

# 多チャンネル APD 測定装置の開発

Development of Multi-channel APD (Amplitude Probability Distribution) Measuring Apparatus

論手素直 Ronte Sunao, 荒川 悟 Arakawa Satoru

[要 旨] 周波数資源を稠密にかつ有効に利用する OFDM 信号方式, デジタル雑音, ワイヤレスセンサ信号などの統計的に非定常な電波を正確に測定する要求が生じている。この測定のために, 多チャンネルの振幅確率分布 (APD) 測定装置を開発した。本論文は, 32000 チャンネルまで測定できる多チャンネル同時測定の構成法, その主要特性, 多チャンネル測定法の測定例を挙げてその有効性を報告する。

[Summary] Multi-channel Amplitude Probability Distribution (APD) measuring equipment has been developed to meet the demand to precisely measure statistically non-stationary wireless signals such as OFDM signal invented by the recent age of effectively and intensively using the wireless frequencies, digital noises, and wireless sensing signals.etc. This paper reports its architecture, its main characteristics of 32000ch synchronous APD apparatus, and its effectiveness of the various APD measurements.

## 1 まえがき

電波利用の拡大やその有効利用がなされるに伴い, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) 通信方式のように周波数, 時間および振幅の稠密な利用が進行している。これらの信号の振る舞いを把握するためには, 信号を表現する固有軸として考えられる周波数軸, 時間軸および附随した振幅軸上の信号を同時に, かつ定量的に評価できる測定手法が必要で重要な課題となる。

測定対象信号としては様々な通信方式の人工的な電磁信号に限らず, 自然雑音, 人工雑音や内部雑音に分類される雑音, あるいはセンシング情報を担った無線信号などの統計的に非定常な信号が測定対象となる。

特に, 測定信号対象の振幅軸での測定評価という観点では, 信号の振幅変動の性質を有効に調べる手法として振幅確率分布 (APD: Amplitude Probability Distribution) 測定が知られている。APD とはある計測時間内において, 対象測定波形の瞬時振幅がある振幅閾値を超える時間率と定義されている<sup>(1)</sup>。数学的には対象測定信号の振幅変動を時間で径数した確率過程として捉え, その累積確率分布である振幅確率分布関数の補関数として定義される。

この APD 測定法に関して, EMC 測定分野では国際無線障害特別委員会 (CISPR: International Special Committee on Radio Interference) における 10 年間の議論の結果<sup>(2)</sup>, 電磁波の定量的な評価尺度の一つとして規格化されている。

APD 測定は古くから電磁波雑音を統計的に解析する手法として検討されている<sup>(3)(4)</sup>。また, APD 計測器の歴史も古く, 当初真空管回路によって実現され, 技術の進歩と共に, デジタル化<sup>(5)(6)(7)</sup>や多チャンネル (ch) 化<sup>(8)</sup>が実施され, 最近では, 無線周波数信号を測定する APD 測定関連の測定器として, スペクトラムアナライザ (SPA) の高周波アナログ回路部の周波数変換機能を利用し, その IF 帯域信号を A/D 変換後, デジタル信号処理技術を用いてオフライン処理で測定する事例<sup>(8)</sup>や SPA と一体化した 5 チャンネルリアルタイムの APD 測定器の開発例<sup>(9)</sup>, また, UWB (Ultra-Wide Bandwidth) 信号を対象とした単一チャンネルの APD 測定事例<sup>(10)</sup>もある。

非定常な信号の測定に要求される周波数軸, 時間軸, および付随する振幅軸の 3 軸面から, 同時に観測できる測定手法として, 従来のスペクトラムアナライザ (SPA) が採用している周波数掃引方式から, FFT (Fast Frequency Transform) 分析機能を備えた方式へと進展するに伴い, 周波数対時間推移特性のリアルタイム性能も追求されつつあるが, 現在, 周波数特性における時間軸上での信号捕捉率が確保されているかという点では十分とは言えない。

この時間軸上の信号捕捉率を確保した上で, 振幅軸に APD 測定法を導入し, 周波数軸を多チャンネル化した広帯域多チャンネル APD 測定器は, 今後の非定常信号の測定を対象とした測定器として望まれる。この測定器として 16000 ch の APD 測定器<sup>(11)</sup>がすでに開発された。本論文では, さらに, その広帯域化を図った 32000ch におよぶ多チャンネル APD 測定装置の開発と有効性について報告する。第 2 章では, 多チャンネル同時測定を実現する APD

測定装置の開発の概要について、第 3 章では開発した 32000ch におよぶ APD 測定装置の主要特性とスケラブルな周波数分解能帯域幅 (RBW: Resolution Band Width) とチャンネル数が可変のリアルタイム測定について記述する。開発した 32000ch におよぶ信号捕捉率を満たした APD 測定装置が非定常性を有する信号測定などに有効な測定手法であることを示す。

## 2 開発装置の構成

図 1 は開発した多チャンネル APD 測定装置の外観写真を示す。本論文では物理的な固有軸上の同時測定という観点で記述する。主に電磁波等の帯域信号を観測する際は SPA と同様に、周波数変換後の IF 帯域信号を対象にして多チャンネル APD 測定を行う。電磁波測定では、アンテナでセンシングした信号を周波数変換した IF 帯域信号として APD 測定を行う例を想定すると、振幅軸上ではアンテナ部から APD 測定までの測定系は、広帯域な無歪伝送系で構成することが要件となる。

