

3-2 船舶用レーダーの不要発射測定

北澤弘則 塩田貞明

電波の有効利用を図るため、不要な電波の発射をできる限り低減することが求められている。不要発射に関して、レーダーシステムはレーダーアンテナから輻射される電波を測定することが2003年の世界無線通信会議(World Radiocommunication Conference : WRC-03)において不要発射規制として定められた。NICTでは新たな不要発射規制に基づく測定法(ITU-R 勧告 M.1177)に準拠した測定装置の研究開発を実施し、広いダイナミックレンジ、高速測定を可能とする計測装置などの開発を進めてきた。

1 背景・経緯

電波の有効利用を図るため、不要な電波の発射をできる限り低減することが世界的に求められている。ITU(国際電気通信連合)では不要発射に対する規制値の見直しを行い、これまで無変調状態により規定していたものを実運用状態(変調状態)で行うこととし、1997年頃から無線通信規則(RR: Radio Regulations)及び関連勧告を改定し、2003年から適用してきた[1]。ちなみに、不要発射とはスプリアス発射及び帯域外発射のことであり、スプリアス発射とは、必要周波数帯域外における1または2以上の周波数の電波の発射であって、そのレベルを情報の伝送に影響を与えないで低減することができ、高調波発射、低調波発射、寄生発射及び相互変調積を含み、帯域外発射を含まないものと定義されている。また、帯域外発射とは、必要周波数帯に近接する周波数の電波の発射で情報の伝送のための変調の過程において生ずるものと定義されている。

国内では2005年12月の法令改正により、無線機器に対し、それまでよりも厳しい不要発射の規制値が適用されている。特にレーダーに対しては他の通信機器とは異なり、アンテナから放射される電波を測定することが求められ、帯域外領域の不要発射については“帯域外放射マスク”により規制を行うこととなった。帯域外放射マスクは、40デシベル帯域幅(B_{40})とその両端から30 dB/decadeで減衰(roll-off)する曲線からなり、減衰曲線がスプリアス規制値と交差する周波数が帯域外領域とスプリアス領域の境界となる(図1)。

帯域外領域における不要発射についてはITU-R 勧告 SM.1541 に記されているが、レーダーシステムの帯域外放射マスクについては設計目標(Design objective)が示されており、更に厳しい規制値(40

dB/decadeで減衰する帯域外領域の規制値)の適用を検討することとなっている[2]。

レーダーシステムの不要発射測定には、ITU-R 勧告 M.1177[3]に定められる測定方法の使用が求められており、M.1177には直接法(レーダーアンテナから輻射された電波を測定する方法)と間接法(送受信機の給電点におけるスペクトラムとアンテナ特性を別々に測定して加味する方法)の2種類の測定方法が記されているが、RRにおけるレーダーシステムの不要発射の規制値は放射電力(EIRP: Equivalent isotropically radiated power)で規定されていることや、間接法では給電点とアンテナを切り離すことによって発生する、被測定装置あるいは測定系の周波数特性等を測定周波数範囲全てにわたって把握することは非常に困難であることなどから、NICTでは直接法による測定を検討してきた。

直接法では、測定条件として遠方界(船舶用レーダーで数百m、気象用レーダーで数km)を規定しているため、その測定場所(測定サイト)の確立が測定精度の点において重要な課題となってくる。現時点では、測定サイトあるいは測定系の持つ不確かさ等を把握し、確度を持ってM.1177に準拠した遠方界測定を実施しているのは、英国QinetiQ社のみであるが、日本でもRRに従ったスプリアス規制を適用していることなどを考慮すると、国内における測定サイトの構築が必要である。

また、不要発射を測定する方法に関しては、通常の動作状態で回転するレーダーアンテナから放射される不要発射の放射方向とその大きさが特定できないことから、M.1177ではレーダーアンテナの全周方向にわたって測定することが求められているため、長時間の測定(船舶レーダーの場合、約20時間となる)が余儀なくされる。この長時間測定中の周囲環境の変化が測

