

2 先端 EMC 技術 (通信 EMC)

2 *Advanced EMC Measurement Technologies “EMC in Wireless Communication Systems”*

2-1 LED 照明から生じる電磁雑音の評価技術

2-1 *Evaluation Techniques for Electromagnetic Noise from LED Lighting*

呉 奕鋒 松本 泰 後藤 薫

IFONG WU, MATSUMOTO Yasushi, and GOTOH Kaoru

自然災害による節電・省エネ意識の高まりから、太陽光発電や LED 照明などの環境に優しい電気・電子機器の導入が積極的に進められている。しかし、これらの機器から発生する電磁雑音によって、周囲の通信や他の機器に干渉を与える可能性がある。特にスマートコミュニティでは、様々な機器がインターネットに接続され、電磁雑音はその通信機能に障害を引き起こすリスクがある。電磁環境研究室では、より信頼性の高い社会インフラ実現への貢献を目指して、数値解析や測定によって電磁雑音の発生メカニズムやその強度を正確に把握する技術と、雑音による通信・放送への影響を定量的に評価する技術の研究開発に取り組んでいる。本稿では、LED 照明からの放射雑音の特性及び通信・放送に与える影響に関連する研究を行ってきたので、その成果を報告する。

The increasing awareness of energy-saving and conservation due to natural disasters has led to active promotion of environmentally friendly electrical and electronic devices such as solar power generation and LED lighting. However, these devices generate electromagnetic noise that may interfere with surrounding communications and other equipment. In particular, in smart communities where various devices are connected to the internet, there is a risk of electromagnetic noise causing disruptions to their communication functions. The Electromagnetic Compatibility (EMC) Laboratory is dedicated to contributing to the realization of more reliable social infrastructure. We are engaged in research and development of technologies that accurately understand the mechanisms and intensities of electromagnetic noise through numerical analysis and measurements, as well as techniques to quantitatively evaluate the impact of noise on communication and broadcasting. In this paper, we present the results of our research related to the characteristics of radiated noise from LED lighting and its impact on communication and broadcasting.

1 まえがき

近年、電力会社が最大需要電力を更新するニュースが頻繁に報じられている。電力需要が増加し続ける中、企業のみならず一般家庭においても節電に対する関心が高まっている。自然エネルギーを利用する太陽光発電を含めた発電システム (供給側) と、一般家庭や企業 (需要側) との間で電力が効率的に制御され、電力の需要と供給のバランスが最適化される次世代送電網 (スマートグリッド) の導入が積極的に進められている [1]-[3]。スマートグリッドは、IT (Information Technology) 技術

を活用して、発電所から一般家庭やオフィスなどの電力需要家までの送電網を制御し、効率的な電力の供給と需要のバランスを実現することで、エネルギーとコストの両面での効率化を目指している [4]。また、最新の情報通信技術である IoT (Internet of Things) や M2M (Machine to Machine) を活用し、家庭内の全ての電化製品をインターネットに接続することで、スマートコミュニティ社会の実現が進んでおり、私たちはより便利な生活を送ることができるようになっていく。

一方、スマートグリッドを構成する機器 (例えばス

2 先端 EMC 技術 (通信 EMC)

スマートメーターなど)や、これらに接続された省エネルギー家電(例えばLED照明など)が電磁雑音を発生すると、スマートコミュニティの通信機能に障害が発生し、広範囲な被害が生じる可能性も否定できない。信頼性の高い電力インフラを構築するためには、あらゆる電磁環境下でも正常に動作するシステムを実現する必要がある。そのためには、電磁雑音を正確に測定し、さらにそれらが周囲に与える影響を適切に評価する技術が必須となる。電磁環境研究室では、より複雑性が増していると考えられる電磁環境について、雑音を形成する要因の特定や、様々な電磁干渉のメカニズムの解明を目指し、電磁雑音が通信に与える影響の評価法や複数の雑音が混在する場合の雑音識別法などの研究開発を行っている。これまでに私たちは、省エネルギー機器から発生する雑音の特性やデジタル放送への影響を明らかにしてきた。本稿では、省エネルギー機器の例としてLED照明を取り上げ、LED照明から生じる電磁雑音の識別法、電力線からの漏洩磁界の特性評価、さらにLED照明から生じる電磁雑音がデジタル通信に与える影響及び受信保護に対する電磁雑音の許容レベルについて報告する [2][3][5]。

2 電磁雑音が混在する環境下における LED 雑音の識別法

LED照明は、効率化、長寿命化、そして低価格化が進んでおり、環境への負荷軽減が実現できることから、今後も需要が増加することが予想される。特に、企業が省エネを目的として大量にLED照明を導入するケースが増えており、フロア全体にLED照明が導入される事例も増加している。しかし、一箇所に大量のLED照明を導入すると、電源に同期して重畳した電磁雑音がデジタル通信・放送システムに悪影響を与えることがあるため、今後このような問題が増えることが懸念されている [5][6]。仮に電磁干渉が発生した場合、早急に雑音源を特定することが重要となるが、電磁環境には様々な雑音が混在しているため、LED雑音の特定は困難である。そこで、私たちはこれまでに、複数の電磁雑音が混在する環境下において、LED照明からの放射雑音を識別する方法を提案してきたので、その方法について報告する [2]。

2.1 LED 照明の特徴

店舗や公共スペースなどでLED照明を使用する場合、同じフロアには複数の異なる種類のLED製品が配置されることが予想される。このような場合、建物で使用している無線通信に受信障害が発生した場合、どのタイプのLED照明の電磁雑音が問題を引き起こ

しているのかを特定する必要がある。しかし、営業中に一つずつフロアのLED照明を消したり外したりして、受信状況を確認することは困難であり、大変な労力が必要になる。可能であれば、LED照明をすべて点灯したまま妨害波調査を行うことができれば、時間と労力を節約することができる。

LED照明はメーカーや機種によって駆動方式や使用しているスイッチング周波数が異なるため、発生する電磁雑音の周波数スペクトルや時間波形も異なる。妨害を受けている無線通信の周波数が既知の場合、その周波数の電磁雑音が特に大きいLED照明に着目して妨害波探索を行うことができる。

従来の妨害波探索法は、アンテナや受信機で雑音源を探索するが、妨害波測定で使用されるアンテナのビーム幅は広く、アンテナを左右に振っても雑音源の到来方向を特定することは困難である。光は集光レンズを使用することで指向性を鋭くすることができ、(高感度の)フォトディテクタと組み合わせることにより、光源までの距離が遠くても単一のLED照明からのピンポイントな受光が可能である。我々は、LED照明からの放射雑音の特徴や光強度の変化の特徴を利用し、複数の放射雑音が混在する電磁環境におけるLED雑音の識別法について提案した [7][8]。

2.2 LED 照明の放射雑音の識別

LED照明から放射される雑音は、その発生の仕組みによって特徴が現れる。通常、LED照明はPWM(Pulse Width Modulation: パルス幅変調)などのスイッチング回路を使用して駆動されるため、放射雑音は周期的なパルス波形になる。雑音パルスは、スイッ