図 2 に本装置の機能ブロック図を示す。帯域信号の波形観測の線形性を確保するために線形直線位相特性が容易に実現できるデジタル信号処理の適用を図る。

入力される IF 信号 (IF signal) の有する測定対象の振幅軸方向の直線性を確保するべく、広ダイナミックレンジで量子化雑音を満たす A/D 変換器 (ADC) によりデジタル信号に変換する。本装置では、現在、最高性能を有する分解能 16 ビット、200M サンプル/毎秒の市販の ADC を採用した。デジタル化された IF 信号の中心周波数を後段のデジタル処理に最適な周波数に変換して、I/Q 信号に直交変換 (Quadrature detector) 後、間引き処理を行う。デジタル処理用システムクロックは位相雑音特性のよいクロック源とする。IF 帯域信号はエイリアシング除去を考慮して直線位相特性フィルタ処理で帯域制限を行う。

周波数軸上での信号の振る舞いを観測するには RBW とその帯域制限フィルタの種類が特性を決める重要な要素となる。通常の



図 1 32000 ch APD 測定装置  
32000ch Multi-channel APD Apparatus

SPA などの周波数特性測定では RBW にガウス特性のフィルタが使用されている。本装置では振幅軸上の APD 特性を測定するが、通信方式に適合した信号波形の観測や、符号誤り特性の評価にも適合できるように、通信方式に適合したフィルタタイプの設定機能を備える。FIR 型のデジタルフィルタ構成を基本に直線位相のインパルス応答係数をフィルタ乗算器に設定し、フィルタの形状を可変にする機能 (Filter coefficients 設定) を設ける。OFDM 通信方式のようにマルチキャリア通信の特性評価に対応するには受信測定帯域の広帯域化とその多チャンネル化が必要となる。多チャンネル化は同時測定する際の測定周波数分解能の向上という側面で捉えられ、その構成にはフィルタバンク構成を適用する。

周波数軸と時間軸との同時測定の要件を満たすフィルタバンク構成には、多チャンネルの個々の周波数特性を有する時間信号のリアルタイム計測、すなわち、各チャンネルを通過する時間信号の連続性の確保が要件となる。このフィルタバンクの実現には柔軟にチャンネル数が可変にできる離散時間システムで表現した式 (1) に示す短時間フーリエ変換法を採用して、時間軸上の連続性を確保する。

短時間フーリエ変換手法は、式 (1) を変形した式 (2) から、図 2 の  $I, Q$  時系列信号  $x(n)$  と窓関数 RBW フィルタのインパルス応答  $v(-n)e^{-jn\omega} = v(-n)e^{-j\omega_0}$  との畳み込み和 (フィルタリング) を示し、その結果を変調器で周波数変換してベースバンド信号に変換することを示している。

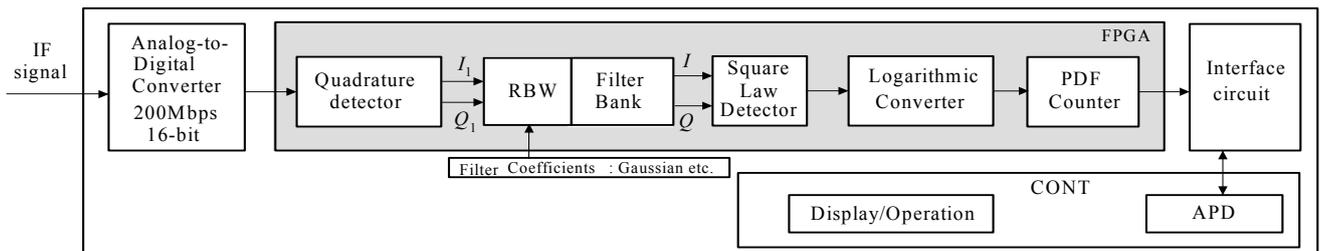


図 2 32000ch APD 測定装置のブロック図  
Block diagram of 32000ch APD measuring apparatus

また、RBWのインパルス応答の周波数特性 $\hat{V}(e^{j\omega})$ は、 $v(-n)$ の周波数特性を $V(e^{j\omega})$ とすると、式(3)のように周波数 $\omega_0$ だけ推移させたフィルタとなっている。このフィルタを $m(=0, \dots, M-1)$ として $M$ 個用意すると、周波数 $m\omega_0$ 毎に配置された $M$ 分割フィルタバンク(Filter Bank)を構成できる。このように、この計算手法を用いると、容易にチャンネルが可変な均一フィルタバンクに拡張できることになる。

$$X_{STFT}(e^{j\omega}, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)v(n-m)e^{-j\omega n} \dots(1)$$

$$= e^{-j\omega m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)v(n-m)e^{j\omega(m-n)} \dots(2)$$

$$\hat{V}(e^{-j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} v(-n)e^{-j(-\omega_0+\omega)n} = V(e^{-j(-\omega_0+\omega)}) \dots(3)$$

以上の短時間フーリエ変換法の物理的意味を把握した上で、式(1)は入力信号系列に窓関数 $v(n-m)$ を乗じて離散時間フーリエ変換を整数 $m$ 毎に実施する計算手法となっている。この離散時間フーリエ変換として乗加算処理数を削減するためにFFTを適用すると、チャンネル数と窓関数であるRBWが容易に可変できる多チャンネルフィルタバンクを構成することができる。

本開発ではRBWとして1kHzから1MHz(1-3ステップ)までは受信帯域(RBW\*ch数=最大32MHz)までのチャンネル数を構成した。また、10MHz(1ch)、20MHz(1ch)を用意した。

