

4 無線通信システムのEMC

4 Investigation of EMC in Wireless Communication Systems

4-1 妨害電磁波の振幅確率分布測定とデジタル無線通信の保護

4-1 Electromagnetic Disturbance Measurement by Using Amplitude Probability Distribution for Protecting Digital Wireless Communication Systems

後藤 薫 石上 忍 松本 泰 篠塚 隆 山中幸雄

GOTOH Kaoru, ISHIGAMI Shinobu, MATSUMOTO Yasushi, SHINOZUKA Takashi, and YAMANAKA Yukio

要旨

国際無線障害特別委員会(CISPR)の規格に適合する妨害波測定装置が内蔵すべき測定機能(検波器)の一つとして、準尖頭値検波がある。これは、電磁妨害波の検波出力指示レベルと、その電磁妨害波がアナログラジオへ与える障害の度合いが高い相関を持つように考えられた検波器であり、周波数9 kHz から 1000 MHz の妨害波測定に使用される。しかし、近年の電子機器の小型化・高速化によって、これらの電子機器から放射される電磁妨害波は高周波化・広帯域化の傾向にあり、急速に普及しつつあるデジタル無線通信サービスを電磁妨害波から保護するためには、1 GHz 以上の周波数における新しい妨害波測定法の国際規格化が重要な課題となっている。

振幅確率分布(APD)測定は、NICTを主体とする日本からの提案により、その妨害波測定指示値が被干渉デジタル無線通信システムの通信劣化との間に高相関を持つ測定法として、CISPRでの国際規格化が進められている。本稿では、APD測定における最近の研究動向と本測定法の具体的な利用例を紹介する。

Digital wireless communication services spread rapidly in recent decades, and RF disturbance emitted from electric devices has higher frequency and wider bandwidth because of large increasing in clock speed of recent electric devices. However, the disturbance measurement methods specified in the international special committee on radio interference (CISPR) is unable to follow such situation at the present.

Amplitude probability distribution (APD) measurement, which has been studied at CISPR as a new international standard, is known by the works of NICT that APD readings of disturbance correlate well with communication quality degradation of victim digital wireless communication systems. We report the latest findings in that studies and the situation of the international standardization, and also their application.

[キーワード]

妨害波測定, 振幅確率分布(APD), BER, 電子レンジ, 内部干渉雑音

Disturbance measurement, Amplitude Probability Distribution, Bit error rate, Microwave ovens, Internal interference noise

1 まえがき

家電製品等の電気・電子機器の放射電磁波(電磁妨害波)が、その他の機器や周辺の放送・通信サービスへ妨害を与えることは広く知られるところであり、これまでも、与干渉側・被干渉側の両方から様々な対策が講じられてきた[1]。電磁妨害波の規制に関しては、国際無線障害特別委員会(CISPR)により、電磁妨害波測定装置の仕様[2]や、電気・電子機器に対する電磁妨害波の規制値等(例えば[3]など)が設けられている。CISPRにより規定される電磁妨害波測定装置には、9 kHzから1000 MHzの周波数について、尖頭値検波、平均値検波、実効値検波、準尖頭値検波の四つの検波機能が搭載されている。特に準尖頭値検波の特性は、電磁妨害波測定指示値と、その妨害波がAMラジオへ与える障害の度合いが高相関となるように決められており、アナログ放送・通信の保護に関しては非常に有用である。しかし近年、電気・電子機器の小型化・高速デジタル化によって、それらの機器から放射される電磁妨害波の高周波・広帯域化が進む上に、主に1 GHz以上の周波数を利用するデジタル無線通信・放送サービスが急速に発展・普及し、デジタルシステムの保護という新たな要求が生じた。電磁環境がより複雑化する中、デジタル無線通信システム保護の観点から1 GHz以上の電磁妨害波測定法を検討し、国際規格として策定する必要性は高い。

ところで、振幅確率分布(Amplitude Probability Distribution: APD)測定は、古くは空電雑音等のインパルス雑音測定に使用された測定法であるが、この測定法によって得られる電磁妨害波測定値が、被干渉デジタル無線通信システムの通信品質劣化との間に高い相関を持つということが、NICTによる以前からの研究により明らかになっている。具体的には、電子レンジから放射される電磁妨害波の規制を意図して、そのAPD測定結果と、妨害を受けるPHSシステムのBER劣化特性の相関が実験的に確認された報告がある[4]。同時に、汎用APD測定装置の開発も進められた[5]等。

これらの実験的根拠及び測定装置の実現性の高さに基づき、APD測定は、1 GHz以上の妨害波測定法としてCISPRへ提案され、その国際規格化が審議されている。既にAPD測定装置の仕様

