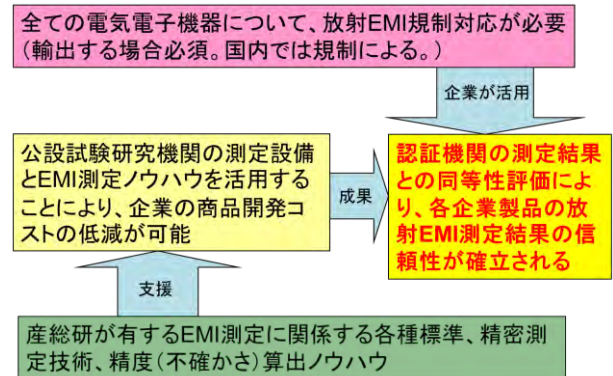


図 1 当該事業で実施する公設研、企業支援の考え方

3. 構築システムの概要

放射 EMI 測定では、被試験機 (以下 EUT: Equipment under test) として、各種電気電子機器から放射する電波を測定する。EUT は、一般的に送信用の同軸ケーブルは有していないため、試験所認定用比較試験 (試験所認定用比較試験は技能試験と呼ぶ) では電源ケーブルや同軸ケーブルを有さない擬似 EUT として、コムジェネレータと小型バイコニカルアンテナを組み合わせた送信システム [7] を用いることが多い ((1) の測定)。放射 EMI 測定は、電界強度測定器として、EMI レシーバ又はスペクトラムアナライザを用いるが、これらはスカラー量での測定となることから、周波数領域の測定結果しか得られないため、各機関での測定結果の差の原因を特定することは困難である。このため我々は、ベクトル量での測定を可能とするため、測定器としてベクトルネットワークアナライザ (以下 VNA) を用いることとした。VNA は、送信器と受信機を内蔵しているため、擬似 EUT として送信アンテナを用いる場合には VNA とアンテナを同軸ケーブルで接続して測定を実施することが必要となる。この場合、同軸ケーブルがあることから、コムジェネレータと小型バイコニカルアンテナを模擬した測定は困難である [8]。このことから、同軸ケーブルを用いずに、送信アンテナと測定器を光ファイバでリンクして、擬似 EUT として用いることの可能なシステムを開発した。前節で示した (2)、(5) の測定は、送信システムとして光ファイバでリンクした送信アンテナを用いた測定である。

3.1 光ファイバでリンクした光デバイスを用いた送信システム [9]

送信システムの概要を説明する。VNA の出力信号を直接変調レーザダイオードに入力して光強度変調信号を生成し、光ファイバを用いて伝送し送信アンテナまで伝送する。伝送した光変調信号をフォトダイオード (以下 PD) を用いて電気信号に変換する。用いた PD は、バイアス電圧約 0.5 V で動作する

ため、バイアス生成用 PD を同一パッケージに内蔵し、その出力直流電圧を送信用 PD のバイアス電圧として用いることにより外部電源を不要としている。PD は、アンテナエレメント内部の給電部に直接接続する構造としているため、アンテナを理想的な状態で用いることが可能である。さらに、アンテナへの入力信号レベルを増幅するため、PD の出力側に増幅器をアンテナとの間に挿入し、レーザ光で生成した直流バイアス電圧[10]で駆動するシステムとした。送信システムは、金属ケーブルを全く用いずに VNA とアンテナとを接続して利用することが可能であるため、理想的な送信アンテナを疑似 EUT として用いた測定が可能である。図 2 に開発した光ファイバでリンクした光デバイスを用いた送信システム概念図と用いたデバイスの写真を示し、図 3 に PD と増幅器を用いた送信光システムの周波数特性を示す。図中[PD] は PD のみを用いた送信光システムの周波数特性、[Amplifier]は増幅器のみの周波数特性、[PD+Amplifier]は PD と増幅器を用いた送信光システムの周波数特性を示している。測定結果は、6 GHz 以下の測定周波数範囲において、VNA の出力レベル=10 dBm とした場合、PD のみのシステムではアンテナへの入力マイクロ波レベルは測定周波数範囲で-16 dBm 程度、PD と増幅器を用いたシステムでは 8dBm 程度とすることが可能であることを示している。構築システムは、低伝送損失である光ファイバを介して PD と VNA とを接続するため、光ファイバケーブル長を変更しても、図 5 に示す特性とほぼ同じ周波数特性で利用することが可能であることから、測定ダイナミックレンジを劣化させることなく VNA などの測定器を電波暗室外に設置した測定が可能である。図 4 に PD と増幅器を用いた送信光システムの時間安定性測定結果を示す。電源投入後 150 分までは、10 MHz~10 GHz の周波数範囲において 0.04dB 以下の変動であることがわかる。なお測定はアジレントテクノロジー社製 VNA である ENA5071C を用いた。