以上の時間軸の連続性という意味は、サンプリング定理が連続信号の離散化後の完全再生に必要な時間軸上の離散化データ数であったように、時間で径路つけた振幅変動のAPD測定を行うのに必要な時間軸上のデータ数のことを指す。この要件を決める指針としてはCISPR16-1-1の規定<sup>(2)</sup>があり、帯域幅1MHzの場合は、 $1/(10^6)/10\text{sec}$ 以下のサンプリング時間を推奨している。この事実は帯域内信号が複数の正弦波で構成された際の信号の振る舞いという観点で見ると、帯域幅の大きさに関わらず正弦波で構成される信号の振る舞いは同一線形構造とみなせるので、測定帯域幅の10倍以上に対応する時間をもってサンプリング時間とする。これはRBW帯域信号の時間的プロフィールを忠実に捉えるに必要なサンプリング数となる。この条件を満たす各チャンネルを合成した多チャンネルの場合の時間軸の連続性の確保についても同様である<sup>(12)</sup>。

各チャンネルの出力された時系列信号 $I, Q$ に対して、包絡線検波(Square Law Detector)後、対数変換処理(logarithmic Converter)を介して、対数値毎にアドレッシングされたカウンタ群の内容を参照する対数値毎に+1カウントアップすることで、確率密度関数(PDF:ProbabilityDistributionFunction)相当のヒストグラム(PDF Counter)を1秒毎に生成する。

以上の回路構成を図2に示すAPD測定回路としてFPGA(Field Programmable Gate Array)上に実現する。デジタル信号処理回路は機能シミュレーションを実施後、乗加算器数と記憶容量や配線リソースの最適化を図り、FPGAで回路合成を行った。デジタル信号処理の振幅軸上の線形性の確保に必要な演算語長は固定少数点演算方式の30ビットを採用し、RBWが1kHzでの分析に必要な測定レベル分解能を確保している。

各チャンネルで算出されたPDF値は高速バスインタフェース(Interface circuit)を介して、制御部(CONT)に転送され、ソフトウェア処理によって累積確率分布であるAPD値を生成する。このAPD計測はIF信号の任意の中心周波数で、周波数間隔がRBWの周波数帯域幅の値に等しい多チャンネルAPDを同時かつ連続的に実行される。

計測結果の表示(Display)には確率値毎に色分けされた色帯による時刻対振幅、Rayleighグラフ<sup>(8)</sup>によるAPD対振幅、片対数グラフによる振幅対APDなどの動画表示を行っている。色分け表示は確率密度の違う信号の違いを分別する意味で強力な表示手段である。これらの計測結果は必要に応じてハードディスク等の記憶デバイスに蓄積される。以上のソフト処理の設計では、構成モジュールの実時間処理分析を実施後に、実時間処理の実現が図れる制御部のCPUリソースを選択した。

装置のシステム面では、操作部(Operation)で設定されたAPD計測回路情報が、制御部(CONT)のインタフェースからバスを介して、上記のFPGAにダウンロードされ、チャンネル数、RBWがスケラブルに即座に変更できるAPD測定装置として再構築される。例えば、RBW1kHzのガウス特性フィルタと短時間フーリエ変換処理の回路情報がFPGAにダウンロードされて、多チャンネル化された32734chまでの測定帯域幅約32MHzの広帯域APD測定が実現される。

以上のことから、周波数軸をRBWで多チャンネル化した各チャンネル毎のAPD測定に必要な時間軸の連続性を図り、付随する振幅軸の線形性と高精度化を図ったリアルタイム多チャンネル同時測定が実現できた。

### 3 多チャンネル同時 APD 測定の主要特性と特徴

多チャンネル同時測定を実現したフィルタバンク特性と信号捕捉率の確保について述べ、多チャンネル同時測定の特徴を述べる。

#### 3.1 多チャンネルフィルタバンク分離特性

多チャンネル同時測定を実現するためのフィルタバンクの分離特性を示したのが図 3 で、32000ch の各フィルタの周波数レベル特性結果を示す。IF 信号として CW 信号を入力し、RBW を 1 kHz に設定した時のフィルタバンクの周波数特性を示している。中心周波数として 75.0 MHz を中心に -3 dB 帯域幅が 1 kHz のガウシアン特性のフィルタが 1 kHz 毎に並置された均一フィルタバンクとなっている。図 3 は出力チャンネル数 32000ch のうち、1 kHz 置きに 5ch 分だけを表示した結果である。周波数レベル値は瞬時電力平均値として、PDF 値から確率変数(振幅)の期待値を計算している。この多チャンネル化されたフィルタ周波数分離特性から、課題とする周波数軸上の測定の高分解能化が実現され、きめ細かい各チャンネルの時間周波数解析が実行される。

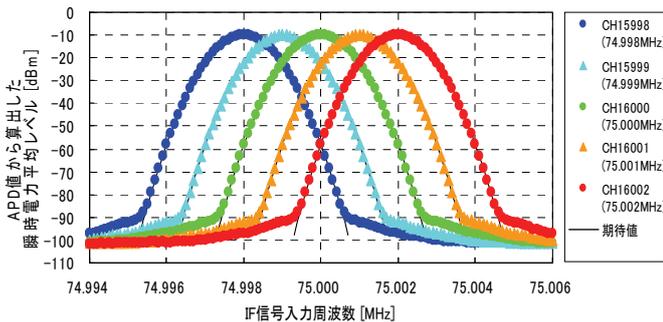


図 3 32000ch フィルタバンクの周波数特性  
Frequency Characteristics of 32000ch Filter bank

#### 3.2 信号捕捉率の確保

図 4 は APD 測定に必要な信号捕捉率 99%以上を調べるための簡易な評価波形で APD 測定値から評価できる。上段に欠落モデルとして、測定周期  $T_M$  内の実際の測定時間と測定の欠落時