については、CISPR参加各国の投票・承認を終えて、国際規格発行の最終段階に入っている[6]。審議に当たり我々は、電磁妨害波APD測定結果と被干渉システムBER劣化特性の関係式を検討し、その検証実験を行うほか[7][8]、APD測定を用いたISM機器の放射妨害波規制方法とその許容値を検討している[9]。また、APD測定は国際規格化のみならず産業界でも注目されており、電子機器内のモジュールのEMC評価をAPD測定で行うという試みもあり、これらの技術開発は太陽誘電株式会社と共同で進めている[10]。以降は、APD測定の概要、与干渉妨害波のAPD測定結果と被干渉システムのBER劣化との相関関係、APD測定の利用例について順に述べる。

2 振幅確率分布測定

APDは、「妨害波の包絡線が閾値を超える時間確率」として定義される。図1にその概要を表す。縦軸は妨害波包絡線の強度を、横軸は時間を示す。 W_i は妨害波包絡線 $x(t)$ が閾値 x_k を超える区間を指しており、 n は $x(t)$ が x_k を超える回数を示す。 T_0 は総測定時間である。この時、 $x(t)$ が x_k を超える時間確率 $APD(x_k)$ は次式で表される。

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

閾値を変数 x とした場合の時間確率の分布 $APD(x)$ を、一般に、振幅確率分布と呼び、図2にその表示例を示す。横軸は閾値とした妨害波包絡線強度を、縦軸は式(1)の時間確率を示している。また、その定義より、APDが $x(t)$ の累積分布 $F(x)$ で表されることは明らかである。

$$\begin{aligned} APD(x_i) &= \text{Prob}(x_i < x \leq \infty) \\ &= 1 - \text{Prob}(-\infty < x \leq x_i) \\ &= 1 - F(x_i) \end{aligned} \quad (2)$$

APD測定器は、妨害波測定器(一般に、EMIレシーバもしくはスペクトラムアナライザ)をゼロスパンに設定した時のビデオ信号を利用して電磁妨害波包絡線を取得し、A/DコンバータとRAMを搭載する専用の測定ユニットによってリアルタイムにAPDを測定する。APD測定装置のプロトタイプ概観を図3に、その構成を図4に示す。APD測定装置の仕様は[6]に示されており、[1]の改訂版として発行される予定である。