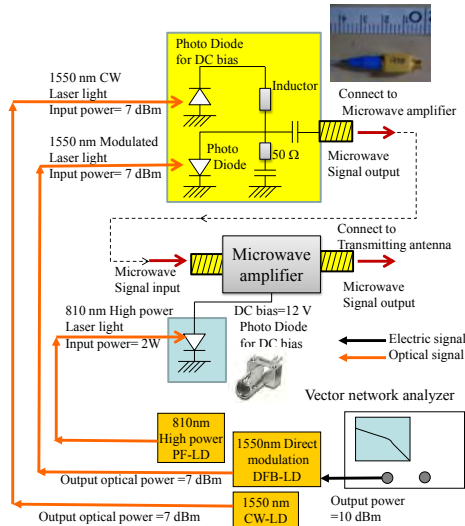


図 2 光ファイバでリンクした光デバイスを用いた送信システム概念図と用いたデバイスの写真

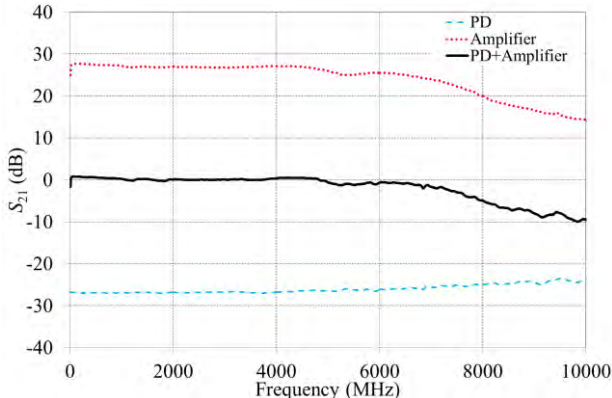


図 3 PD を用いた場合の送信光システムの周波数特性測定結果

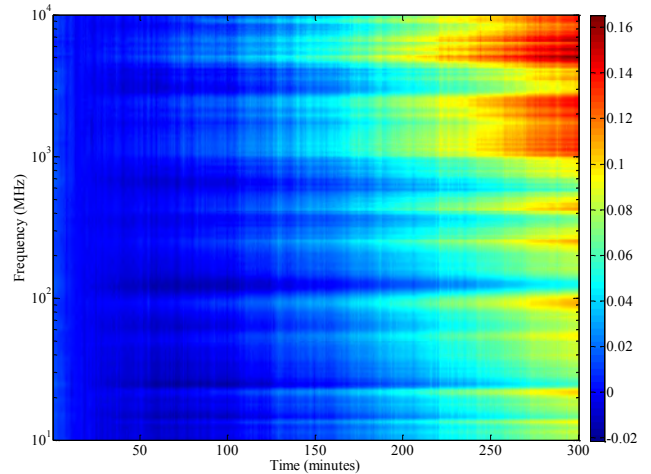


図 4 PD と増幅器を用いた光送信システムの時間安定性測定結果

3.2 コムジェネレータ+小型バイコニカルアンテナを模擬した光ファイバリンク疑似 EUT[8]