定精度に影響を及ぼす可能性は否定できない。

このような状況の下、NICT では国内における測定サイトの確立と測定装置の整備という観点から、測定装置の研究開発及び測定サイトの候補地調査などを行ってきた。

2 レーダーシステムの不要発射規制

2.1 規制の経緯

不要発射に関し、それまで明確でなかったレーダーシステムのスプリアス発射の許容値について、ITU は WRC-97 にて RR の改訂を行い、Appendix 3 Table I にてその許容値を規定した。これによりレーダーシステムが該当する無線測位業務については「 $43+10\log(\text{PEP})$ もしくは 60 dB のうちの厳しくない値 (PEP : peak envelope power)」がスプリアス発射の許容値となった。本許容値は、送信周波数における尖頭包絡線電力との比較値である。また、その測定周波数範囲については、RR の Appendix 3 では 9 kHz から 110 GHz もしくは 2 倍波の高い方と記されているが、実際には RR より引用されているスプリアス領域における不要発射の規制値とその測定法を示した ITU-R 勧告 SM.329 の最新版 [4] に現実的な測定範囲が記されているので、それに従い実施することになる。測定すべき周波数範囲は、1997年に改訂された SM.329 (SM.329-7: 2.6 項) よりその周波数範囲が明記され、さらに 2000年に改訂された SM.329 (SM.329-8: Table 1) より基本周波数ごとに区分された表によって示されるようになった。これによると、例えば 3 GHz 帯レーダーであれば 30 MHz ~ 5 倍の高調波まで、 9 GHz 帯レーダーであれば 30 MHz ~ 26 GHz となり、さらに送信経路に導波管を使用している場合の下限の周波数は、使用する導波管のカットオフ周波数の 0.7 倍からで良いとされている (表 1)。

不要発射の規制値 (許容値) は 2003 年の WRC-03 に

おいて領域 (domain) の概念が導入され、スプリアス領域における許容電力等については前述のとおり RR の Appendix 3 Table I 及び ITU-R 勧告 SM.239 に、帯域外領域 (Out of band domain) における不要発射の規制値については ITU-R 勧告 SM.1541 の Annex 8 にそれぞれ示されている。

また、RR では改訂した規制の実施時期についても言及されており、WRC-2000 での決定事項として、Appendix 3 には送信機が装備されるタイミングで規定されている。ここでは、新たなスプリアス規制は 2003 年 1 月 1 日以降に装備されるレーダーに、2012 年 1 月 1 日以降は全てのレーダー (既存の装備も含む) に適用することが求められており、現在 (2016 年 6 月) は、移行措置期間が過ぎ、すべてのレーダーが改訂された規制に適合しなければならない状況となっている。

レーダーシステムの不要発射の測定ポイント (測定系を接続する位置) については、WRC-97 まではアンテナ接続端とされていたが、WRC-2000 にて大幅な条件変更が行われ、無線測位業務の区分に付帯条件が追加されて、レーダー (RR の No.1.100 で定義されているレーダー) の不要発射の強度はアンテナ接続端でなくアンテナ放射レベルで制限されることとなった。この条件変更は不要発射の測定に大きなインパクトを与えた。すなわちレーダーのアンテナから放射される電力を、規定された周波数範囲全部について測定し、さらに中心周波数の尖頭包絡線電力と比較して、スプリアス規制を満足しているかを調べなければならない。しかしながら、不要発射の電力及び放射角度を、要求される測定周波数範囲の全てにわたり予測することは極めて困難でもあることから、回転するレーダーアンテナから放射されるすべての不要発射を正確に捕捉するためには、特別な考慮が必要となる。このため、レーダーシステムの測定法に関する特例として ITU-R 勧告 M.1177 を制定し、RR では本勧告に基づいてレーダーの不要発射を測定することを求めている。

表 1 不要発射測定周波数範囲 (ITU-R 勧告 SM.329-12 より抜粋 [5])

基本周波数の範囲	測定周波数範囲	
	下限	上限 (試験はすべての高調波帯域を含み、規定どおりの上限周波数において切り捨てないこと)
9 kHz-100 MHz	9 kHz	1 GHz
100 MHz-300 MHz	9 kHz	10 th harmonic
300 MHz-600 MHz	30 MHz	3 GHz
600 MHz-5.2 GHz	30 MHz	5 th harmonic
5.2 GHz-13 GHz	30 MHz	26 GHz
13 GHz-150 GHz	30 MHz	2 nd harmonic
150 GHz-300 GHz	30 MHz	300 GHz

2.2 最新の不要発射規制

前項までに不要発射規制のこれまでの経緯を述べたが、2016年6月時点でのレーダーシステムの不要発射規制値をまとめると以下ようになる。

- 不要発射許容値：43 + log (PEP) 又は 60 dBc のいずれか厳しくない方
- OoB (Out of band：帯域外領域) の不要発射許容値：40 dB 帯域幅の決定と OoB マスクによる。
- 変調方式による帯域外放射マスクは原則として 40 dB 帯域幅の両端より 30 dB/decade で減衰し、スプリアス発射の許容値に達する周波数までを帯域外領域とする。
- ITU-R 勧告 SM.1541 には、OoB マスクの設計目標 (Design objective) が 40 dB/decade と明確にされている (これは 2016 年までに検討することとしているが、検討結果の報告は現時点では無い)。