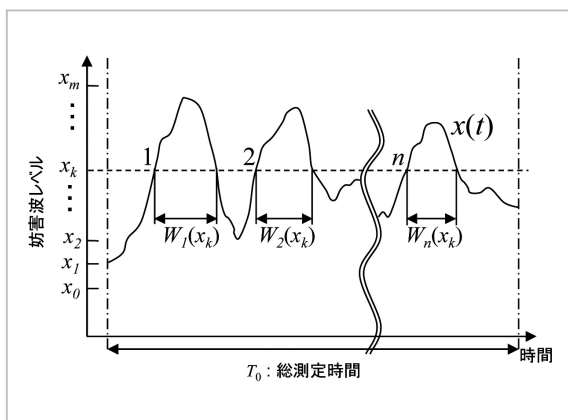


図1 APDの概要

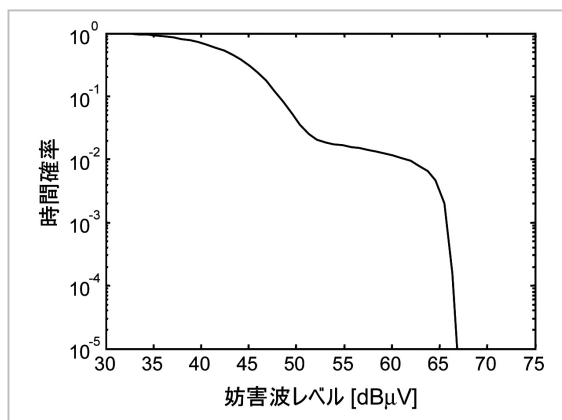


図2 振幅確率分布の例

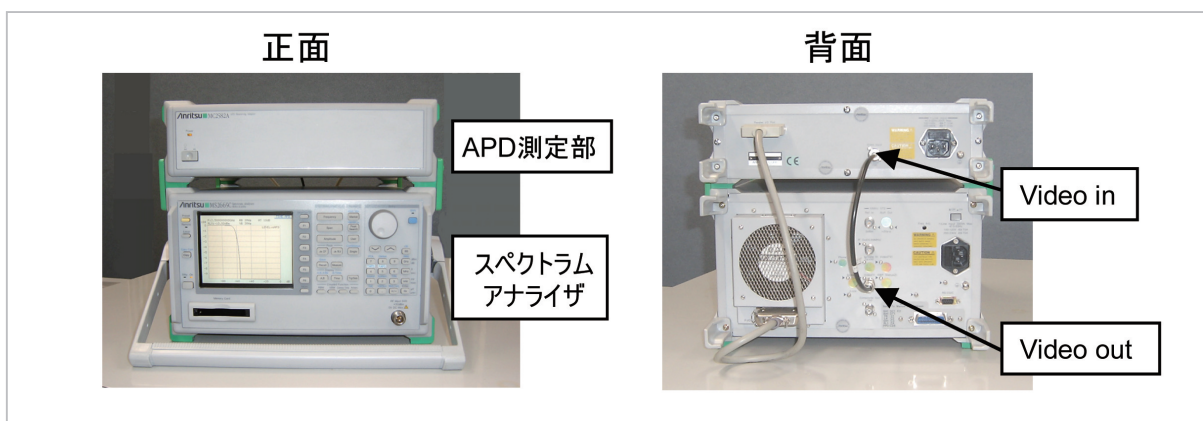


図3 APD測定装置概観

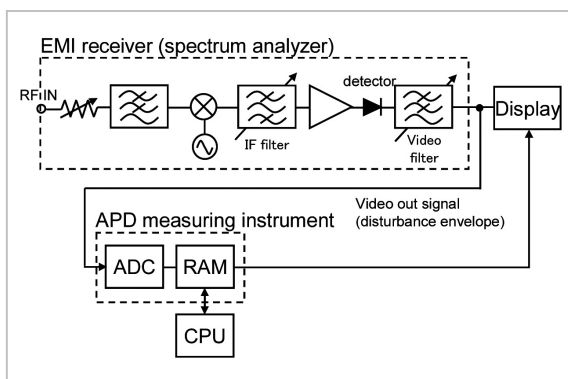


図4 APD測定装置の構成

3 妨害波の振幅確率分布と被干渉デジタル無線通信システムの品質劣化との関係

図5に概略を示すように、電子機器からの放射妨害波によってデジタル無線通信システムが干渉を受けている状況を想定する。例としてBPSK変調方式の被干渉システムを考えると、その信号空

間は図6のように、例えばシンボル(-1)に対しては信号点 $(-\sqrt{E_b}, 0)$ 、シンボル(1)に対しては信号点 $(+\sqrt{E_b}, 0)$ が、それぞれ対応している。ここで E_b はビット当たりの信号エネルギーである。図6はシンボル(-1)の受信時に電磁妨害波の干渉を受けた状況を示している。ここで最悪ケースとして、シンボル判定時点(整合フィルタ出力)での電磁妨害波の位相は、受信しているシンボルから信号間距離が最短の他のシンボルに向かう方向(シンボルを最も誤らせやすい方向)を向いていると考え、妨害波が最小信号間距離の半分 $(\beta\sqrt{E_b})$ を超える場合にシンボルが誤るとする。したがってシンボル誤り率 P_s は、整合フィルタ出力における妨害波 x_f が最小信号間距離の1/2を超える確率に一致する。

$$P_s = \text{Prob}(\beta\sqrt{E_b} < x_f) \quad (3a)$$

ただし β はシンボル間最小距離の1/2を $\sqrt{E_b}$ で正規化した量である。次に、シンボル誤り当た

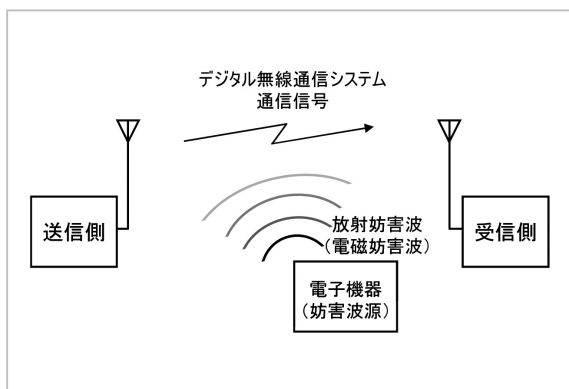


図5 電子機器から放射される電磁妨害波と被干渉デジタル無線通信システム

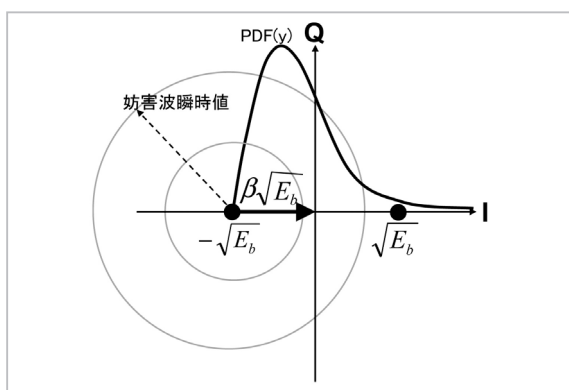


図6 通信信号空間における妨害波の様子 (BPSK の場合)