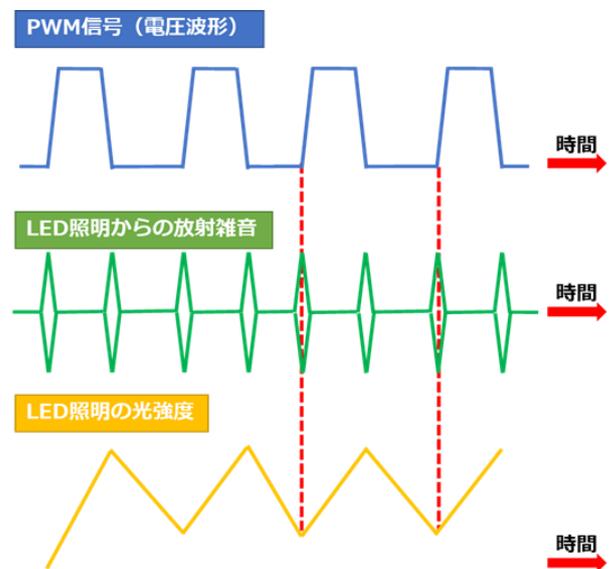


図1 PWM信号、LED照明からの放射雑音、光強度の時系列関係

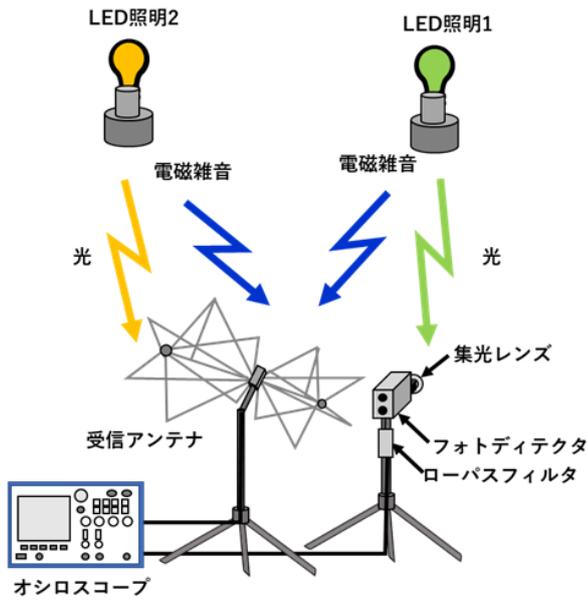


図2 フォトディテクタを用いたLED照明からの放射雑音の識別法

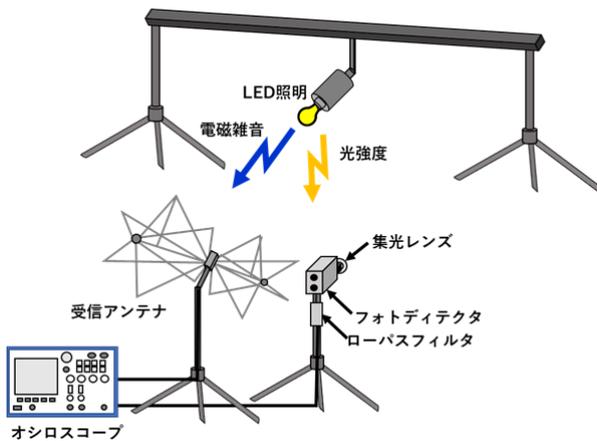


図3 フォトディテクタを用いたLED雑音の特定測定の設定アップ

チングにおけるON/OFF切り替え時に発生し、パルスの間隔は、図1のように電源のスイッチングの時間間隔と一致する。一方、LED照明の光強度変化は、駆動電流によって周期的に変化し、変動周期は電源のスイッチング周期と一致する。この性質を利用して、放射雑音の発生周期とLED照明の光変化周期を比較することで、LED照明からの雑音を特定できる。図2は、フォトディテクタを用いた雑音の発生源を識別するための装置を示している。図2では、受信アンテナで観測される電磁雑音は、LED照明1とLED照明2を区別せず同時に測定される。しかし、フォトディテクタは鋭い指向性を持っているため、どちらか一方のLED照明の光強度のみを観測することができ、電磁雑音の波形が、光強度の周期とパターンに合致すると、LED雑音を識別できる。

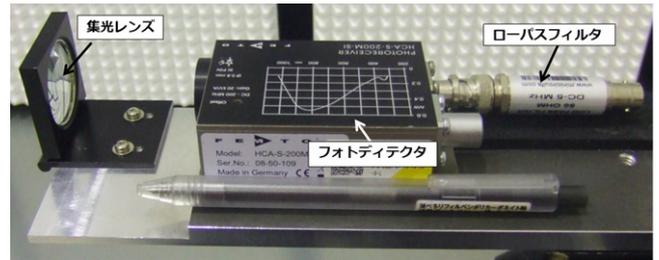


図4 光強度を測定する装置

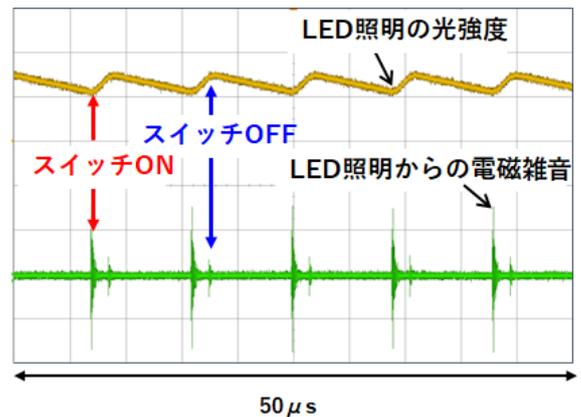


図5 フォトディテクタを用いたLED雑音識別の例

2.3 LED照明からの放射雑音の時系列変化に基づく識別法の有効性

LED雑音の識別法の有効性を確認するために、図3に示すような測定系を用いて測定を行った。LED照明はライティングダクトレール上に配置される。ライティングダクトレールは、照明器具を取り付けるためのレール状の装置である。本研究では、LED照明をレールの中心に設置し、LED雑音の識別法の有効性について検討した。受信アンテナによる電磁雑音波形とフォトディテクタによる光強度の変化は、多チャンネルオシロスコープに接続して同時に測定を行った。

図4に示すように、光強度の受光部にはフォトディテクタが使用されており、LED照明からの光を集光レンズで収束させたものが入力される。フォトディテクタは、光の強度を電気信号の強度に変換して出力する。このフォトディテクタの電気信号は、光強度の変化のみを取り出すためにローパスフィルタを通過し、最終的にオシロスコープの入力端子に送られる。

図5は、先述した識別法に基づいて、LED照明からの放射雑音を時間領域で測定した例を示している。LED雑音は、電源に同期して周期的に発生するインパルス性の雑音であり、時間幅が $0.1\mu\text{s}$ 程度の非常に短いパルスである。このインパルス性の電磁雑音は、LED駆動用スイッチング電源のON/OFF切り替え時に発生する。また、LED照明の光強度は駆動電流によって周期的に変動する。そして、図5に示すように、

2 先端 EMC 技術 (通信 EMC)

放射雑音の発生周期と LED 照明の光変化の周期を時間領域で照合すると、同じ周期で (同期して) 電磁雑音が発生していることから、この特性を用いれば放射雑音源を識別することが可能である。

2.4 複数の LED 雑音が混在する場合における LED 雑音の識別

本章では、複数の放射雑音が混在する電磁環境下における特定の LED 雑音の識別について検討した。図6は、複数の放射雑音が混在する場合における LED 雑音の識別測定のためのセットアップを示している。LED 照明は4種類あり、それぞれ1つずつ計4つをライティングダクトレール上に配置する。これらの LED 照明 (LED 照明1～LED 照明4) は同時に点灯され、フォトディテクタは LED 照明2 からの光の波形を測定する。図7に示されるように、受信アンテナで測定される電磁雑音波形は、これら4個の LED 電球すべての波形が観測されるが、光強度は、LED 照明2の波形パターンに従って変化する。そして、電磁雑音の時間変化と LED 照明2の光強度の周期を照合することで、