以上をまとめたものを、不要発射規制値概略図として図1に示す。

2.3 レーダーシステムの不要発射測定法

レーダーシステムの不要発射の測定は ITU-R 勧告 M.1177 に示されているが、この勧告に記されている直接法の測定システムブロック図を図2に示す。

また、本測定システムに使用されるスペクトラムア

ナライザの設定は以下のように記されている。

中心周波数	： SM.329 Table1 で定義された周波数範囲
	※アンテナ系に導波管を使用している場合はカットオフ周波数の 70 % 以下測定不要
周波数スパン	： 0 Hz
掃引時間	： レーダーアンテナの回転周期以上
周波数ステップ	： RBW の値
RBW (分解能帯域幅)	： 1 MHz 以下
	※変調方式による帯域幅。パルス変調の場合 $1/\tau$ (τ はパルス幅)。ただし計算結果が 1 MHz を超える場合は 1 MHz
VBW (ビデオ帯域幅)	： RBW 以上

以上のような M.1177 に記載の内容に準拠して、測定装置の開発・整備を行った。

3 M.1177 に準拠した測定装置開発

レーダーシステムの不要発射の測定方法を規定する

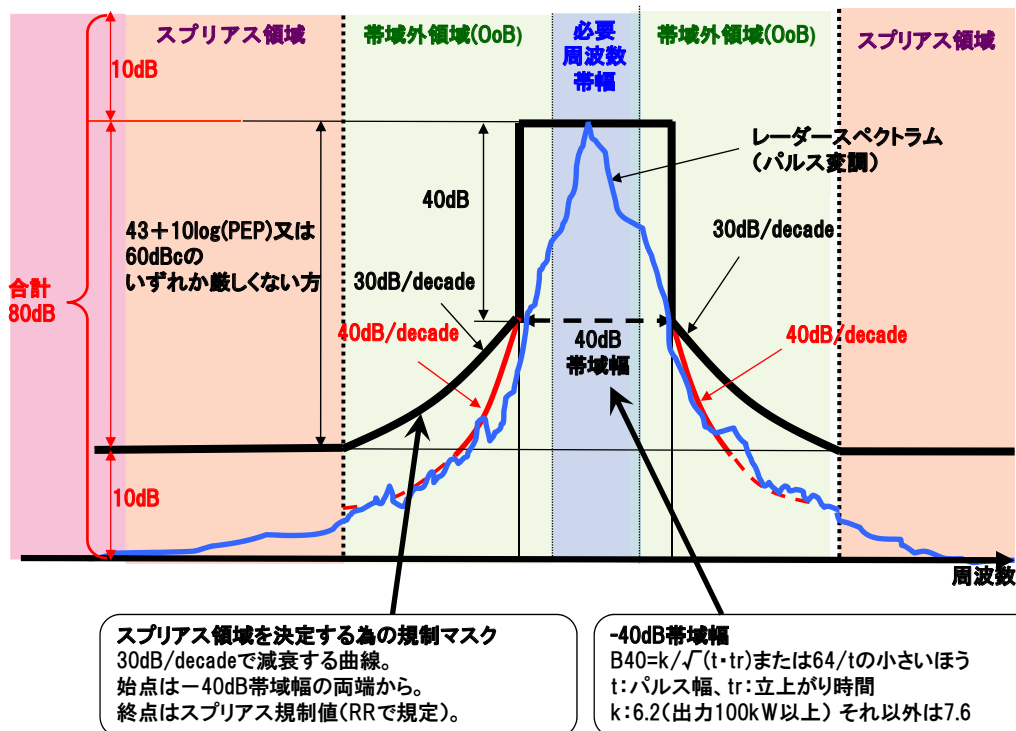


図1 レーダーシステム (パルス変調) の不要発射規制値概略図

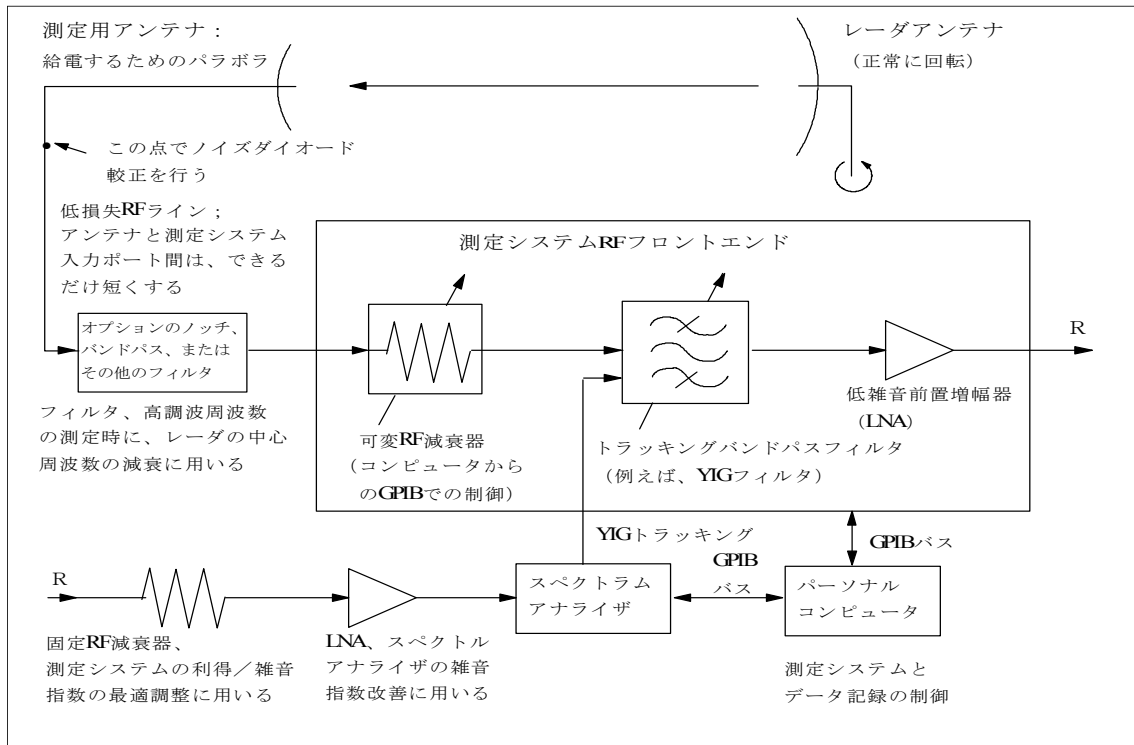


図2 測定システムブロック図

M.1177では、図1にあるように、80 dB以上の測定ダイナミックレンジを要求している。

しかしながら、現有するスペクトルアナライザにおいて測定条件を設定すると(中心周波数=9 GHz、RBW = 1 MHz、VBW=1 MHz)、60 dBを若干上回る程度のダイナミックレンジを確保するのが限界となる。したがって、このようなスペクトラムアナライザを使用して80 dB以上のダイナミックレンジを確保するためには、図2に示されているようなスペクトラムアナライザの前段に置かれるRFフロントエンド部などが重要となる。