30 MHz~1 GHz の放射 EMI 測定では、コムジェネレータ+小型バイコニカルアンテナを疑似 EUT として用いた測定により(2節(1)の測定)、放射 EMI 測定の試験所間比較測定(技能試験)が実施される。コムジェネレータを疑似 EUT として用いた測定では、EMI レシーバやスペクトラムアナライザを用いて測定を行うため、ベクトル量での測定は困難であることから、3.1 節で示した光ファイバリンクシステムの PD の出力に接続している高周波増幅器を用いずに、コムジェネレータと同一サイズの金属ケースに PD のみを内蔵し、小型バイコニカルアンテナに接続した疑似 EUT を開発した。増幅器を用いない理由は、受信アンテナでの測定結果を放射 EMI 規制の電界強度と同程度とするためである。図 5 に 30 MHz~1 GHz で用いるコムジェネレータ+小型バイコニカルアンテナを模擬した送信システム概念図を示す。提案システムの同等性を検証することを目的として、光ファイバで接続された送信アンテナの測定結果、コムジェネレータ用いた疑似 EUT スペクトラムアナライザを用いた測定結果と時間領域包絡線算出結果として、バイコニカルアンテナを受信アンテナとして用いた場合の結果を図 6 に、ログペリオディックアンテナを用いた場合の結果を図 7 に示す。図中[Tx_Opt -], [Tx_Coax-]はそれぞれ、送信側に光システム、同軸ケーブルを用いて疑似 EUT と接続し場合をそれぞれ示し、[-Rx_Opt], [-Rx_Coax]はそれぞれ、受信側に光システム、同軸ケーブルを用いた場合をそれぞれ示している。また[Tx_Coax-Rx_Coax(OATS)]はオープンサイトで送受信ともに同軸ケーブルを用いて接続した場合の測定結果を示し、[Tx_Comb-Rx_Coax using Spectrum analyzer]は、送信側に疑似 EUT を用い、受信側アンテナとスペクトラムアナライザを同軸ケーブルで接続した場合の測定結果を示している。周波数領域での測定結果は、送信側に光ファイバで接続した疑似 EUT を用いた場合の結果が、コムジェネレータを疑似 EUT として、スペクトラムアナライザを用いて測定した場合の測定とほぼ同一の結果が得られることがわかる。バイコニカルアンテナを用いた場合の時間領域包絡線算出結果は、送信側に同軸ケーブルを用いた場合と光ファイバを用いた場合、50 ns 近辺に明確な差がみられ、同軸ケーブルを送信側に用いた場合には、コムジェネレータを用いた測定を模擬できないことがわかる。

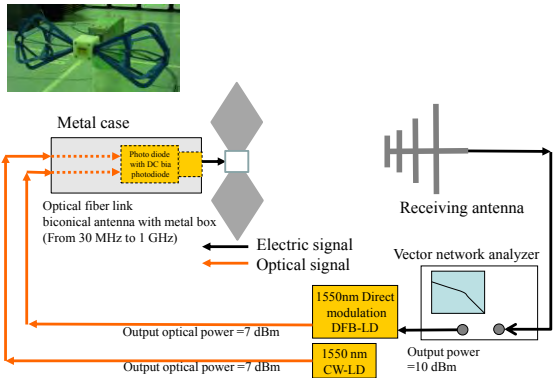


図 5 30 MHz~1 GHz で用いるコムジェネレータ+小型バイコニカルアンテナを模擬した送信光システムの概念図

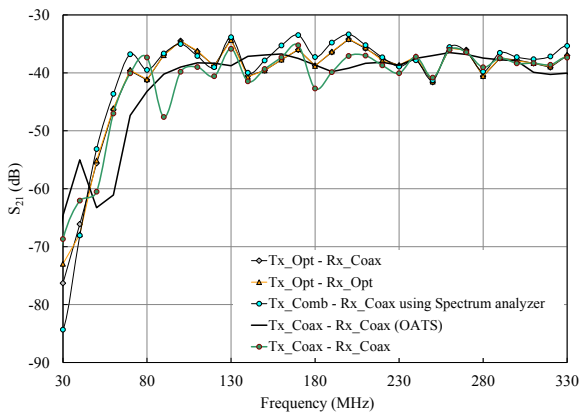


図 6(a) バイコニカルアンテナを受信アンテナとした場合の周波数領域測定結果比較(垂直偏波)