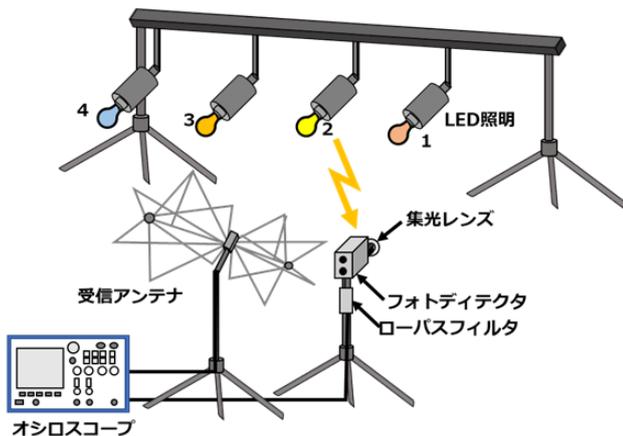


図6 複数の放射雑音が混在する電磁環境における LED 雑音の識別測定のセットアップ

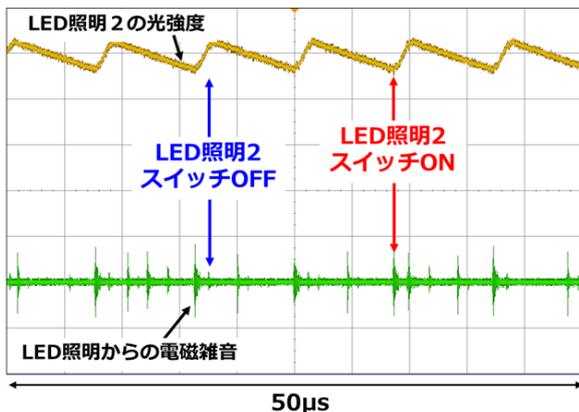


図7 複数の LED 雑音が混在する場合における LED 雑音の識別例

LED 雑音の発生源を突き止める可能性を実験的に示した。

3 ライティングダクトレールに装着された LED 照明からの漏洩磁界

LED 照明のスイッチング電源から放射される電磁雑音が周囲の通信・放送へ電磁干渉を引き起こす可能性が指摘されているが、電磁妨害波放射のメカニズムについてはまだ十分に解明されていない。本章では、LED 照明から放射される電磁雑音の基本的特性を把握するために行った研究内容について報告する。具体的には、LED 照明を装着したライティングダクトレールからの漏洩磁界測定とその簡易モデルの検討について述べる [3][9]。

3.1 ライティングダクトレールからの漏洩磁界測定

LED 照明が装着されたライティングダクトレールからの漏洩磁界測定について、そのセットアップを図8に示す。高さ1 mの位置に長さ2 mのライティングダクトレールを設置し、ダクトレールの左端から電源線を介して電源コンセントに接続する。LED 照明は、ダクトレール左端を基準点 (0 cm) として、基準点から 50 cm (L1)、100 cm (L2) 及び 150 cm (L3) の3か所に設置する。また、ダクトレールから 1 cm 離れた位置にループアンテナを設置し、基準点からダクトレールに沿って 1 cm 間隔でスキャンしながら漏洩磁界測定を行う。磁界強度はスペクトラムアナライザより測定する。

図9は、LED 照明を単体で配置した場合のダクトレール上の磁界分布を示している。LED 照明の配置位

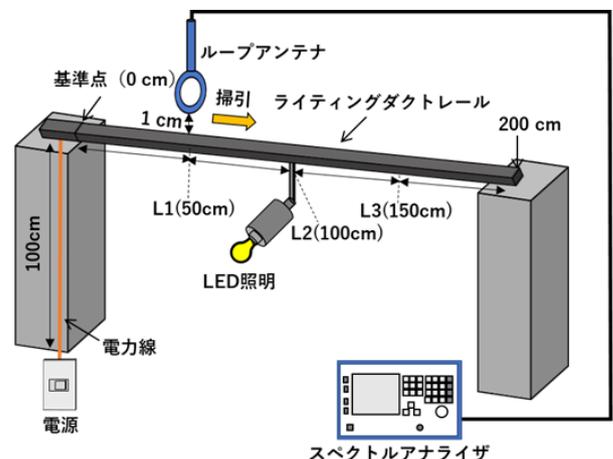


図8 LED 照明を装着したライティングダクトレールからの漏洩磁界測定のセットアップ

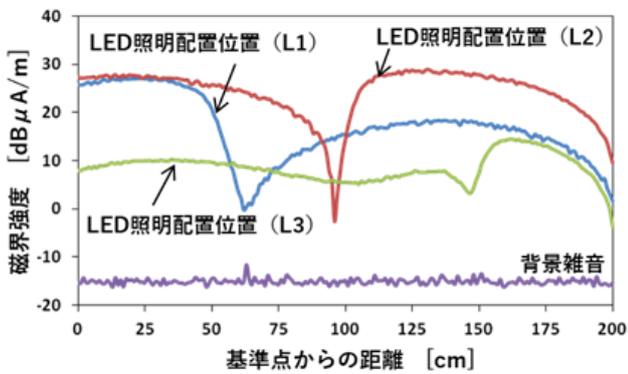
置は、図 8 に示されるように、L1、L2 及び L3 の 3 か所に配置されている。図 9(a) より、測定周波数 100 MHz におけるダクトレール上の磁界分布においては、LED 照明の設置位置に節が生じることがわかる。図 9(b) に示される測定周波数 300 MHz の結果においては、100 MHz の場合と同様に LED 照明の設置位置に節が生じる上に、測定周波数の約半波長ごとに磁界分布の節と腹が交互に現れる現象すなわち定在波が発生している様子が見られる。以上の結果より、LED 照明を装着したライティングダクトレールからの漏洩磁界は、LED 照明の配置位置に磁界分布の節を持ち、またダク

トレールが波長に比べて長い場合には、ダクトレール上の磁界分布に定在波が現れることが確認された。

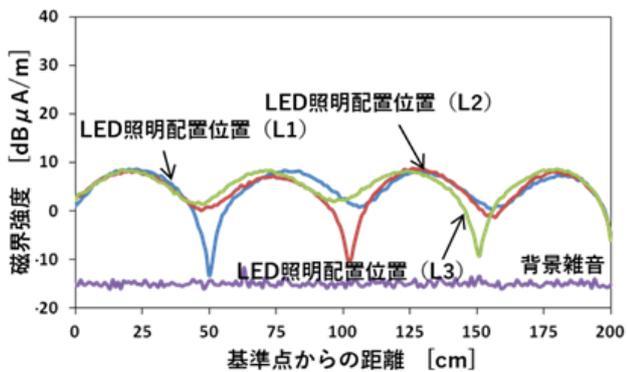
3.2 ライティングダクトレールを模擬した簡易計算モデル

ライティングダクトレールに取り付けられた照明の電源は、ダクトレール内の 2 本の平行導線から供給される。通常、ダクトレールに流れる電流（ディファレンシャルモード電流）は、2 線路の往復電流であり、各線路上の振幅は等しく逆向きである。そのため、往復電流によって発生する磁界の大部分は相互に打ち消され、放射電界はほとんど発生しない。しかし、ダクトレールに LED 照明を装着すると、平行 2 線路上に LED 照明による分岐が発生し、ダクトレールの平衡度が悪くなる。すると、一部の電流（コモンモード電流）が 2 線路を同じ向きに流れることにより、ダクトレール全体が一本線のようにふるまい、さらに大地などで往路をとることによって、ダクトレールとグラウンド間に大きな電流経路のループを描く。そのため、発生する磁界はほとんど打ち消されず、大きな放射雑音の原因となる。また、前節の測定結果において定在波が確認されたことから、ダクトレールとグラウンド間に伝送線路が形成されていると考えられる。以上の考察を元に、LED 照明を装着したライティングダクトレールの簡易的な伝送線路モデルを検討した。