RFフロントエンド部では、スペクトラムアナライザに入力される信号レベルを調整し、受信系の雑音指数の改善を図り、測定対象以外の周波数成分による受信系飽和を防止して、測定器系全体として測定ダイナミックレンジを拡大する目的がある。具体的には、RFフロントエンド部分としては、以下のような機能を持つ部品・システムを準備する必要がある。

- (1) バンドリジェクションフィルタ (BRF) もしくはバンドパスフィルタ (BPF) による帯域制限
- (2) LNA (Low Noise Amp) による信号増幅
- (3) ATT (Attenuator) による YIG (Yttrium Iron Garnet) フィルタ、LNA などへの最適入力電力制御

(1) の BRF あるいは BPF は、測定するスペクトラムに帯域制限をかけることで、スペクトラムアナライザなど測定系に入力される総電力を制限することを目的としている。また、(2) の LNA は測定系の雑音指数の改善、(3) は YIG フィルタや LNA、スペクトラムアナライザへの入力を最適に調整し、測定結果にひずみが出ないように調整することを目的としている。

これらの機能を実現するために YIG、LNA、ATT によるフロントエンド(広帯域 YIG BPF ユニット)の開発を行った。開発した測定装置の主な仕様は以下のとおりであり、その概略ブロック図を図3に示す。

【開発した測定装置の主な仕様】

対応周波数	: 1~ 28 GHz (~ 40 GHz まで拡張可能)
BPF ユニット対応周波数	: 1~ 28 GHz (6 バンド構成)
BPF ユニット帯域幅	: 100 MHz 以下
AMP 帯域利得	: 35 dB 以上
入出力端子	: APC3.5 型 (f) コネクタ

開発した測定装置(図4)は、制御用コンピュータによって M.1177 に準拠した方法でレーダーのスプリアス測定を行うことが可能であり、開発したフロントエンド部を用いることにより、約 100 dB のダイナミックレンジを実現した。