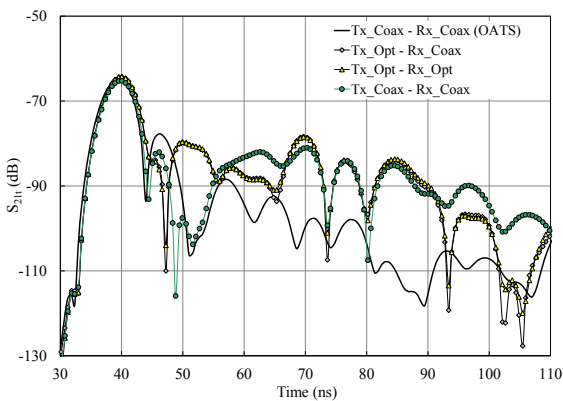


図 6(b) バイコニカルアンテナを受信アンテナとした場合の時間領域包絡線算出結果比較(垂直偏波)

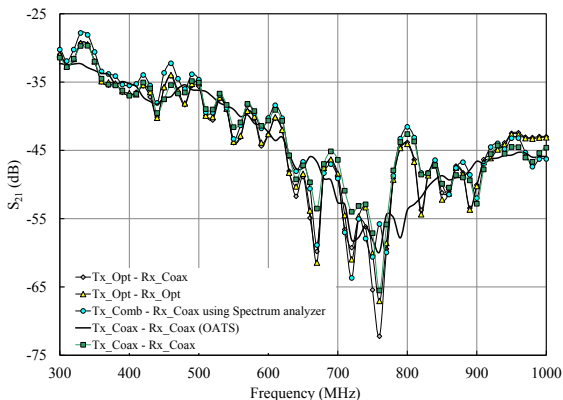


図 7(a) ログペリオディックアンテナを受信アンテナとした場合の周波数領域測定結果比較(垂直偏波)

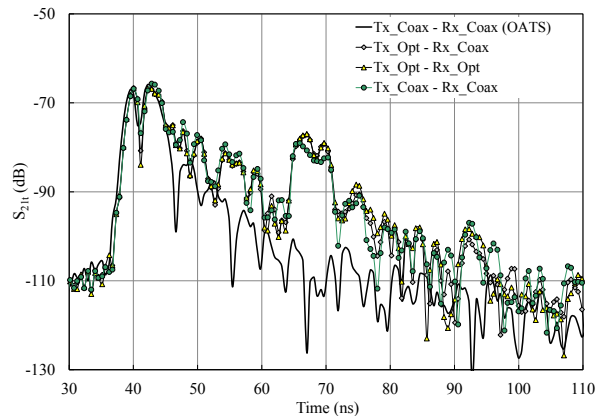


図 7(b) ログペリオディックアンテナを受信アンテナとした場合の時間領域包絡線算出結果比較(垂直偏波)

3.3 1GHz 超放射 EMI 測定用の光ファイバでリンクした光デバイスを用いた送信システムと比較試験方法[11]

図 8 に 2 節(5)の試験で用いた 1 GHz~6 GHz で用いる送信システムの概念図を示す。図 9 にアンテナの反射係数測定結果 $|S_{11}(\omega)|$ の周波数特性を示す。測定結果は、1 GHz~6 GHz において $|S_{11}(\omega)| < -10\text{dBm}$ であり、広帯域特性を有している。

1 GHz 超の放射 EMI 測定では、床面以外の 5 面が電波吸収体、受信アンテナと EUT 間の金属面である床に電波吸収体を配置した場所で測定を実施する。提案する比較試験手法は、通常の EMI 測定を模擬することを目的として、図 10 のとおりの配置とした。配置は、図 8 に示すフォトダイオード内蔵アンテナをターンテーブル中心位置にアンテナ中心を合わせてグラウンドプレーン上 1 m に設置する。受信システムには同軸ケーブルを用い、受信用アンテナとしては ETS-Lindgren 社製 R3117 リジッドガイドホーンアンテナを用いた。送受信アンテナ間距離は 3 m として、グラウンドプレーン上のアンテナ間に電波吸収体を敷いた状態で測定を実施した。ターンテーブルとしてデバイス社製 DT3323AV1/O-BA バッテリー駆動アジマステーブルを用いた。VNA は、10 MHz 間隔、IF 周波数=100 Hz として、ステップスイープモードにより測定した。