図 10 にその簡易モデルを示す。配線の不平衡によりコモンモード電流が発生すると仮定し、コモンモード電流のみを考慮するために、電源線及びダクトレールを単線で模擬した。また、電源線の先端にはインピーダンスが接続され、ダクトレールの右端は開放した。図 11 は、左端から 10 cm を位置基準点としたダクトレール上の漏洩磁界の解析結果を、簡易モデルによる数値解析と前節の測定結果の比較によって示したものである。LED 照明を L1、L2 及び L3 にそれぞれ単体で設置した場合について、図 11 (a) ~ (c) は周波数 100 MHz における結果を、図 11 (d) ~ (e) は周波数 300 MHz における結果を示している。縦軸の値は、各



(a) 周波数 100MHz



(b) 周波数 300MHz

図 9 LED 照明の配置位置における漏洩磁界分布の測定結果

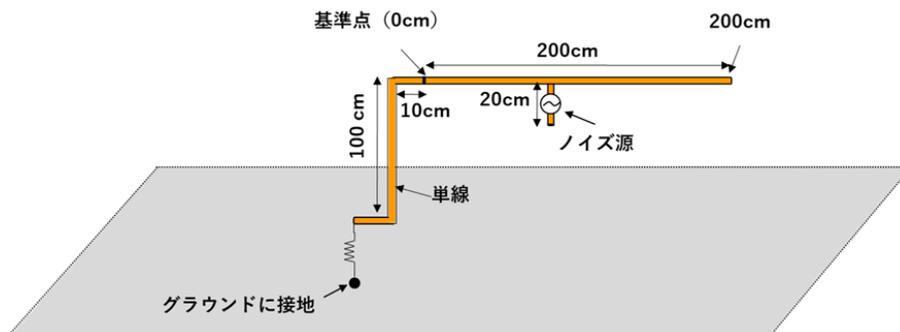


図 10 LED 照明を装着したライティングダクトレールの簡易的な伝送線路モデル

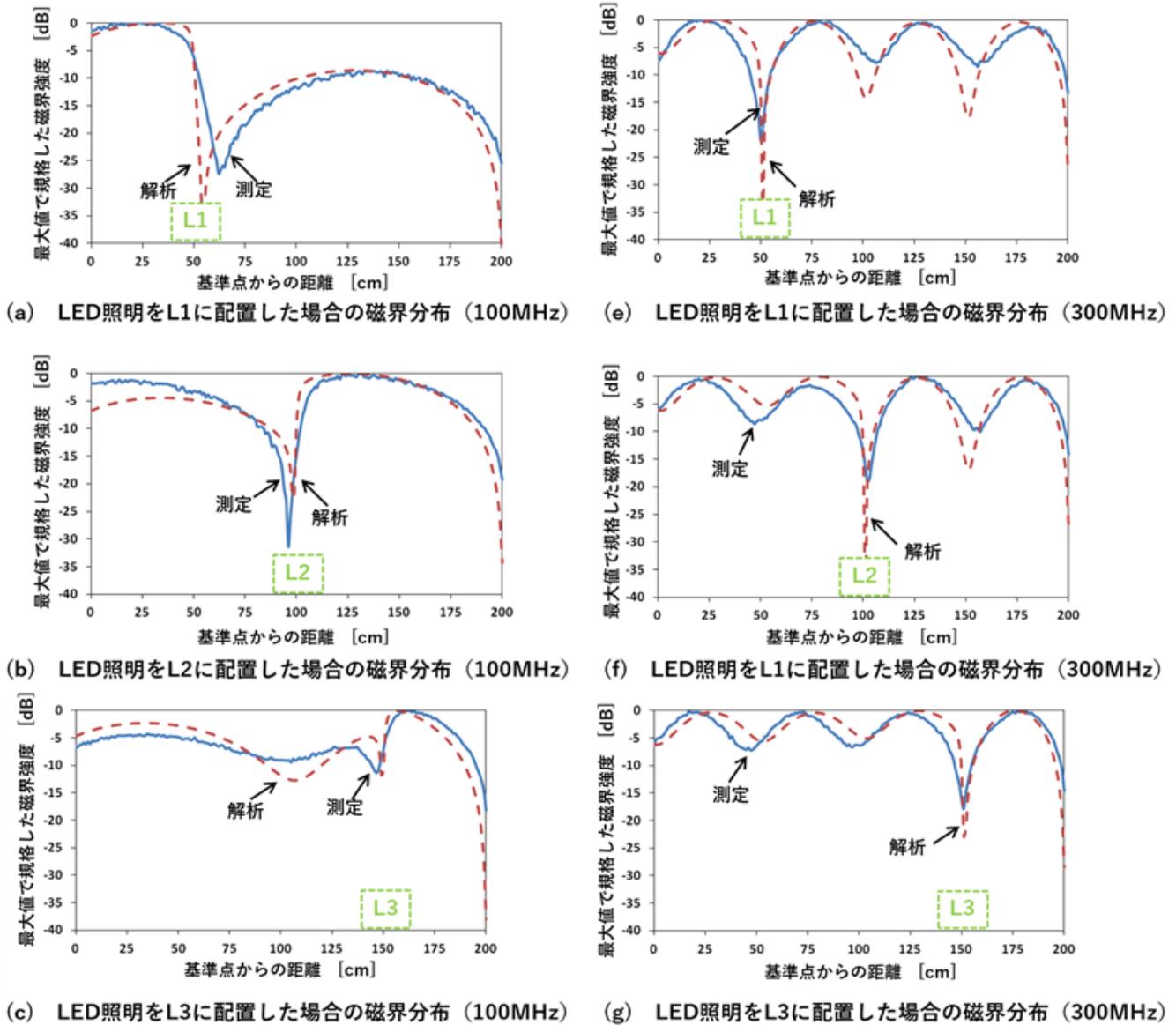


図 11 LED 照明を装着したライティングダクトレールにおける磁界分布の測定と解析結果の比較

磁界強度の最大値で正規化されている。解析値と測定値はほぼ一致しており、提案された簡易モデルを使用することで、ダクトレール上の漏洩磁界の評価及び電磁雑音の放射パターンを予測することが可能であることが示唆されている。

LED 照明から放射された雑音の APD (Amplitude Probability Distribution : 振幅確率分布) 特性

低消費電力・高効率な省エネ機器を実現するため、スイッチング電源を搭載した電化製品が増加している。しかし、スイッチング電源は、ON/OFF の切替時にスイッチング周波数とその高調波の周波数において雑音が発生し、そのスペクトルは VHF 帯から UHF 帯にま