りの誤りビット数を $1/P = \alpha$ と近似する。ここで P は 1 シンボルで伝送されるビット数である。

$$BER = \alpha \text{Prob}(\beta\sqrt{E_b} < x_f) \quad (3b)$$

式(3b)は、整合フィルタ出力における信号及び妨害波を、エネルギーの 1/2 乗の単位で比較している。一方、実際の APD 測定器は整合フィルタと同じ帯域幅のフィルタの出力における妨害波振幅を計測するが、計測単位は振幅(電力の 1/2 乗)である。したがって、式(3b)の信号、妨害波振幅のそれぞれにビットレート $R = 1/\alpha T_s$ を乗じて物理量を振幅に変換する。 α は 1 シンボル当たりのビット数の逆数、 T_s はシンボル長である。

$$\begin{aligned} BER &= \alpha \text{Prob}(\beta\sqrt{E_b R} < x_f \sqrt{R}) \\ &= \alpha \text{Prob}(\beta\sqrt{P_s} < x_f / \sqrt{\alpha T_s}) \\ &= \alpha \text{Prob}(\sqrt{\alpha\beta^2} \sqrt{P_s} < \sqrt{x_f^2 / T_s}) \end{aligned} \quad (3c)$$

ここで P_s は信号電力であり、信号振幅(実効値)

A は $P_s^{1/2}$ である。拡散係数 SF の直接スペクトラム拡散システムの場合、受信側の逆拡散過程において妨害波電力は平均的に $1/SF$ 倍に減少する。一方、APD 計測の対象である受信帯域制限された妨害波実効値振幅 x は $\sqrt{x_f^2 / T_s}$ で表される。したがって、電磁妨害波の APD と被干渉デジタル無線通信システムの BER 劣化の関係は以下の式で表される [7]。

$$\begin{aligned} BER &= \alpha \text{Prob}(A\sqrt{\alpha\beta^2 \cdot SF} < x) \\ &= \alpha \text{APD}(A\sqrt{\alpha\beta^2 \cdot SF}) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、式(3)の成立には以下の仮定が必要である。

- (1) 電磁妨害波の位相はデジタル無線通信のシンボルを最も誤らせやすい方向である。
- (2) APD の測定帯域幅は、被干渉システムの通信帯域幅に等しい。
- (3) APD 測定装置の内部雑音レベルは、被干渉システム受信機の内部雑音レベルに等しい。
- (4) 被干渉システムの受信側は同期検波である。

式(3)の検証実験を図7に示す実験構成で行った。電磁妨害波は、キャリア周波数 $f_c = 2.1$ GHz のパルス変調信号として、信号発生器(SG2)より生成する。被干渉システムは W-CDMA (キャリア周波数 $f_c = 2.1$ GHz、 $SF = 4$) とし、信号発生器(SG1)で生成された W-CDMA 送信信号へ電磁妨害波を付加する。干渉を受けた信号は、ベクトルシグナルアナライザ(VSA)にて変調解析(同期検波)され、BER が得られる。一方、電磁妨害波の APD 測定時には W-CDMA の通信系を切り離し、妨害波測定用のスペクトラムアナライザへ電磁妨害波信号を入力する。スペクトルアナライザの測定帯域当たりの内部雑音は、BER 測定時の VSA の測定帯域当たりの内部雑音に等しくなるようにあらかじめ調整されている。また、1 GHz 以上の妨害波測定におけるスペクトラムアナライザの分解能帯域幅(Resolution band width: RBW)は 1 MHz と定められているため [1]、ここではそれに従う。つまり、先の仮定(2)は満たされていない。

図8に電磁妨害波の APD 測定結果を、図9に被干渉 W-CDMA システムの BER 劣化測定結果を示す。図9の BER 劣化測定結果には、式(3)により APD 測定結果から BER 推定を行った結果を、実線で重ねて示している。電磁妨害波のパ