比較測定方法について説明する。測定セットアップの概念図を図 10 に示す。ターンテーブル中心に光ファイバでリンクした疑似 EUT としてのアンテナを設置する。水平偏波測定時には、光ファイバコネクタの無い方向を正面方向として測定を行い、垂直偏波配置では、光ファイバコネクタの配置を上面として測定を行った。受信アンテナは、送信アンテナと同一偏波として測定を実施した。床面に設置する電波吸収体は、TDK 社製 IS-SM050 を用いた。測定結果を図 11 に、測定結果から算出した時間領域算出結果を図 12 に示す。図 12、13 中 [Horizontal Pol.] は送受信アンテナを共に水平偏波とした場合の測定結果を示し、[Vertical Pol.] は送受信アンテナを共に垂直偏波とした場合の測定結果を示している。

自由空間に送信アンテナと受信アンテナを正面方向に同一偏波で設置した場合には、水平偏波、垂直偏波ともに、同一の結果が得られるはずである。しかし、図 11 に示す周波数特性測定結果では、水平偏波、垂直偏波の測定結果には、最大で 5 dB 程度の差が存在する結果となっている。図 12 に示す時間領域算出結果では、29 ns~31 ns に観測される直接到来波と考えられる測定結果はほぼ同じ波形が観測されるが、31 ns 以降に到来する床面吸収体からの反射波により、水平偏波と垂直偏波の場合の測定結果に差が生じていることが

分かる。時間領域算出結果は、この床面からの反射波のレベルを理想的な自由空間での測定結果と比較することにより、被評価電波暗室の床面吸収体の性能差を比較可能であることを示している。本測定結果は、産業技術総合研究所が有する幅 15 m×長さ 24 m×高さ 9 m の電波半無響室内のほぼ中央床面に電波吸収体を設置して測定を実施しているため、壁面、天井面の電波吸収体からの反射波は直接波の到来から 30 ns 以上遅れて到来する。このため、同一寸法の電波暗室では、図 12 に示す測定開始から 40 ns 程度までの時間領域算出結果測定と比較することで、床面に設置した電波吸収体の性能比較が可能である。さらに、比較的小型の電波暗室では、床面からの反射波と壁面、天井面からの反射波が重なり合って測定されると考えられる。この場合にも、同一の EUT、受信アンテナ、VNA、床面吸収体を用い、産業技術総合研究所での測定結果の時間領域測定結果を引き算して比較する等により、床面以外からの反射波を評価することが可能である。