で広く分布する場合もあることが報告されている [5]。このため、省エネ機器からの電磁雑音及びその周囲で発生する電磁妨害波による、FM ラジオ、マルチメディア放送、地上デジタル放送等の通信・放送への受信障害等の電磁干渉問題についての懸念が提起されている。本章では、APD を用いて LED 照明から放射される電磁雑音の特性を調べ、またその雑音が地上デジタル放送に与える影響について報告する。

4.1 LED 雑音の APD 評価

4.1.1 APD について

本章では、LED 照明から放射される雑音の APD を測定する方法について説明する。図 12 は、測定セットアップの概略図を示している。図に示されているように、LED 照明から放射される雑音の APD を、5 つの

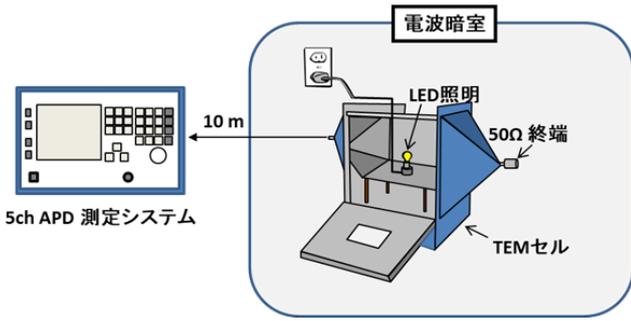


図 12 LED 照明から放射された雑音の APD 測定

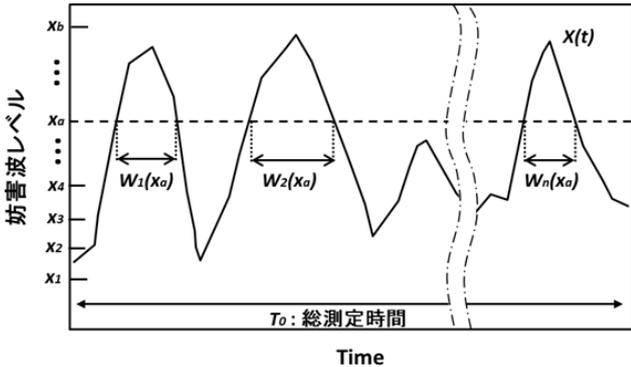


図 13 APD の概念図。

APD を同時に測定できる「5 チャンネル APD 測定システム」を用いて測定を行った。

ここでの APD は、雑音の包絡線振幅の統計分布の 1 つであり、雑音振幅が、ある閾値を超える時間率を示す [10]。APD を用いて干渉雑音を測定することで、雑音の性質、例えばガウス性雑音やインパルス性雑音などを分析することができる。また、APD の測定結果は、デジタル無線システムにおける雑音干渉する場合の BEP (Bit Error Probability) 特性と直接関連付けることができる。図 13 は、APD の概念を示した図である。横軸は時間を、縦軸は妨害波の包絡線レベルを表している。APD は以下のように定義される。

$$APD(x) = \sum_{i=1}^{n(x)} W_i(x_a) / T_0 \quad (1)$$

ここで、 W_i は妨害波の包絡線 $x(t)$ がある閾値 x_a を超える期間を示し、 $n(x)$ は $x(t)$ が x_a を超える回数を示す。 T_0 の総測定時間である。

4.1.2 LED 照明 A から放射された (継続的な繰り返しパルス) 雑音の APD 測定

本章では、例として地上デジタル放送に使用されている周波数帯である 473 MHz において、LED 照明 A からの雑音 (連続的な雑音) の APD を 1 kHz から 100 kHz の帯域幅で測定を行う。LED 照明 A のスイッチング周波数は約 44.1 kHz である。図 14 は、LED 照

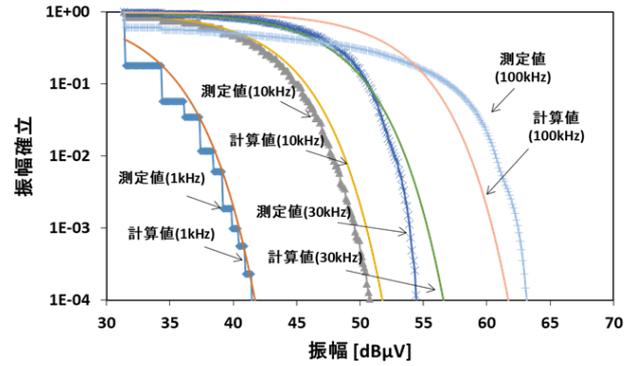


図 14 LED 照明 A から放射された雑音の APD の測定結果。

明 A からの雑音の APD と計算されたガウス雑音と比較した結果である。測定帯域幅が狭くなるにつれて、LED 照明による雑音の特性がガウス雑音とほぼ同等になっていることがわかる。また、ガウス雑音の包絡線は Rayleigh 分布に従い、その APD (APD_G) は、以下のように定義される。

$$APD_G(x_a) = \exp\left(-\frac{x_a^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここで、 x_a は雑音の瞬時電圧、 σ^2 は LED 雑音と背景雑音 (受信系のシステム雑音) を含む雑音の平均電力である。図 14 に示されるように、LED 照明 A からの雑音の APD は、RBW (Resolution Bandwidth: 分解能帯域幅) が 1 kHz の場合、式 (2) による Rayleigh 分布の APD (計算値) と非常によく一致する。RBW が 30 kHz になると、測定値と計算値はわずかに異なる。さらに、RBW が 100 kHz になると、測定値と計算値に明確な差が生じている。これからわかるように、LED 照明 A のスイッチング周波数よりもはるかに小さい RBW では、LED 照明 A の特性はガウス雑音に近似していることがわかる。

4.1.3 LED 照明 B から放射された (繰り返しパルスが断続的に現れる) 雑音の APD 測定

本章では、LED 照明 B からの雑音の APD について検討した。LED 照明 B のスイッチング周波数は約 113.6 kHz である。また、LED 照明 B からの雑音は LED 照明 A と異なり、継続的な繰り返しパルス雑音ではなく、繰り返しパルスが断続的に現れる雑音である。したがって、式 (2) を用いて LED 照明 B からの雑音の特性を直接ガウス雑音と比較することは困難である。ここでは、LED 照明 B からの雑音の特性を評価する前に、APD の結果から時間に対する LED 雑音の出現期間の割合を推定し、パーセンテージで表示する。図 15 に示すように、時間に対する LED 雑音の出現周期の割合は 80 % であるがこともわかった。つまり、APD 曲線には、図 16 に示すように 2 つの雑音曲線が合成さ

2 先端 EMC 技術 (通信 EMC)