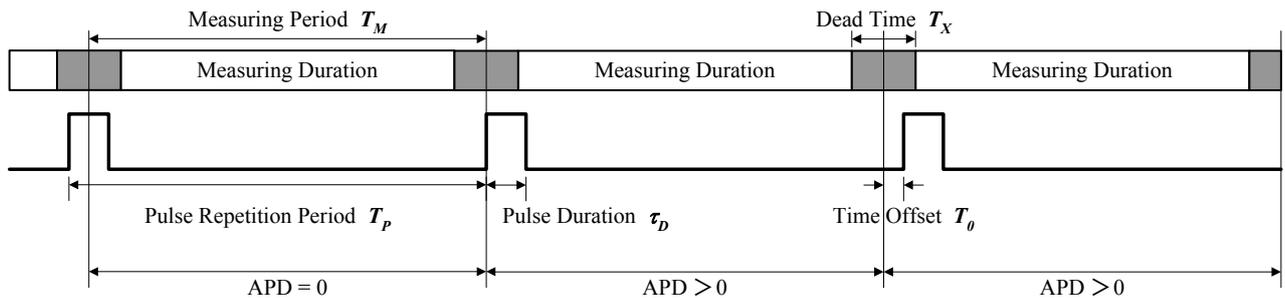


図 4 信号捕捉率の評価波形  
Evaluation waveforms for signal capturing rate

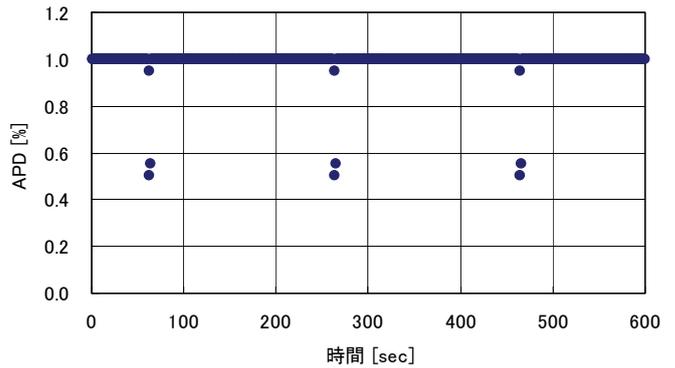


図 5 パルス信号の APD 値測定結果  
APD measuring value of pulsed signals

間  $T_x$  の関係を、下段に評価用パルス信号として、パルス繰り返し周期  $T_p$ 、パルス幅  $\tau_D$  の瞬時電力の時間波形を示す。評価用パルス信号の APD 最大値はパルスが測定時間内に完全に重なるときであり、 $APD \approx \tau_D / (T_M - T_x)$  となる。また、パルスと欠落時間  $T_x$  の相対的な位置関係を意味する時間オフセット  $T_0$  は、測定周期ごとにパルス幅の半分だけ増加し、パルスが欠落時間に完全に重なると APD は 0 となり、パルスが欠落時間内に一部分だけ重なると APD は 0 を超えるように設定されている。

測定周期  $T_M$  1 秒の場合、パルス繰り返し周期  $T_p$  1.005 秒、パルス幅  $\tau_D$  10 ミリ秒のパルス信号の APD 測定を行なうと、もしも APD が 0 となる測定結果が無ければ、欠落時間が 1%以内であり、信号捕捉率は 99%以上と評価できる。図 5 には RBW:1 kHz、測定チャンネル数:32000 の設定における信号捕捉率の測定評価結果を示す。横軸に時間、縦軸に APD [%] を示している。

図 5 から、APD はほぼ 1%を示しているが、9 点だけ APD が 1%未満の測定点がある。これは、未知の欠落時間内にパルスの一部分が重なったときの APD 値を示し、パルスが欠落時間内に完全に重なる状態である APD が 0 となる測定結果は無かった。この評価法を適用し、すべての RBW 設定時の APD 測定において、欠落時間は 1%以内であり、信号捕捉率は 99%以上であると評価できた。

### 3.3 多チャンネルリアルタイム APD スペクトラム波形

多チャンネル APD 測定は、多チャンネルを同時測定することにより、広帯域リアルタイム APD スペアナとして機能する。さらに、各チャンネル毎の振幅確率分布を詳細に分析できる。

図 6 は、RBW を 1 kHz、測定チャンネルを 32000ch に設定して、IF 入力信号として、ISDB-T 信号を 5 チャンネル並置した多チャンネル APD 同時測定結果である。横軸にチャンネルを並べた周波数、縦軸に瞬時電力平均値を示し、確率値により色帯表示している。画面は 1 秒毎に更新され、1 秒間内の APD 値は 3.2 節で説明したように欠測なく、リアルタイムに表示される。約 32 MHz 帯域に及ぶ広帯域なリアルタイム APD 測定が実現できている。