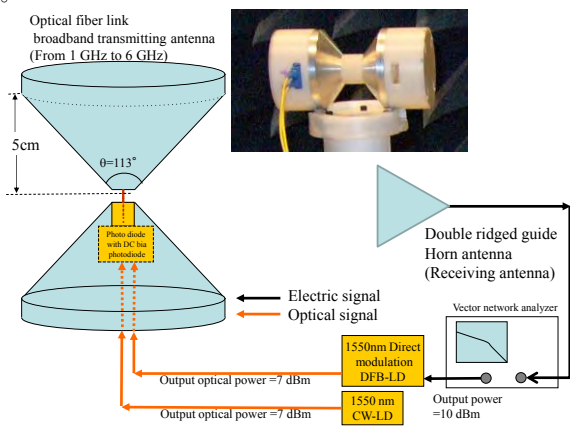


図 8 1GHz~6GHz で用いる送信光システムのご概念図

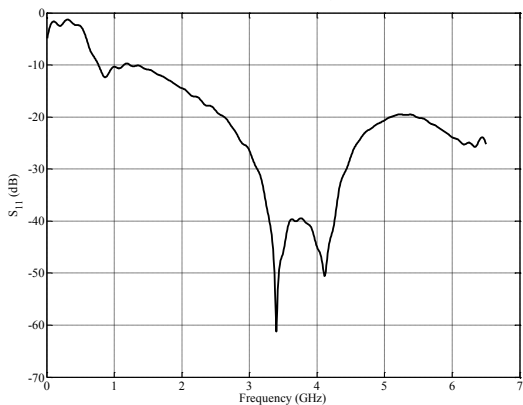


図 9 1GHz~6GHz 用アンテナの $|S_{11}(\omega)|$ 周波数特性

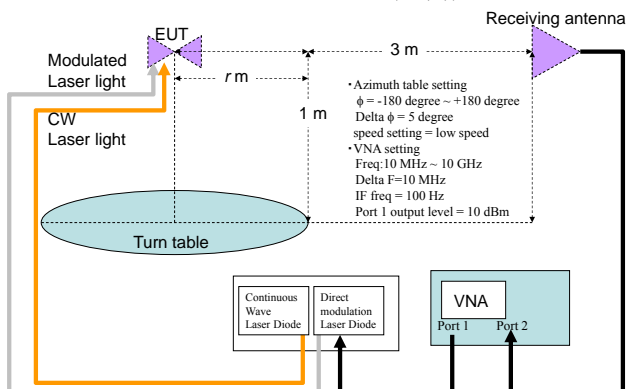


図 10 1GHz~6GHz での比較測定セットアップのご概念図

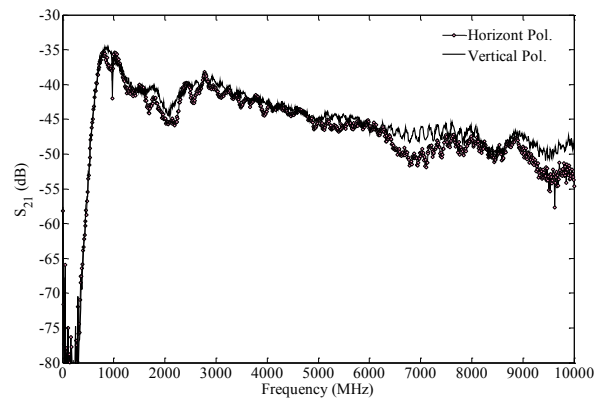


図 11 送受信アンテナが同一偏波の場合の $|S_{21}(\omega)|$ 測定結果

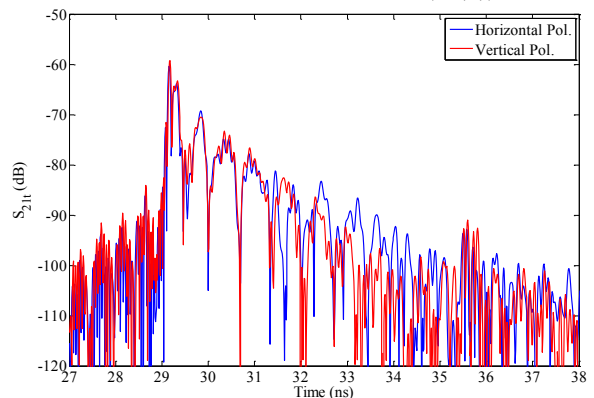


図 12 送受信アンテナが同一偏波の場合の時間領域包絡線算出結果

3.4 光ファイバでリンクした光デバイスを用いた放射 EMI 測定用 30 MHz~6 GHz 超広帯域送信アンテナシステム

構築システムは、O/E デバイス内蔵アンテナ、受信用アンテナ、ベクトルネットワークアナライザ（以下 VNA）で構成される。アンテナは、入力インピーダンスが 50 Ω となる円錐角度=約 113° とし、給電点からエレメント端までの長さを約 10 cm としたソリッドタイプのバイコンアンテナであり、バランスを必要としない構造のアンテナである。図 13 に構築したシステムのご概念図を示し、図 14 にアンテナの $|S_{11}(\omega)|$ 周波数特性測定結果を示す。測定結果は、開発アンテナが、6 GHz までの電波を広帯域に放射することが可能であることを示している。図 15、16 に受信アンテナ高さ H=1m、2m、3m、4m した場合のバイコンアンテナ、ログペリオディックアンテナを受信アンテナとしてそれぞれ用いた場合の測定結果を示す。図 17 に 6 面が電波吸収体とした場合のダブルリッジガイドホーンアンテナによる測定結果を示す。図 15~17 に示す測定結果は、光ファイバでリンクした開発広帯域送信アンテナを疑似 EUT として用いた測定が可能であることを示している。