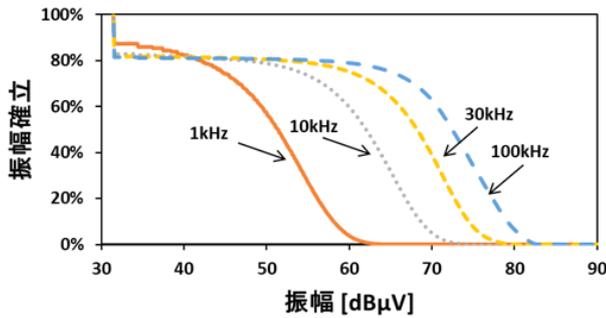


図 15 LED 照明 B から放射された雑音の APD の測定結果

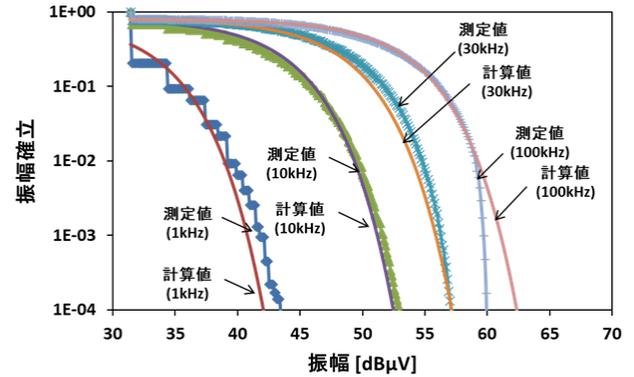


図 17 LED 照明 B から放射された雑音の APD の測定結果

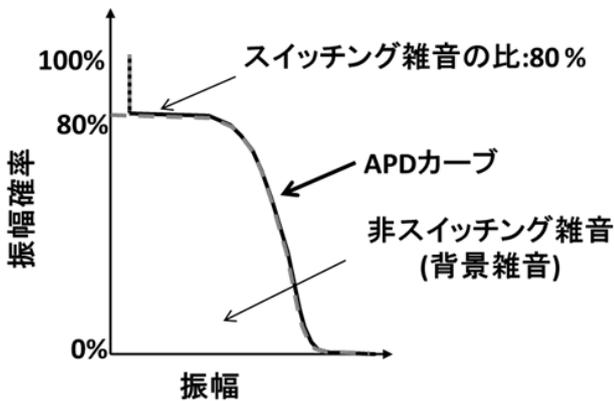


図 16 LED 照明 B から放射された雑音の APD カーブ

れる。一つはスイッチングノイズによるもので、もう一つはバックグラウンドノイズによるものである。図 16 に示すように、雑音の 80% はスイッチングノイズに起因するものである。この値は、時間に対する雑音の出現周期の割合と等しい。したがって、APD の結果を用いて、LED 照明の雑音の出現期間の割合を推定し、LED 照明 B の雑音の特性を評価することができる。LED 照明 B の APD (APD_{G_d}) は、以下のように定義できる [11]。

$$APD_{G_d}(x_a) = d \cdot \exp\left(-\frac{x_a^2}{2\sigma_{LED}^2}\right) + (1-d) \cdot \exp\left(-\frac{x_a^2}{2\sigma_{BG}^2}\right) \quad (3)$$

ここで、 x_a は雑音の瞬時電圧、 σ_{LED} は LED 雑音と背景雑音 (受信系のシステム雑音) の平均化電力、 σ_{BG} は背景雑音 (受信系のシステム雑音) の平均化電力、 d は LED 照明 B からの雑音の時間に対する出現期間の割合である。

図 17 は、LED 照明 B からの雑音の APD とガウス雑音の出現周期の割合を式 (3) に代入して得られる計算値と実測値を比較した結果を示している。図 17 に示すように、RBW が 1 kHz の場合、LED 照明の APD は計算結果とよく一致する。RBW が 100 kHz の場合

表 1 検討に使用した OFDM システムのパラメータ [15]

セグメント数	12 segments
キャリア変調方式	64 QAM
キャリア数	5184
キャリア間隔	0.992 kHz
シンボル長	1.008 ms
ガードインターバル	1/8
帯域幅	5.6 MHz
シンボル数	204 symbols/frame
伝送容量	3.651–23.234 Mbps

は、測定値と計算値が若干異なる。このことから、LED 照明 B のスイッチング周波数よりはるかに低い RBW では、LED 照明 B の特性はガウス雑音に近似できることがわかる。

4.2. LED から放射された雑音が地上デジタル放送に与える影響

4.2.1 OFDM (Orthogonal Frequency – Division Multiplexing) システム

地上デジタル放送は日本で最も普及している放送サービスの一つであり、この放送サービスは BST (Band Segmented Transmission) – OFDM 伝送システムを採用した ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting) ファミリーの一員である。地上デジタル放送の受信機の最小入力レベルは -67 dBm である [12]。地上デジタル放送は 470 ~ 770 MHz の周波数帯で UHF バンドを使用している。先ほど述べたようにこの帯域において LED 雑音が観測されるので、この雑音により、放送システムの品質が低下する可能性がある。そこで、地上波 ISDB – T 方式に基づく OFDM 伝送方式に対して LED 雑音の APD を用いて、雑音による BEP 特性への影響を検討した。OFDM 方式におけるサブキャリア変調の例として、64 QAM を使用している。この変調方

式は同じ電力の QPSK に比べると雑音の影響を受けやすいことが知られている [13][14]。上記の OFDM 伝送システムのより詳細な情報は、表 1 に示されている。

4.2.2 APD 測定結果からの BEP 推定

LED 照明から放射された雑音の影響を受けた OFDM システムの BEP 特性を、APD の測定結果から推定する。干渉を受けたシングルキャリアシステムの APD による BEP (BEP_{APD}) については、いくつかの理想化の下で最大シンボル誤り率から導出された BEP の近似表現式が知られている [10][13][14]。

$$BEP_{APD}(A) = \frac{1}{m} APD \left(\beta A \sqrt{\frac{1}{m}} \right) \quad (4)$$

ここで、 A はシングルキャリア信号の実効値振幅、 β は正規化最小シンボル間距離、 m は 1 シンボルあたりの送信ビット数である。式(4)に OFDM システムを適用するためには、APD の測定周波数と測定帯域幅を OFDM システムのサブキャリア周波数とキャリア間隔と同一にする必要がある。本研究では、OFDM システムのキャリア間隔と同じ 0.992 kHz の帯域幅で測定した APD の結果から OFDM システムの BEP 性能を推定した。

4.2.3 多チャンネル APD と BEP 測定システム

図 18 に多チャンネル APD 測定システムと BEP 測定システムを示す。図 18 (a) に示したように、多チャンネル APD 測定システムは、電磁環境研究室によって開発されたものである [16]。この APD 測定システムは、WLAN (Wireless Local Area Network) と DTV (Digital TV) のサブキャリア間隔に合わせて設計されている。DTV 用の APD 測定システムは、0.992 kHz のキャリア間隔で 8192 キャリアの APD を同時に測定することができる。図 18 (a) に示すように、TEM セルで LED 照明からの雑音を抽出し、スペクトラムアナライザに入力する。スペクトラムアナライザでは、RF 信号を IF 信号にダウンコンバートし、APD 測定処理ボードに入力し、A/D コンバータでデジタル信号 (I-Q 信号) に変換する。ベースバンドの I-Q 信号は、多チャンネル APD の計算に使用される。最後に、これらの APD データをパーソナルコンピュータに保存する。雑音電力は、スペクトラムアナライザに置き換えたパワーメーターで測定する。図 18 (b) は、OFDM システムの BEP 特性を求めるための測定システムの概略図を示す。TEM セルからの LED 雑音と DVB-T デジタルエキサイタ (信号源) からの OFDM 信号は、カプラを介して BEP 測定システムに接続される。このカプラは、OFDM 信号と LED 照明から放射される雑音を結合するために使用される。OFDM 信号と雑音の