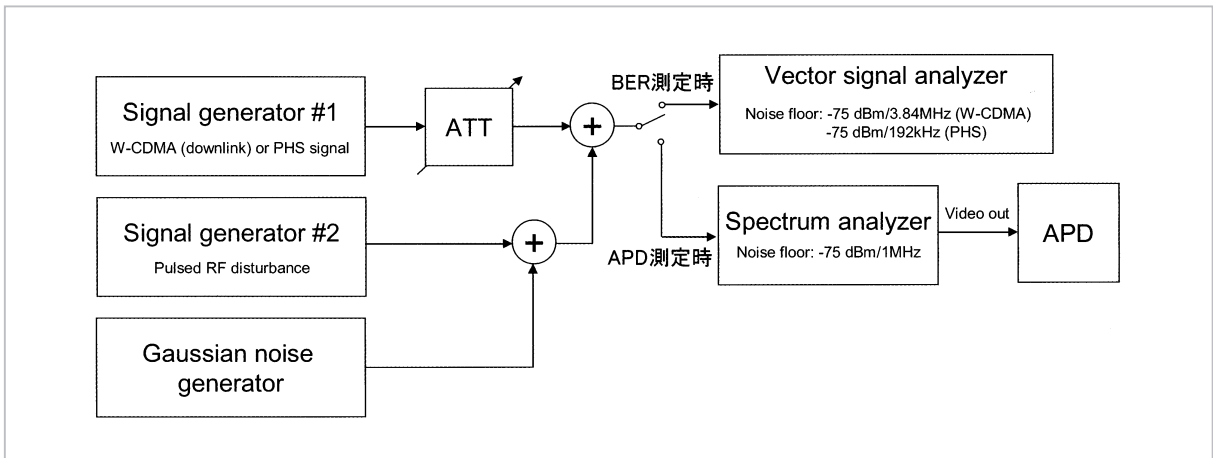


図7 電磁妨害波の APD と被干渉デジタル無線通信システムの BER 劣化との相関理論式の検証実験構成

ルス幅を $W_p = 100 \mu\text{s}$ とし、Duty 比を 40 % (○)、10 % (▽)、4 % (△)、1 % (◇)、0.4 % (□)、0.1 % (☆) と変化させた。式 (3) による推定が最悪位相条件下での推定であることを考慮すれば、BER 測定実験結果に比較して APD 測定結果から BER 劣化を推定した結果は妥当であり、式 (3) によって電磁妨害波の APD 測定結果と、被干渉デジタル無線通信システムの BER 劣化は、一意に関連付けられることが分かる。より厳密な検証を行うためには、W-CDMA のみでなく、他の通信方式や、実際の電磁妨害波での検証を行う必要がある。

4 振幅確率分布測定の応用 (1) (ISM 機器から放射される電磁妨害波の規制)

前節にて、電磁妨害波の APD 測定結果と被干

渉システムの BER 劣化の相関性が示された。その特性に基づく APD 測定の応用例として、ISM (Industry, science and medical) 機器より放射される電磁妨害波の規制方法を紹介する。

ISM 機器の放射電磁妨害波に関する規制は、CISPR11 [3] にて定められている。具体的には、RWB=1 MHz、VBW (Video band width) ≥ 1 MHz の尖頭値検波による測定と、RWB=1 MHz、VBW=10 Hz の重み付け (対数平均) 測定を行うこととされており、それらに対する周波数帯域別の許容値が決められている。ところで、一般に普及した ISM 機器の代表的なものとしては電子レンジが挙げられるが、電子レンジの放射する電磁妨害波は不規則なパルス性の雑音であり、尖頭値測定と重み付け測定では妨害波の特性を十分に把握できない。例えば、被測定信号の Duty 比が低い場合、尖頭値測定は、妨害波が被干渉システムへ与える影響を過大評価する。重み付け測定は逆

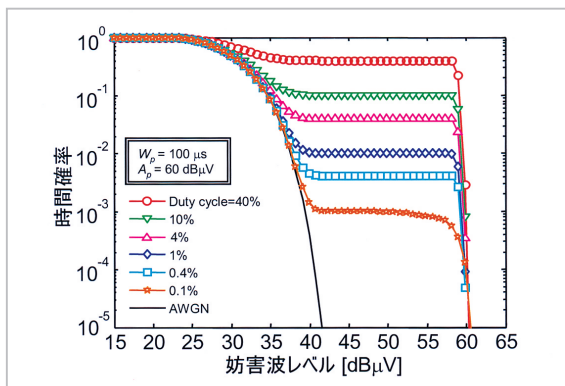


図8 電磁妨害波 (パルス変調) の APD 測定結果

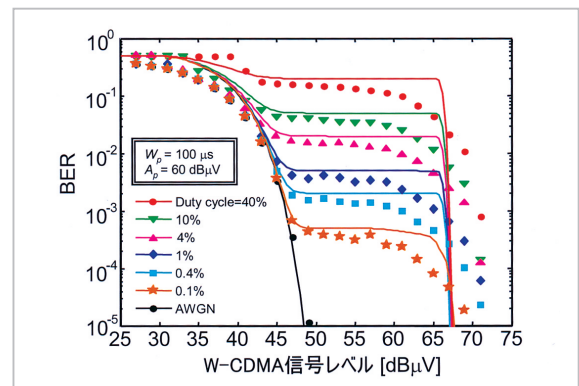


図9 被干渉 W-CDMA システムの BER 劣化測定結果及び推定結果

に、過小評価を与える傾向にある。さらに、重み付け測定の測定値は対数平均値であるため、その物理的意味をとらえにくい上に、妨害波測定器の内部雑音に大きく影響されるなどの問題もある。