ここで、色帯表示について説明すると、赤色部分で示すレベル範囲は  $90\% < APD$  であり、同様に黄色部分は  $50\% < APD \leq 90\%$ 、緑色部分は  $10\% < APD \leq 50\%$ 、水色部分は  $1\% < APD \leq 10\%$ 、青色部分は  $0\% < APD \leq 1\%$  である。これらの確率値と色帯の対応は任意に設定可能である。

従来 SPA との比較のために、FFT 方式の SPA に同一の信号を入力し、1 秒間の Capture データを FFT 分析し、平均値検波した結果が図 7 である。

図 6 と図 7 との比較から、多チャンネル APD 測定が有するリアルタイム計測と APD 色帯表示により、RBW 帯域内の振幅値の発生頻度が鮮明に解る。

図 6 には APD 値が 90% を超えている赤いスパイク状の信号成分が表示されている。一方、図 8 は帯域幅 5.6 MHz の AWGN (Additive White Gaussian Noise) を 5 ch 並置した信号の APD 測定表示結果である。図 6 と図 8 との比較から、赤いスパイク状の信号は ISDB-T 信号特有の非正常に現れる Pilot 信号であると理解される。

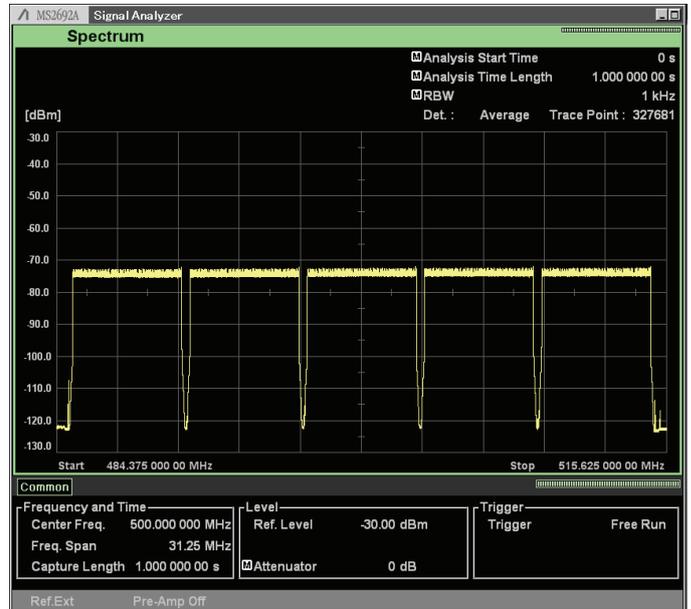


図 7 .FFT 平均値検波 分析結果  
FFT Spectrum with averaged detection

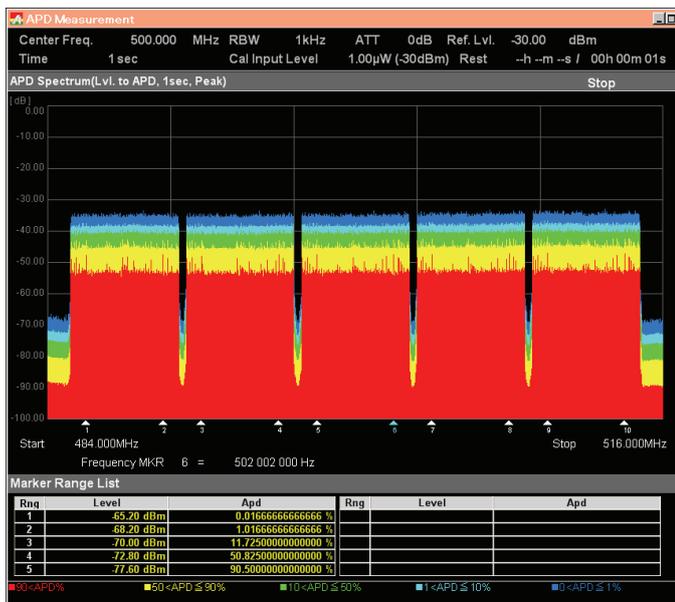


図 6 32000ch APD スペクトラム波形 (5ch ISDB-T 信号)  
32000ch APD Spectrum (5ch ISDB-T signals)



図 8 32000ch APD スペクトラム波形 (AWGN 信号)  
32000ch APD Spectrum (AWGN signals)

### 3.4 非正常信号の分別

多チャンネル APD は広帯域な統計量である APD 測定法であるため、統計的分布が異なる信号の分別が可能となる。

図 9 は、RBW を 1 kHz、測定チャンネル数を 16000ch に設定して、IF 入力信号として、表 1 に示すガウス雑音信号の存在帯域に繰返しパルス変調信号を重畳した確率密度の違う 2 つの信号を同時に測定した結果である。