図5は図4を用いて船舶用レーダーのスペクトラム

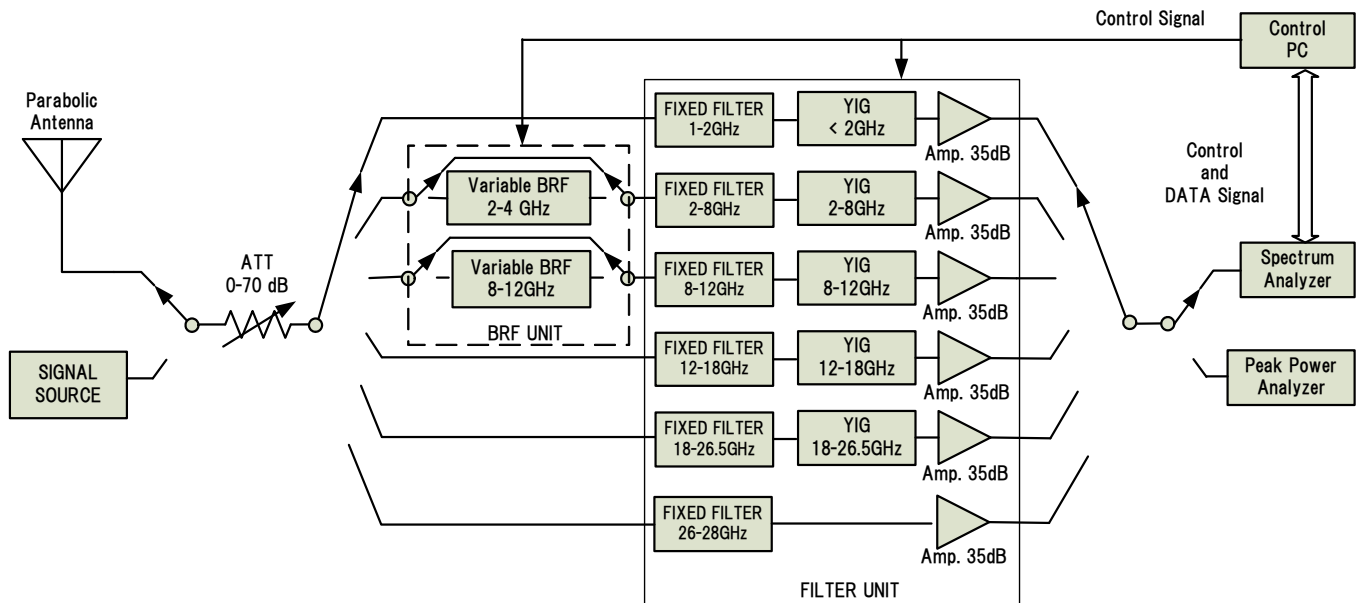


図3 開発した測定系ブロック図



図4 開発した測定装置 (RF フロントエンド部) の外観

を測定した結果の一例である。なお、図5の被測定レーダー（船舶用レーダー）で使用されているマグネトロンは、不要輻射対策未対応品である。よって、現時点で販売されている船舶用レーダーのスペクトラムより不要発射が多い結果となっている。

4 高速測定装置の開発

先に述べたように M.1177 では、遠方界条件を満足する測定サイトでアンテナからの放射電力を測定することが求められている。さらに、測定装置（スペクトラムアナライザ）の設定条件が「測定帯域幅（RBW）はパルス幅を τ として $1/\tau$ （最大で 1 MHz）、スパン 0 Hz でアンテナの 1 回転以上の間、受信電力の最大

値を記録し、測定帯域幅のステップで規定の測定周波数範囲（例えば、X-band レーダーの場合、30 MHz～26 GHz）の測定を行う」であることを考慮すると、24 rpm で回転する X-band レーダーでは通常約 22 時間の測定時間が必要とされる。そのため、測定中に発生する電波環境の変化、天候（温度・湿度）変動による伝搬特性の変化などが測定結果に影響を及ぼすことが懸念される。これらの M.1177 測定方法の問題を解決する方法のひとつとして、測定時間の短縮が考えられる。

M.1177 直接法におけるスペクトラムアナライザの RBW 設定は、パルス幅が τ の場合には $1/\tau$ で最大で 1 MHz となっているが、M.1177 について検討した ITU の作業部会では、測定時間を短縮する手段として、より広い RBW を採用できるのではないかと意見もあった。そこで、NICT でも M.1177 の規定値より RBW を広くした場合の測定誤差について、シミュレーション及びレーダー波のスペクトラム測定を実施することにより検討を行ったが、使用する RBW によってメインローブとサイドローブの測定値の差が異なる場合があり、その測定誤差を 0.5 dB 程度とするには $RBW < 1/(4\tau)$ の条件にしなければならないことを確認している [5]。一例として、マグネトロンを使用した船舶用レーダーシステムを動作させ、スペクトラムアナライザの RBW の設定値を変化させて測定したスペクトラムの結果を図 6、7 に示す。不要発射測定の高速化には、単に RBW を広げるだけでは問題があり、さらに精度良く測定することを考えると、現状の規程より更に RBW を狭くすることが必要である。