一方、電磁妨害波の統計的な振幅情報を含み、被干渉システムの BER 劣化と相関のある測定値を与える APD 測定は、ISM 機器の電磁妨害波規制において有効な測定法であると考えられる。ここで問題となるのは、APD 測定による ISM 機器の電磁妨害波の許容値をいかに定めるかであり、これには二つの考え方があり、一つは、周辺のデジタル無線通信受信端末の保護の観点からの許容値設定であり、もう一つは、現行の尖頭値検波による測定や重み付け測定の許容値との整合性といった観点からの許容値設定である。これら両方の視点からの ISM 機器放射妨害波の APD 許容値を検討する。

まず、式(3)を基に、デジタル無線通信受信端末に要求される受信感度から APD 許容値を定める。ここでは例として、W-CDMA 及び PHS の受信端末を取り上げる。それぞれのシステムの仕様、式(3)のパラメータである α と β の値及び受信端末に要求される受信感度を表 1 に示す[11][12]。

表1 W-CDMA と PHS の仕様

	変調方式	α	β	伝送速度	通信帯域幅	アンテナゲイン	受信機の最小規定感度	
W-CDMA Measurement channel	QPSK	0.5	1	12.2 kbps	3.84 MHz	0 dBi	BER < 10 ⁻³	-106.7 dBm / 3.84 MHz
PHS	$\pi/4$ -shifted DPSK	0.5	0.54	384 kbps	288 kHz	4 dBi	BER < 10 ⁻²	16 dBμV

受信端末の要求感度を満足する電磁妨害波の程度を、式(3)より導かれる次式により、APD 上のある 1 点として決めることができる。

$$[\text{Electric field strength, probability}]_{\text{APD_required}} = \left[FL_s \sqrt{\alpha\beta^2 \cdot SF}, \frac{BER_r}{\alpha} \right] \quad (4)$$

ここで、 F はアンテナ係数、 L_s は受信機の要求感度 (BER_r) を規定する通信信号のレベルである。W-CDMA、PHS の両システムにおいて式(4)により算出された点を図 10 に★で示す。

一方、例として 1 GHz から 2.3 GHz の周波数における現行の許容値[3]を表 2 に示す。

表2 電子レンジの放射妨害波許容値 (1~2.3 GHz、最大放射方向、@3 m)

尖頭値測定	92 dBμV/m
重み付け測定	60 dBμV/m

APD 上におけるこれらの許容値の表示は図 10 内の 2 本の点線による。電子レンジからの放射がこれらの許容値よりも大きい場合(図中灰色の領域)は、適合試験をパスできない。

さらに、6 台の電子レンジの APD 測定結果を(測定距離 3 m、帯域幅 1 MHz)白マーカー付きの実線で示す。また、電子レンジをオフにした場合の APD 測定結果を黒マーカー付きの実線で示す。すべての電子レンジは、現行の許容値を超えていないことが確認される。一方、無線通信端末の最小感度要求を満足するように求めた点(★)は現実の放射レベルに対し非常に厳しく、APD 測定装置の内部雑音よりも更に低いレベルでの妨害波規制を要請している。しかし実際には、電子レンジと無線通信端末の離隔距離や、空間的・時間的利用密度等によるレベルマージンを設ける必要があると考えられる。W-CDMA、PHS 以外の主なデジタル無線通信サービスの受信端末最小感度も考慮した上での最終的な許容値の決定及び国際規格提案を今後の予定とする。

5 振幅確率分布測定の応用(2) (デジタル無線通信端末の内部雑音干渉問題)

APD 測定は国際規格の範囲にとどまらず、産業界でもその利用が検討されている。NICT と太陽誘電株式会社は、無線通信端末内の内部雑音干渉問題解決を目的とした新しい取組として、APD 測定を用いた端末内の電子部品の EMC 評価法の検討を共同で行っている。

内部雑音干渉とは、電子機器内で生じた電磁妨害波が自らの性能劣化を引き起こす現象であり、一般的には、雑音源と端末筐体もしくはその他の内部回路との電磁的結合が原因となる伝導性雑音が支配的であると考えられる。しかし無線通信端末に関しては、機器内部の電子部品の放射雑音を、