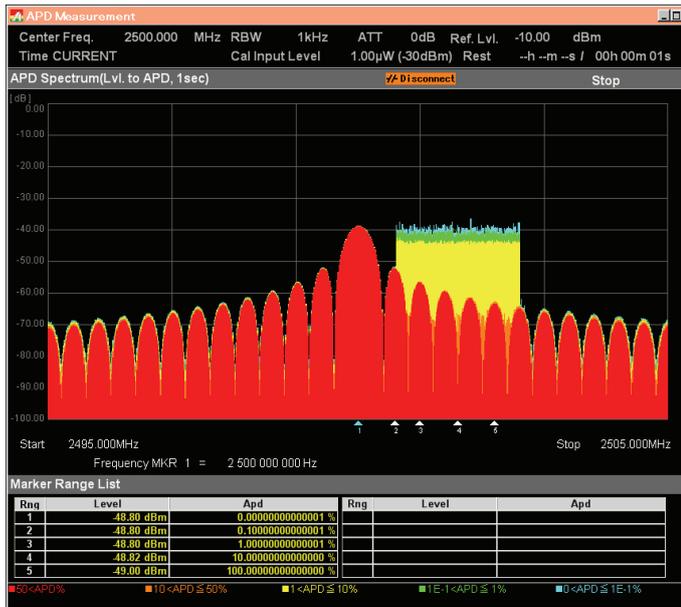


図 9 16000ch APD スペクトラム波形  
16000ch APD Spectrum

表 1 測定信号の仕様

Specification of measuring signals

パルス変調信号：搬送波周波数：2.5 GHz パルス繰返し周期：125/パルス幅：2.5 μ 秒 出力レベル：-15 dBm
ガウス雑音信号：中心周波数：2.5016 GHz、帯域幅：2 MHz 継続時間/発生周期：100 m 秒/1 秒 出力レベル：-25 dBm

比較のために、図 10 は同一の入力信号の 1 秒間の Capture 信号を周波数スパン 10 MHz、RBW を 1 kHz に設定した FFT 方式の SPA で分析した結果である。図 9, 10 から、従来 SPA の有する FFT 分析結果では 2 つの信号の分別は容易にできないが、多チャンネル APD 測定では容易にできている。これは、多チャンネル APD 測定手法のリアルタイム計測と確率分布の色帯表示による結果である。また、図 9 の APD 表示結果は 1 秒ごとに更新されているが、この FFT 分析では 1 秒間の Capture 信号の解析時間長に対して結果表示までの処理時間は約 4 分ほど要している。

### 3.5 振幅確率分布測定

多チャンネル APD 測定は、RBW が 1 kHz で各チャンネル毎に測定信号の統計的な性質を、直感的にかつ正確に、リアルタイムで測定表示ができる。

図 11 は、IF 入力信号端を終端した際の無信号時の装置の雑音を 74.998~75.002 MHz の RBW 1 kHz の 5 チャンネル分の APD 測定結果を示している。横軸は確率値を Rayleigh 尺度<sup>(13)</sup>、縦軸

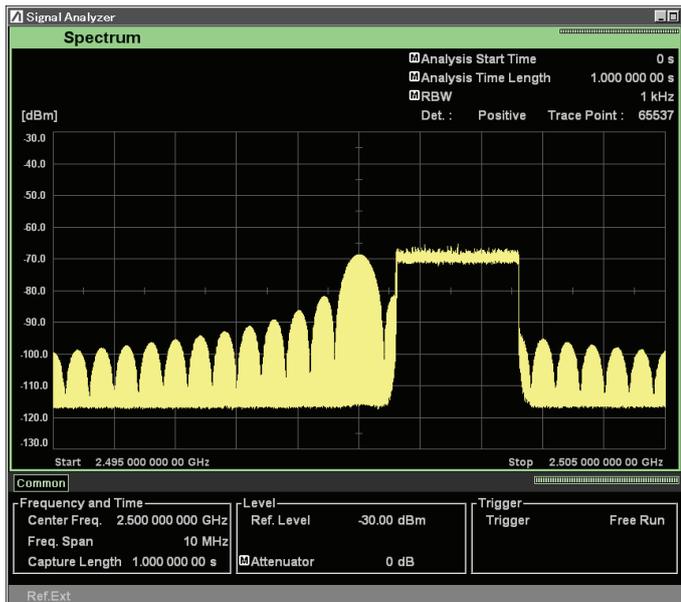


図 10 FFT ピークホールド分析結果  
FFT Spectrum with peakhold detection



図 11 32000ch APD スペクトラム波形(装置雑音)  
32000ch APD Spectrum (floor noises)

は振幅閾値レベルで表示している。これらのグラフはAPDカーブと称している。

この測定例では、分布形状の示す直線性とその傾斜値から、熱雑音であると推定できる。このように、リアルタイムに統計分布の計測ができるために、測定対象の統計的性質の特定や把握も容易である。

また、雑音特性の帯域特性を調べることが可能となる。多チャンネル APD 測定機能は、スケーラブルに RBW とチャンネル数を変更設定できることから、その RBW 毎に雑音測定を実行することにより、帯域特性の評価測定が可能となる<sup>(11)</sup>。

図 11 の上部は APD カーブのグラフ的表現であるが、下部には定量的測定値として各チャンネルの電力値、ピーク値、および PAPR (Peak to Average Power Ratio) 値が同時に表示されるため、具体的定量的な評価もリアルタイムに実施できる。

### 3.6 EMC 測定への応用

多チャンネル APD 測定は、3.2 節で示したように信号捕捉率を 99% 以上保証した周波数時間解析であるため、測定の瞬時性を要する妨害波測定に適用できる。

実際、CISPR-11 規格において、電子レンジ妨害波適合試験の代替法として、現在、APD 測定とその許容値の採択に向け検討が進められている。

本装置はチャンネルと RBW とがスケーラブルに設定できるため、標準化を検討している日本の CISPR/B/WG1 APD メンテナンスチームの要求に沿った測定環境が提供でき、共同実験が実施された。その結果は文献<sup>(14)</sup>に報告されている。電子レンジの妨害波測定は基本周波数(2.4 GHz 近傍)とその 4 次高調波までの測定が要求されている。その妨害波には周波数時間推移特性があり、中心周波数の両側 5 MHz 帯で、RBW を 1 MHz に設定した 11ch の同時測定が必要とされた。この条件に対して、多チャンネル APD 測定装置は、16 チャンネル RBW を 1 MHz に設定して対応した。