4. まとめ

本報告では、光応用電磁界計測技術を用いた東北・北関東復興支援事業として、光ファイバでリンクした送信アンテナを疑似 EUT として用いる試験について、その概要を説明した。用いている光システムは平成 20 年度~22 年度に実施した地域イノベーション創出共同体形成事業によって開発し、関東甲信越静地域の 12 の公設研との共同研究により開発し、測定マニュアルを整備したものである。平成 23 年度~実施している東北・北関東復興支援事業では、地域の公設研とともに共同研究を実施しているところである。測定結果の詳細、比較試験結果については、今後報告することとする。

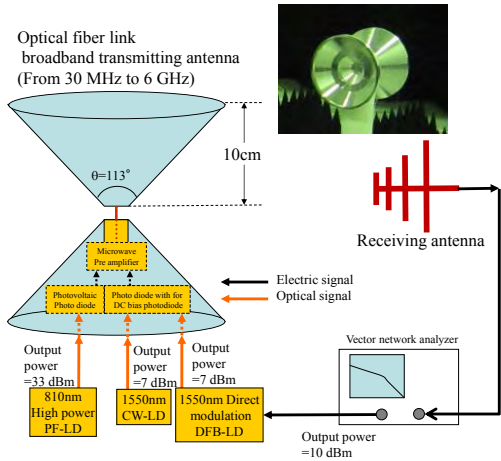


図 13 30 MHz～6 GHz で用いる送信光システムの概念図

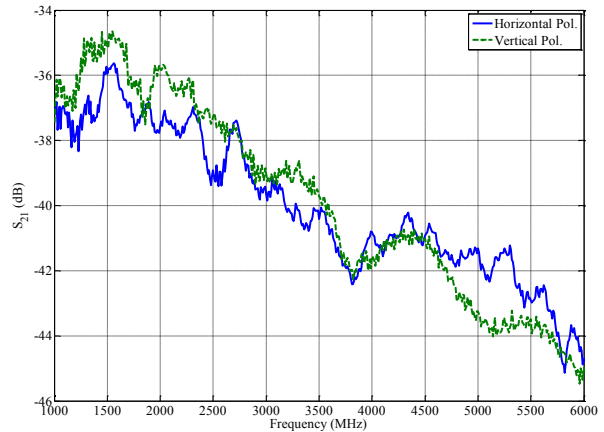


図 17 ダブルリッジドガイドホーンアンテナを受信アンテナとした場合の測定結果(水平・垂直偏波)

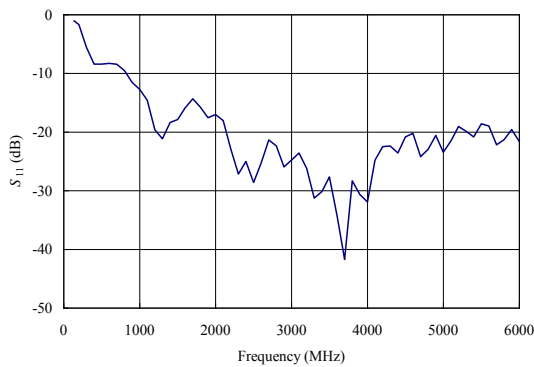


図 14 アンテナの $|S_{11}(\omega)|$ 周波数特性測定結果

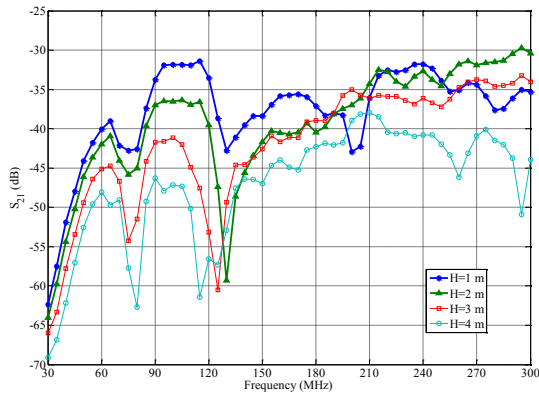


図 15 バイコニカルアンテナを受信アンテナとした場合の測定結果(垂直偏波)