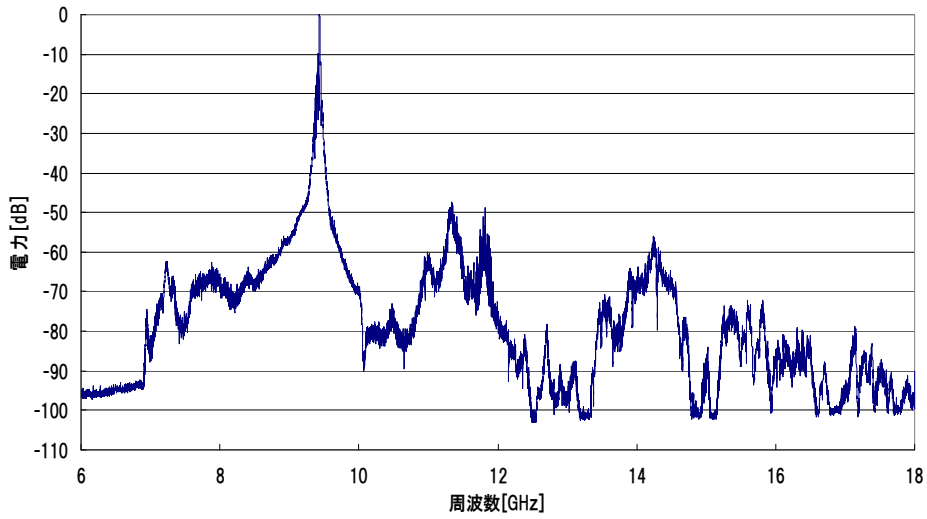


図5 測定結果例 (基本波ピーク電力で正規化したマグネトロンレーダーのスペクトラム)