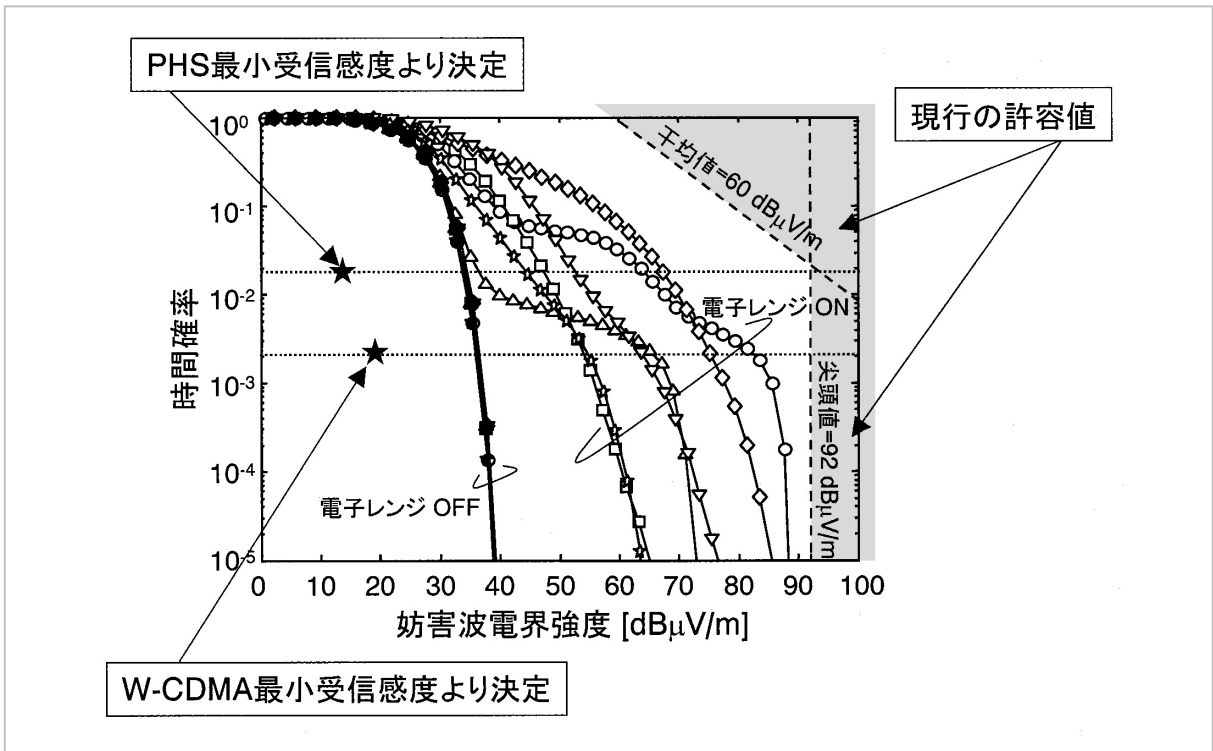


図10 ISM 機器から放射される電磁妨害波の APD 許容値検討

雑音源至近に位置する自機のアンテナが受信することによって BER 劣化が起こる可能性があり、このような問題を回避するためには、デジタル無線通信機器を構成する電子部品個別の EMC 評価が重要である。このような評価には、電子部品メーカーが自社製品の信頼性を保証し、他社製品との性能の差を明確にすることができるという産業上の利点もある。しかし一般に、電子部品からの電磁妨害波は比較的強度の小さい非定常雑音であるため、その測定は困難であり、適切な評価法は確立されていない。そこで、外来雑音の APD 測定結果から、被干渉デジタル無線通信端末の BER 劣化を推定できることが既に検証されていることにより、内部干渉雑音評価においても、端末の BER 劣化評価を含む雑音評価法としての APD 測定の有効性が期待される。

図 11 は、携帯電話内の LCD 制御基板上的放射雑音 2 次元分布である [13]。基板上でループアンテナを動かしながら、2 次元上の各点にて APD 測定を行い、時間確率が 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} となる放射雑音レベルを、それぞれカラーマップで表している。上図は LCD に静止画を表示させた場合、下図は動画を表示させた場合である。静止画表示

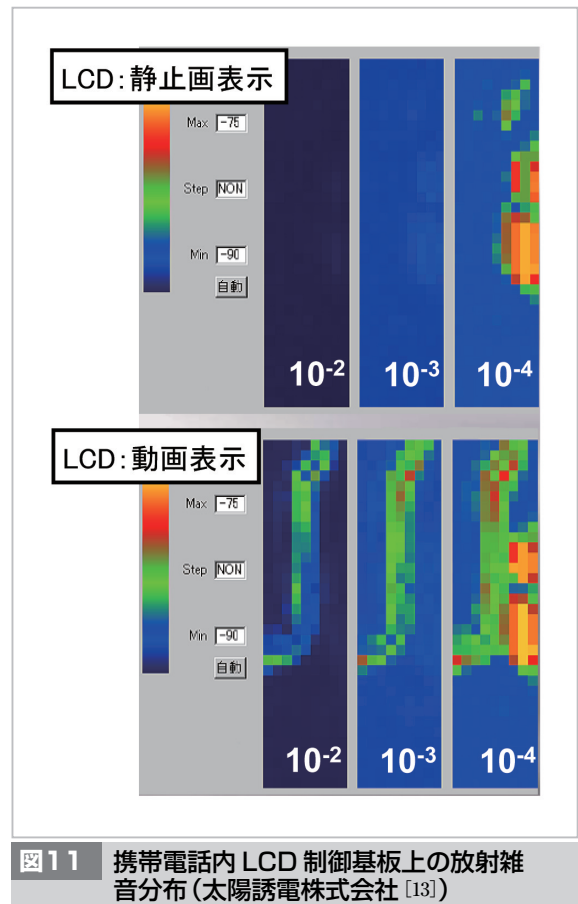


図 11 携帯電話内 LCD 制御基板上的放射雑音分布 (太陽誘電株式会社 [13])