4 次までの高調波測定には、新規に開発した 26.5 GHz までのチューナブルプリセレクタを併用し、75 MHz の IF 信号に変換して、その帯域信号を APD 測定した。

図 12 は、ある電子レンジの 2 次高調波の 10ch の 10 分間の APD カーブを示している。縦軸が確率値、横軸が振幅閾値レベルを表示している。そのレベルに対する確率値を示す。10ch 分の APD が同時表示され、10 MHz 帯域内のチャンネル間の変動が直感的に把握できる。また、信号のある振幅閾値レベルがどのような頻度で出現するかが許容値を策定する際に重要な指標となるが、この要求に対しては、縦軸と横軸とに設定できるマーカ機能を用意している。このマー

カ位置の測定結果は APD カーブ下に数値表示される。

図 13 は APD の時間推移特性を把握するための 5ch 分の 10 分間の APD チャート表示である。1 秒毎の APD 値の推移が表示され、測定信号の時間変動、例えば周期性などの性質を把握でき、測定対象の現象を把握するために必要な測定時間を見積もることが可能となる。

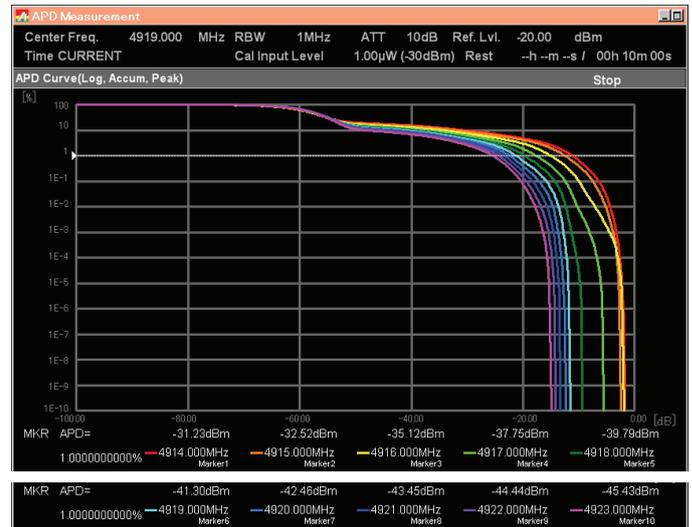


図 12 APD カーブ特性(4914~4923 MHz)  
APD Curve (4914~4923 MHz)



図 13 APD チャート特性(4919~4923 MHz)  
APD Chart (4919~4923 MHz)

### 3.7 RF 変調パルス波測定

多チャンネル APD 測定は 3.2 節で示したように、信号捕捉率 99% 以上を確保したリアルタイム測定であるため、発生確率の低いインパルス性雑音のピーク値計測や発生確率が  $10^{-9}$  (RBW 1 MHz 時) 以下であるような電磁波現象も捉えることができる<sup>(9)</sup>。

図 14 は、搬送波周波数 75 MHz、パルス繰り返し周期 1 秒、パルス幅 10 ミリ秒、パルス高 0 dBm のパルス変調 RF 信号を測定した結果である。RBW は 1 kHz に設定した -3 dB 帯域幅のガウシアンフィルタである。パルス繰り返し周期とパルス幅から計算されるパルス波の存在確率 1% を正確に測定していることが判る。

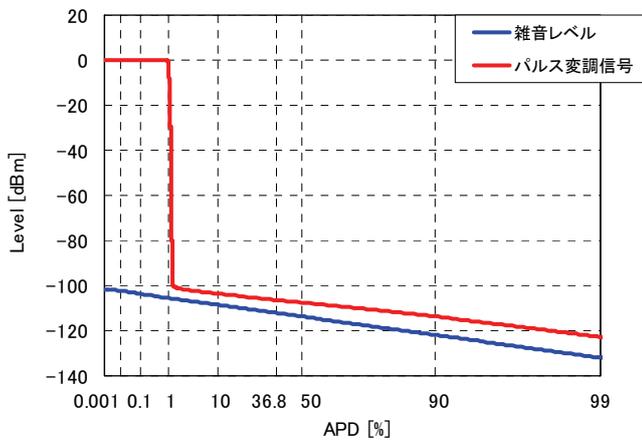


図 14 RF パルス変調信号の APD カーブ  
APD Curve of RF modulated pulse signal

### 3.8 APD 特性と無線通信への応用

無線通信に使用される通信変調方式によって、振幅確率分布が異なる。この性質を APD 測定で有効に取り出すことができ、変調識別が可能となる<sup>(15)</sup>。

図 15 は、5chAPD 測定器である MS2690A1 (アンリツ製)<sup>(9)</sup> によって測定した 1ch の APD 測定結果である。この APD 測定により、変調識別への応用の可能性が開かれる。