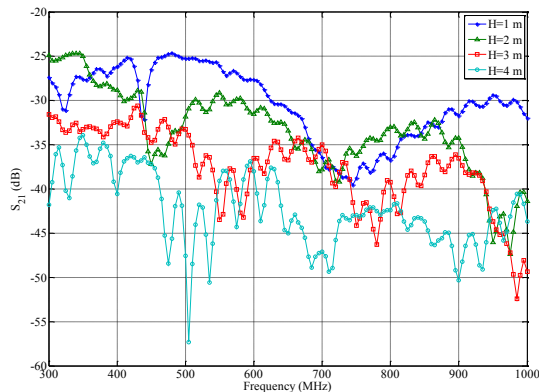


図 16 ログペリオディックアンテナを受信アンテナとした場合の測定結果(垂直偏波)

謝 辞

当研究の実施にあたり、固体電池が不要な構造のフォトダイオード、EA 変調器を製造いただいた NTT エレクトロニクス株式会社石橋忠夫氏、光給電システムを提供いただいた株式会社精工技研鳥羽良和氏、直接変調レーザダイオードシステムを製造いただいた住友大阪セメント株式会社の皆様に深く感謝いたします。共同で測定を実施する関東甲信越静、東北地域公設試の皆様に感謝します。本研究は、関東甲信越静地域イノベーション創出共同体形成事業・同後継事業、東北・北関東復興支援事業により実施している。

文 献

- [1] CISPR 16-1-1 Ed. 2.0:2006, “無線妨害及びイミュニティ測定装置並びに測定方法の仕様書第 1-1 部:無線妨害及びイミュニティ測定装置測定装置”
- [2] 日本工業標準調査会, <http://www.jisc.go.jp/>
- [3] 公益財団法人日本適合性認定協会, <http://www.jab.or.jp/>
- [4] 株式会社電磁環境試験所認定センター, <http://www.vlac.co.jp/>
- [5] 産業技術総合研究所計測標準研究部門 NMIJ 計測クラブ電磁界クラブ
<http://www.nmij.jp/~nmijclub/denjikai/denjikai.html>
マニュアルダウンロードのページ
http://www.nmij.jp/~nmijclub/denjikai/bak/denjikai_innovamanual.html
- [6] 黒川悟, 飴谷充隆, 廣瀬雅信, “EMI 測定結果の光デバイスとネットワークアナライザによるタイムドメイン評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, ACT2009-09, 2009 年 9 月
- [7] VSQ 1000 レファレンス放射ノイズ発生器 30MHz ~ 1GHz, テセック株式会社.
- [8] S. Kurokawa, M. Ameya, and M. Hirose, “A Novel Evaluation Method for Semi-anechoic Chamber Using Zero Biased Optical Devices and Time-domain Analysis,” in Proc. of ICWIT2012, 308.5, Sept. 2010.
- [9] Satoru Kurokawa, Michitaka Ameya, Masanobu Hirose, Mamoru Ishimoto, “Optical Fiber Link Bi-con antenna for EMI Anechoic Chamber Evaluation Below 1 GHz,” in Proc. of APMP2012, PB-4, April 2012.
- [10] JDS Uniphase 社 Photovoltaic power converter PPC-4E, http://www.jdsu.com/ProductLiterature/ppc4e_ds_pp_ae.pdf
- [11] Satoru Kurokawa, Michitaka Ameya, “Performance comparison of EMI anechoic chamber above 1 GHz using optical feeding antenna,” in Proc. of APMP2012, PB-8, April 2012.