時の測定結果にはほとんど現れない S 字状の雑音分布が、動画表示時の測定結果では明瞭に確認される。このような測定や結果表示は、雑音発生源の特定やその発生条件の考察を可能とし、内部回路の設計に有用であると考えられる。今後は、端末内部の電子部品からの放射雑音が、端末の通信品質にどの程度の影響を与えるのかを検討し、EMC 対策効果に直結する電子部品評価法の確立を目指す。

6 むすび

APD 測定法の最近の研究動向を紹介した。被

干渉デジタル無線通信システムの BER 劣化との相関関係が理論的・実験的に示される上、測定装置のプロトタイプも実現されており、APD 測定は 1 GHz 以上の周波数におけるデジタル無線通信時代の電磁妨害波測定法として有用であると結論付けられる。既に APD 測定装置の仕様は国際規格として発行予定であり、今後は特にデジタル無線通信・放送の保護という観点を含めて、電磁妨害波規制における APD 測定の利用手順やその許容値を策定する必要がある。また、産業上の利用可能性の検討は、APD 測定の利用を更に促すと考えられる。

参考文献

- 1 清水康敬, 杉浦 行, “電磁妨害波の基本と対策”, 電子情報通信学会, コロナ社, 1995.
- 2 CISPR Publication 16-1-1, "Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus".
- 3 CISPR Publication 11, "Industrial, scientific and medical (ISM) radio - frequency equipment – Electromagnetic disturbance characteristics – Limits and methods of measurement".
- 4 Y.Yamanaka and T.Shinozuka, "Measurement and estimation of BER degradation of PHS due to electromagnetic disturbances from microwave ovens", Electronics and Communications in Japan, pp.827-834, Nov.1998.
- 5 M.Uchino, Y.Hayakashi, T.Shinozuka, and R.Sato, "Development of low-cost high-resolution APD measuring equipment", Symp. Rec. of 1997 Int. Symp. on EMC, pp.253-256, Beijing, May 1997.
- 6 CISPR/A/579/FDIS, "Amendment to CISPR 16-1-1: Amplitude probability distribution (APD) specifications", 2005.
- 7 K.Gotoh, Y.Matsumoto, Y.Yamanaka, and T.Shinozuka, "APD Measurement for the Disturbance Evaluation Related to the Performance of Digital Communication Systems", IEICE Trans. on Communications, Vol.E88-B, No.8 pp.3235-3241, Aug. 2005.
- 8 CISPR/A/572/DTR, "Background material to Amplitude Probability Distribution (APD) Specifications", 2005.
- 9 K.Gotoh, S.Ishigami, Y.Matsumoto, Y.Yamanaka, and T.Shinozuka "Utilization of APD for measurements of radiation from microwave ovens", EMC Europe Workshop (Electromagnetic Compatibility of Wireless system), pp.175-178 Roma, Italy, Sep. 2005.
- 10 堀 圭吾, 風間 智, 後藤 薫, 松本 泰, “デジタル無線通信機器における内部干渉雑音の評価法”, エレクトロニクス実装学会講演大会, 2006.
- 11 3GPP TSG25.211, 3rd Generation Partnership Project, 2003.
- 12 RCR STD-28, ARIB, 2002
- 13 風間 智, 堀 圭吾, 蔦ヶ谷洋, “無線機器の EMC 対策に向けて電磁雑音の新たな評価手法を提案”, 日経エレクトロニクス No.919, pp.115-122, 2006.



ごとう かおり
後藤 薫
 無線通信部門 EMC 計測グループ研究員 博士(工学)
 環境電磁工学、無線通信



いしがみ しげお
右上 忍
 無線通信部門 EMC 計測グループ主任研究員 博士(工学)
 環境電磁工学



まつもと たかし
松本 泰
 無線通信部門通信システム EMC グループリーダー 博士(工学)
 環境電磁工学、無線通信



しづか たかし
篠塚 隆
 無線通信部門研究主管
 環境電磁工学



やまなか ゆきお
山中幸雄
 無線通信部門 EMC 計測グループリーダー
 EMC測定