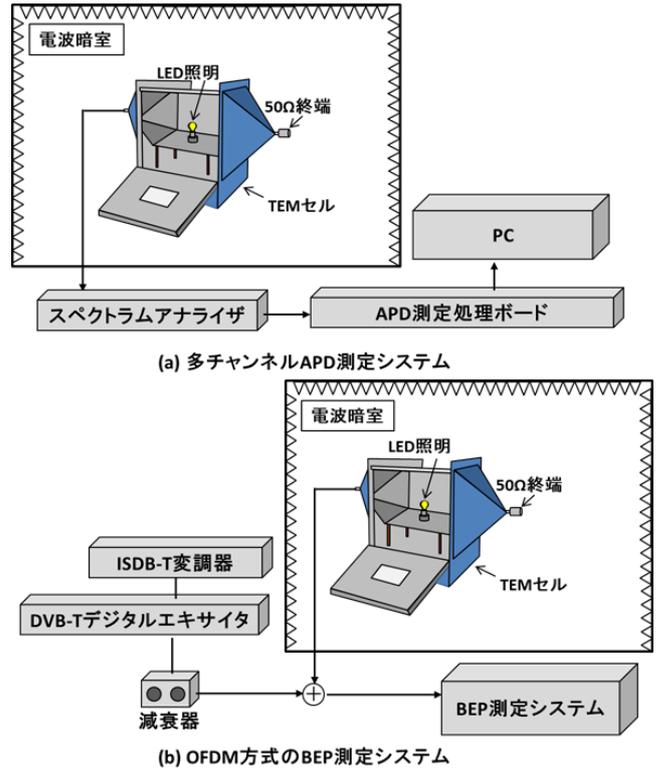


図 18 測定システム

電力は、BEP 測定システムの入力端にパワーメーターを接続して測定される。

4.2.4 LED 照明から放射される雑音を印加した OFDM システムの BEP 特性

LED 照明からの雑音と OFDM システムの BEP 特性への影響との関係を、式 (4) を用いて放送システムがない場合 (LED 照明からの雑音) の APD から推定する。本研究では、多チャンネル APD 測定装置を用いて、キャリア間隔 0.992 kHz で 5184 チャンネルを同時に測定している。 $N=5184$ チャンネルの BEP 特性の平均は、次式で定義される。

$$EP_{AVE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (BEP_{APD-(i)}(A)) \quad (5)$$

ここで、 $BEP_{APD-(i)}$ はサブチャンネル i の APD 結果から推定される BEP 特性、 N はサブチャンネル数である、 A はサブキャリアあたりの信号実効値振幅である。測定の有効性を確認するため、推定した BEP を LED 雑音とガウス雑音を印加した場合の BEP の実測値と比較した。LED 雑音の電力は、LED 照明 A で -39.9 dBm、LED 照明 B で -38.3 dBm である。図 19 (a) と図 19 (b) は、LED 照明 A と LED 照明 B の推定結果と実測結果を比較した結果で、縦軸は BEP、横軸は OFDM 信号の rms 振幅である。図 19 (a) に示すように、APD の数値による推定結果は、LED 照明 A の雑音を受けた

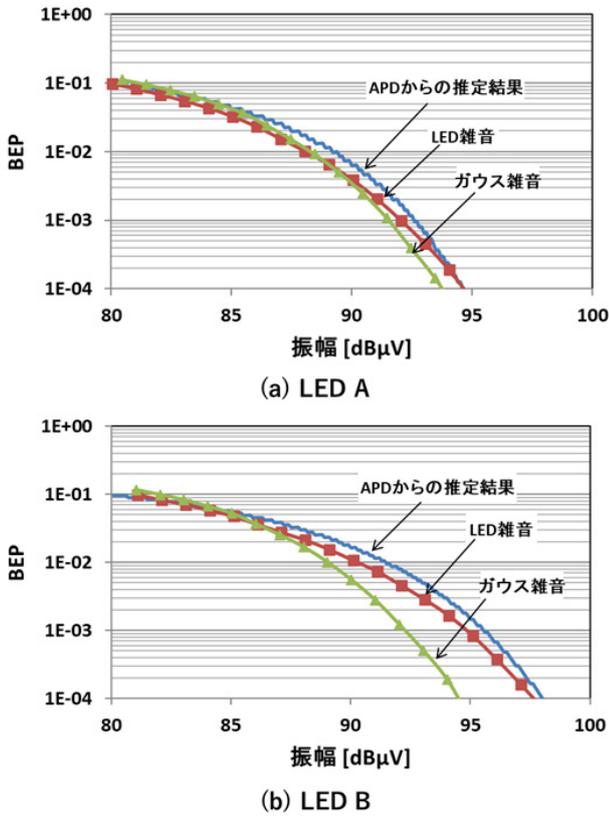


図 19 OFDM 方式の BEP 特性

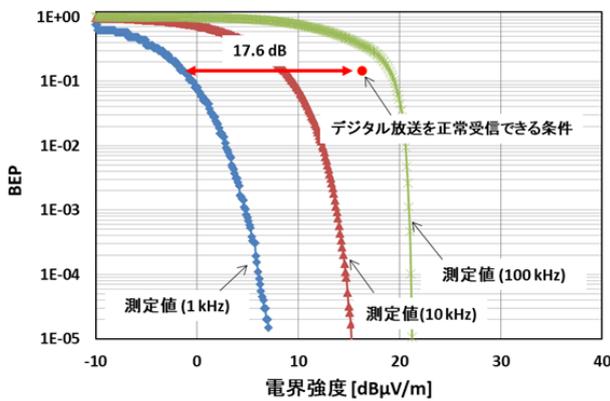


図 20 APD 測定結果と地上デジタル放送の正常受信条件

実測結果とよく一致しており、推定結果と実測結果の最大差は 1 dB 未満である。したがって、LED 雑音が発生的な雑音である場合の BEP 測定には、APD による推定結果が同様に有効であることがわかる。また、ガウス雑音を受けた推定結果と実測結果を比較した。この比較による BEP は、良好な一致を示すことから、LED 照明 A からの雑音の影響とガウス雑音の影響とほぼ同様である。図 19 (b) に示すように、APD の数値による推定結果と、断続的に発生する LED 照明 B の雑音を受けた実測結果とは、良好な一致が得られている。しかし、ガウスによる推定結果と実測結果との間

には、最大 3 dB の差が生じている。実測 APD の特性は式 (3) と同様であるが、LED 照明 B の推定 BEP の傾きはガウス雑音の場合よりも小さくなっている。よって、LED 照明 B の雑音の影響は、同じ電力では連続ガウス雑音より大きくなる。これらの結果から、LED 照明の雑音が OFDM システムに与える影響は、LED 雑音が連続的・間欠的いずれの場合であっても、APD から推定することができる。

5 地上デジタル放送の受信保護条件

APD による電磁雑音の測定結果と BEP 相関によって、電磁雑音が無線通信・放送システムの品質劣化が許容限度内となる条件を求められることが知られている。文献 [17] によれば、地上デジタル放送の動画を正しく再生するために必要な BEP は、誤り訂正前で 2.4×10^{-2} とされている。APD と BEP の関係式 [17] を用いると、地上デジタル放送を正常に受信するための条件は以下のように表される。

$$2.4 \times 10^{-2} > \frac{1}{6} \text{APD}(A [\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}] - 16.2 [\text{dB}]) \quad (6)$$