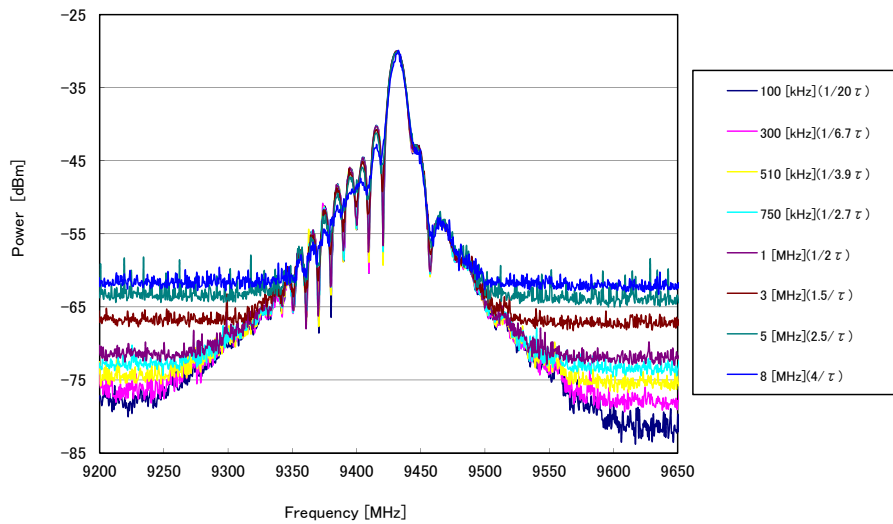


図6 レーダーシステムのスペクトラムの例

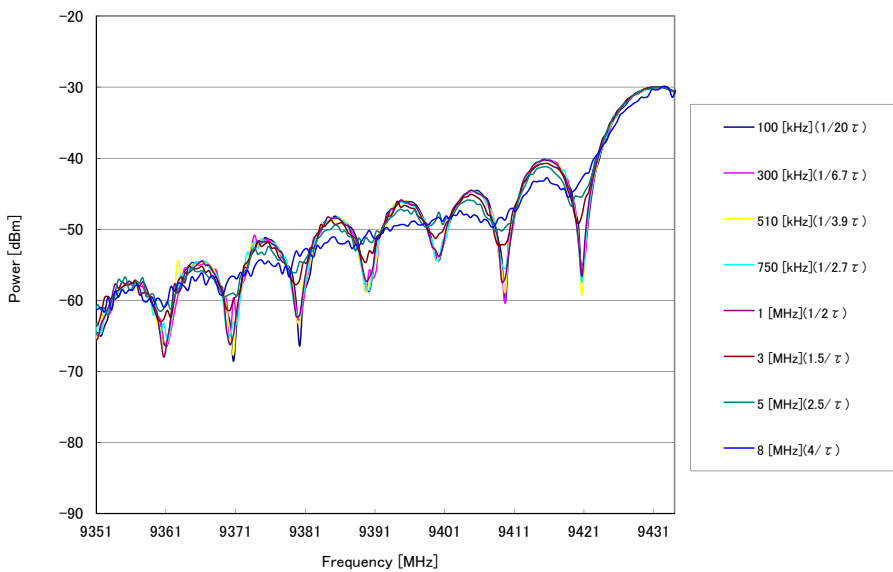


図7 中心周波数以下のスペクトラム拡大

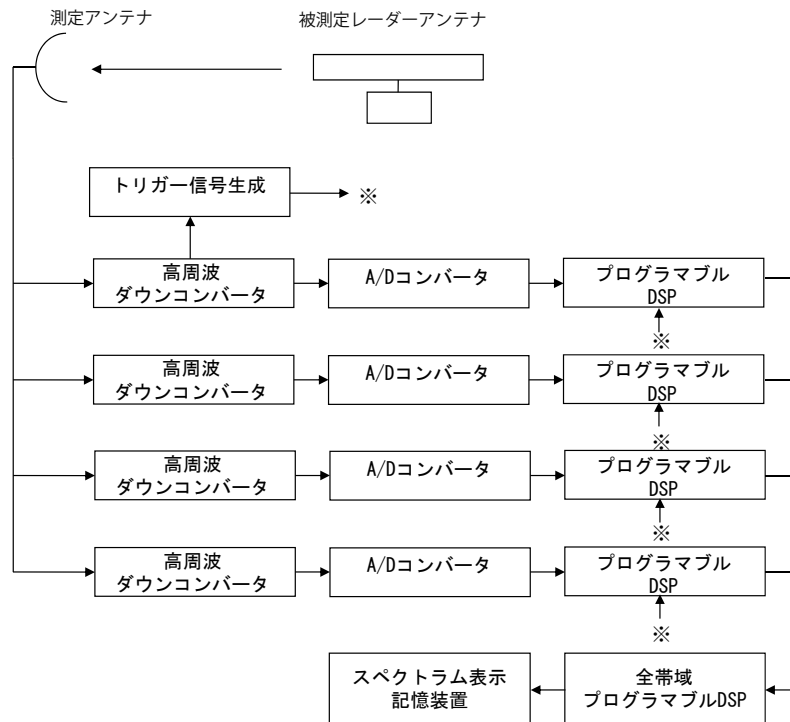


図8 マルチチャンネルプログラマブルDSPによる高速測定方式

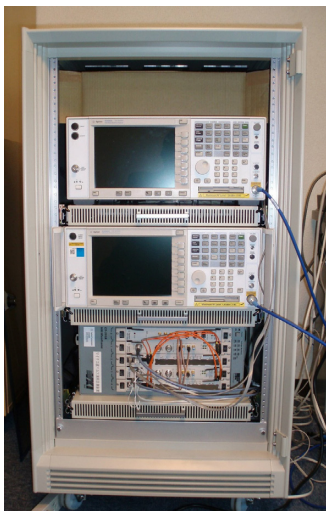


図9 開発した高速測定装置の外観(2チャンネル構成時)

となる信号と不要波(外来波など)との区別を設定する機能も考案し、不要発射高速測定装置として開発した。開発した高速測定装置(図9)の特徴は以下のとおりである。

- プログラマブルDSPによる並列フィルタとMAXホールド機能による高速測定。
- 被測定レーダーのパルス幅、パルス繰返し周波数、パルス最大レベルの情報から測定対象信号に同期して外来不要波を除去可能。
- マルチチャンネル化による基本周波数の常時監視により、基本周波数のピーク電力と不要発射の相対値を常時測定可能。
- マルチチャンネル化により周波数帯域を分割同時測定することで更なる高速測定が可能。

この結果は測定時間が更に必要ということになるので、この結果も考慮しRBWの設定はM.1177の最新版でも最大1MHzとなっている。

そこで図8に示すような、高周波ダウンコンバータ、A/D変換、規定された帯域幅(規定されたRBW)のフィルタを複数並列して実装したものと同様な信号処理(FFT演算等)を実施するプログラマブルDSPとMAXホールド機能を使用し、一度に測定する周波数帯域幅を広げることで高速測定する方法を考案した[6][7]。また、受信信号の処理を到来電波に同期(被測定レーダーの繰返し周波数に同期)する機能、信号レベルや周波数情報を解析機能など付加もし、測定対象

図10に、M.1177による従来の測定方式による測定結果と、高速測定方式に基づいて開発した装置による測定結果の比較を、基本波近傍について示す。高速測定装置は、従来の測定方式に比較して大幅な測定時間短縮を達成した(プログラマブルDSPにより1チャンネルあたり1MHz幅のフィルタを並列に32個構築し、3チャンネルのマルチチャンネル構成により約1/60の時間短縮可能。ただし、1チャンネルはキャリアセンスに使用)。また、基本波近傍においては、従来方式と高速測定方式の測定結果の差異は約1dB以内に留まり、良く一致することが確認された。