この性質を利用すると、電波監視業務で課題となる混信と混信でない時の APD 特性の違いに注目した混信現象の検出にも利用可能となる<sup>(16)</sup>。

また、無線通信における妨害波と符号誤り率との相関関係も研究報告されていて、APD 測定の誤り率測定への応用も期待されている<sup>(17)</sup>。

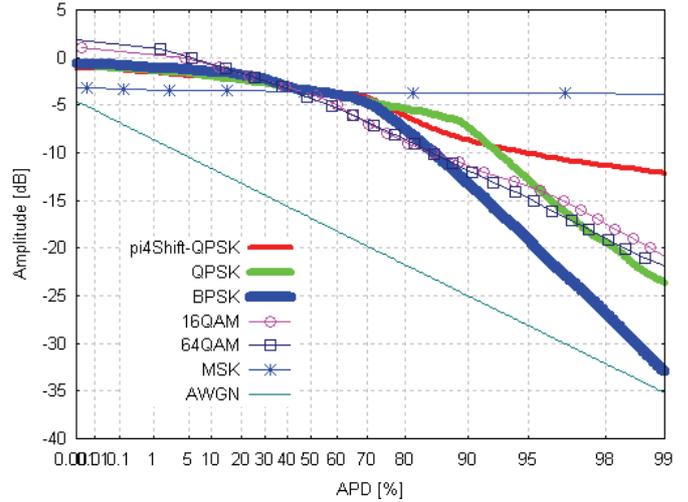


図 15 変調方式信号の APD カーブ特性<sup>(10)</sup>  
APD Curve vs. modulation systems<sup>(10)</sup>

## 4 むすび

無線周波数の拡大と有効利用に向けて、ますます複雑化する無線環境において、その測定に有効な多チャンネル APD 測定装置の開発と有効な測定法とその特徴について述べた。

時間周波数解析として信号捕捉率を 99% 以上に確保できる多チャンネル APD 測定は、リアルタイムで振幅情報を調べる測定器であり、今後の無線通信のコグニティブ無線通信、スマートグリッドにおける無線インタフェース、無線通信を使用するロボット遠隔制御など無線周波数環境を調べる有効な測定手段となることが期待される。この研究成果の一部は総務省「電波資源の有効利用の研究開発」で得られたものである。

## 参考文献

- 1) 清水康敬・杉浦 行:「電磁妨害波の基本と対策」, 電子情報通信学会編, コロナ社刊(1995)
- 2) CISPR16-1-1 2nd ed.: “Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods” (2006)
- 3) H. Yuhara, T. Ishida, and M. Higashimura : “Measurement of the Amplitude Probability Distribution of Atmospheric Noise”, Journal of the Radio Research Laboratories, Vol.3, pp.101-108 (1956-2)
- 4) M. Kanda: “Time and Amplitude Statistics for Electromagnetic Noise in Mines”, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-17, No.3, pp.122-129 (1975-8)

- 5) 内野 政治, 篠塚 隆, 佐藤 利三郎:”20MHz 標本化 8bit 分解能を有する振幅確率分布測定装置”,電子情報通信学会論文誌 B, vol. J82-B, no. 11, pp. 2181-2187, 1999年 11月.
- 6) 内野政治, 菱山光正, 篠塚隆, 上芳夫:”多チャンネル APD 機能内蔵型電波雑音測定装置”,電子情報通信学会総合大会, B-4-75, p. 418, 2009年 3月.
- 7) M. Uchino, O. Tagiri, and T. Shinozuka:”Real-Time Measurement of Noise Statistics”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol.43, No.4, pp.629-636 (2001-11)
- 8) K. Gotoh, Y. Matsumoto, S. Ishigami, T. Shinozuka, and M. Uchino:”Development and evaluation of a prototype multichannel APD measuring receiver”, 2007 IEEE International Electromagnetic Compatibility Symposium, THPM6SS2, Hawaii (2007-7)
- 9) 荒川悟, 論手素直, 大塚尚宏, 浅生秀幸, 内野政治:”振幅確率分布の連続計測と低発生頻度パルスへの応用”, 電気学会論文誌 A, vol129, No.8, 2009
- 10) Ken Mochizuki, Yukiyasu Kimura, Hironori Watanabe, Masaharu Uchino:”Peak power measurement of UWB transmissions using 50-MHz bandwidth gaussian filter,”Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2010, Yokohama, December 8-10, 2010.
- 11) 論手素直, 荒川悟, 大塚尚宏, 内野政治:”16000 チャンネル振幅確率分布測定装置の開発と量子化雑音測定評価”, 第 27 回センシングフォーラム, 計測自動制御学会, pp.107-111(2010-9)
- 12) 論手素直, 荒川悟, 大塚尚宏, 内野政治:”32000 チャンネル APD 測定装置の開発”, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会, T27-5,CD-ROM(2011-5)
- 13) 進土昌明編著:「無線通信の電波伝搬」, 電子情報通信学会編, コロナ社刊(1992)
- 14) Shinozuka, Gotoh: CISPR/B/WG1/APD(Shinozuka, Gotoh)/11-03,2011-2”
- 15) 東久保理江子, 細谷晴彦, 論手素直, 内野政治:”振幅確率分布(APD)による変調方式の識別”, 電子情報通信学会総合大会, B-5-15, p. 447, 2010年 3月.
- 16) 細谷晴彦, 東久保理江子, 論手素直, 内野政治:”振幅確率分布による混信検出”, 電子情報通信学会総合大会, B-5-16, pp.448, 2010年 3月.
- 17) Y.Matsumoto:”On the relation Between the Amplitude probability Distribution of Noise and Bit error Probability”,IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, VOL.49,NO.4, pp.940-941(2007-10)

---

#### 執筆者



論手素直  
R&D 統轄本部  
R&D センター  
第1技術開発部



荒川 悟  
マーケティング本部  
プロダクトマーケティング部  
プロジェクトチーム1

公知