ここで、 A は地上デジタル放送の受信電界強度を表す。中電界地域の地上デジタル放送の受信を想定すると、帯域幅 5.6 MHz における地上デジタル放送の受信電界強度 ($A_{5.6\text{MHz}}$) は約 70 dBμV/m であり、帯域幅 1 kHz あたりの受信電界強度 ($A_{1\text{kHz}}$) は 32.5 dBμV/m である。 $A_{1\text{kHz}}$ を式 (6) に代入すると、地上デジタル放送を正常に受信できる条件は $1.44 \times 10^{-1} > \text{APD} (16.3 [\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}])$ となる。この条件が示す境界点 (横軸は帯域幅 1 kHz あたりの雑音振幅実効値) を、図 20 に赤印でプロットする。帯域幅 1 kHz で測定した電磁雑音の APD 測定結果に基づき、この境界点を超える電界強度の電磁雑音からは、地上デジタル放送の受信を保護することはできないと考えられる。図 20 において、境界点を、測定帯域幅 1 kHz (=サブキャリア間隔) で測定した LED 雑音の APD 測定結果と比較すると、確率の境界値 (1.44×10^{-1}) 上において電界強度の境界値を 17.6 dB 下回ることから、この LED 照明の電界強度マージンは 17.6 dB と考えることができる。すなわち、LED の雑音の上限値を地上デジタル放送を正常に受信するための基準とする場合、APD カーブ (図 20) で示される値に対して、電界強度方向に +17.6 dB シフトした値が許容範囲となる。CISPR 規格では RBW と検波応答の両方が指定されており、一般には異なる重み付け検波器の応答は APD だけからは推定できない。しかし検波器が同じ場合は、異なる RBW による APD が得られていれば上記の手法を用いることで、異なる RBW で

測定された雑音に対して地上デジタル放送の受信障害を保護するための雑音の上限値を求めることができる。例えば、RBW が 100 kHz の条件下で、LED の雑音の peak 値の上限(10 メートル離れた場合の peak 検波値)を推定する方法を説明する。RBW が 100 kHz の場合、LED の雑音の peak 値は、100 kHz で APD カーブの 10^{-5} にほぼ等しく、21.2 dB μ V/m である。地上デジタル放送を正常受信するための LED の雑音 peak 値は、先述のように、100 kHz の APD カーブが示す値から +17.6 dB のマージンを持つため、RBW=100 kHz における地上デジタル放送の受信障害を保護するための LED 雑音の上限値は、21.2 + 17.6 = 38.8 dB μ V/m (peak 検波値：距離 10 m) と考えることができる。

6 終わりに

省エネ機器の普及とともに、高齢化社会における医療や介護の重要性が増している。スマートコミュニティに接続された省エネ機器から発生する電磁雑音は、通信・放送機器だけでなく、医療機器など人命に関わる装置の誤動作を引き起こす可能性があり、深刻な状況を招く可能性がある。電磁環境研究室では、適切な電磁環境の構築と維持を目指し、将来の通信技術の発展と社会の要請に応えるために、電磁雑音の発生メカニズムの解析や評価技術の研究開発を進めている。また、これらの問題を未然に防止するための技術開発にも取り組んでいる。特に、5G (5th Generation：第5世代移動通信システム)の普及や Beyond 5G (次世代無線通信システム)の研究開発の進展に伴い、多数の電気電子機器(雑音源)と無線通信端末が混在する状況において、電磁干渉を未然に防止するための電磁雑音評価技術の検討にも取り組んでいきたいと考えている。

【参考文献】

- 1 吳 奕鋒, "電磁雑音評価 干渉防ぐ," 日刊工業新聞, Aug. 31, 2021.
- 2 吳 奕鋒, "省エネ家電の EMC (その2) - 光強度の時系列変化による LED 照明からの放射雑音の識別法 -," 電波技術協会報 FORN, no.310, pp.26-29, May, 2016.
- 3 吳 奕鋒, "省エネ家電の EMC (その3) - ライティングダクトレールからの漏洩磁界の測定及び地上デジタル放送受信を保護するための条件の検討 -," 電波技術協会報 FORN, no.311, pp.30-33, July, 2016.
- 4 <https://www.kankyo-business.jp/dictionary/000181.php>
- 5 I. Wu, H. Ohta, K. Gotoh, S. Ishigami, Y. Matsumoto, "Characteristics of Radiation Noise from an LED Lamp and Its Effect on the BER Performance of an OFDM System for DTTB," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.56, no.1, pp.132-142, 2014.
- 6 吳 奕鋒, 太田 弘毅, 石上 忍, 松本 泰, "LED 電球からの不要放射による通信・放送への影響に関する基礎的検討", 電子情報通信学会環境電磁工学研究会 EMCJ2011-83, pp.11-16, Oct. 2011.
- 7 I. Wu, S. Ishigami, Y. Matsumoto, "A method to identify the noise from LED light bulbs by comparing the time domain characteristics of impulsive electromagnetic noise and light emission", IEICE Communications Express, vol.1 no.5, pp.184-189, 2012.
- 8 Y. Matsumoto, I. Wu, K. Gotoh, S. Ishigami, "Measurement and modeling of electromagnetic noise from LED light bulbs," Electromagnetic Compat-

ibility Magazine, IEEE, vol.2, no.4, pp.58-66, 2013.

- 9 吳 奕鋒, 石上 忍, 松本 泰, "LED 照明を装着したダクトレールからの漏洩磁界測定," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-4-24, Sept. 2013.
- 10 K. Gotoh, S. Ishigami, Y. Matsumoto, T. Shinozuka and Y. Yamanaka, "Investigation of EMC in Wireless Communication Systems: Electromagnetic disturbance measurement by using amplitude probability distribution for protecting digital wireless communication systems," J. Natl. Inst. Inform. Commun. Technol., vol.53, no.1, pp.81-90, 2006.
- 11 K. S. Vastola, "Threshold detection in narrow-band non-Gaussian noise," IEEE Trans. Commun., vol.COM-32, no.2, pp.134-139, Feb. 1984.
- 12 Receiver for Digital Broadcasting, ARIB Standard B-21 ver.4.6, 2007.
- 13 K. Wiklundh, "Relation between the amplitude probability distribution of an interfering signal and its impact on digital radio services," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.48, no.3, pp.537-544, Aug. 2006.
- 14 Y. Matsumoto, "On the relation between the amplitude probability distribution of noise and bit error probability," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol.49, no.3, pp.940-941, Nov. 2007.
- 15 Transmission system for digital terrestrial television broadcasting, ARIB STD-B31 Ver.1.5, July 2003.
- 16 K. Gotoh and Y. Matsumoto, "A multi-channel FFT-based amplitude probability distribution measuring instrument," Proc. EMC Eur. 2010, pp.46-51.
- 17 I. Wu, S. Ishigami and, Y. Matsumoto: "Evaluation of Radiation Mechanism of LED Noise and Its Impact on Communication Quality of Digital Terrestrial Television Broadcasting," APEMC2015, 2015.



吳 奕鋒 (うー いふおん)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
主任研究員
博士(工学)
電磁雑音の測定・評価、電磁干渉評価
【受賞歴】
2020年 令和2年度文部科学大臣表彰
科学技術賞



松本 泰 (まつもと やすし)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
研究員
博士(工学)
電磁雑音の計測・モデリング、干渉評価法
【受賞歴】
2020年 令和2年度文部科学大臣表彰
科学技術賞

2011年 IEEE Richard Schulz Transactions
Prize Paper Award
2009年 IEICE Communications Society
Best Paper Award



後藤 薫 (ごとう かおる)

電磁波研究所
電磁波標準研究センター
電磁環境研究室
標準較正グループ
グループリーダー
博士(工学)
電磁雑音の統計量、電磁干渉評価法
【受賞歴】
2020年 令和2年度文部科学大臣表彰
科学技術賞

2011年 IEEE Richard Schulz Transactions
Prize Paper Award