以上のように、プログラマブル DSP による高速測定方式はレーダーの不要放射測定に有用であることが明らかになった。特に、前述した RBW が与える測定結果への影響からわかるように、測定精度を向上させるためには $RBW < 1/(4\tau)$ の条件を満足することが望まれており、従来方式では更に長い測定時間が必要となるが、高速測定方式はこのような場合にも有効な方式といえる。

一方で、開発した高速測定装置には以下のような課題も見つかっている。

- (1) 高周波ダウンコンバータ部のダイナミックレンジ不足
- (2) 到来電波同期システム(被測定レーダーのパルス繰返しへの同期機能)の同期外れ(受信系最高クロック周波数に起因する時間分解能不足)

いずれの課題も、開発当時に入手可能であったハードウェア性能の限界に起因している。これらの課題を解決するためには、システム全体のレベルチャートの見直しとともに、高周波ダウンコンバータ部の性能改善(ダイナミックレンジの向上など)を行うほか、アンテナの1回転以上の時間にわたって受信系を完全同期させるための新たな方法・技術を開発する必要があると考えている。

5 まとめ

2003年のWRCによりレーダーシステムについてもスプリアス放射の許容値が改正され、スプリアス放射も含めた不要放射の測定方法が変更になったことか

ら、2005年に国内電波法(無線設備規則)も改定された。NICTでは国内でもITUの勧告に従った不要放射測定ができるように測定系を整備し、さらに測定法の改善を進めてきた。その結果、不要放射測定装置としては、測定ダイナミックレンジ100dB程度を確保し、レーダーシステムの不要放射の測定法を示したITU-R勧告M.1177に準拠した測定装置を開発することができた。また、M.1177の測定法では測定時間が長時間になってしまう問題に対しては、高速測定装置の検討を進めてきたが、不要放射の高速測定が技術的に可能であることの見通しをつけた。

しかし、これまで実施してきた不要放射測定法の開発からは、主に以下の5つの課題が出ている。

- (1) 測定装置の小型・軽量化
- (2) 遠方界条件を満足する測定距離の確保
- (3) レーダーのアンテナパターンを考慮しマルチパスを抑制した測定サイトの確保
- (4) 高速測定装置のより広いダイナミックレンジの確保
- (5) 外的環境による影響を極力抑えるための測定時間の短縮

この中で(1)については、図3、4からわかるように、整備した測定装置は19インチラック一本では収まらず、持ち運びが非常に困難な大きさ・重量となっている。レーダーシステムは測定サイトに持ち込めない(設置場所から移動できない)物もあることから、設置されている場所に測定装置を移動して測定できるようにしていくことも考慮していかなければならない。そのためには小型・軽量化の必要があると考えている。

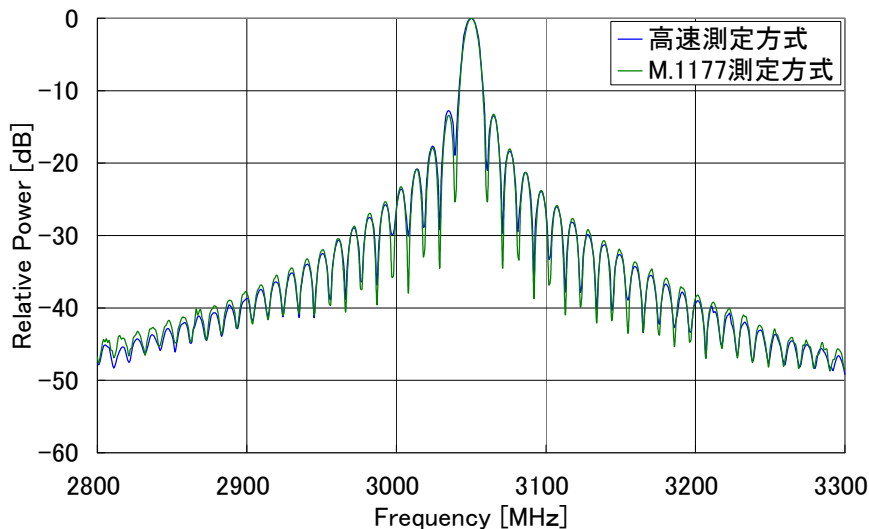


図 10 M.1177 と高速測定装置の測定結果(基本波近傍)

(2)と(3)については、条件を満足する測定サイト(測定場所)の確保が必要である。これまで数年にわたり長期的に占有できる測定サイト候補地の調査や選定作業等を行ってきたが、様々な制約により、いまだ測定サイトの確立には至っていない。レーダーのスプリアス測定には遠方界条件を満足する測定サイトと、(4)に記したような広いダイナミックレンジを有する測定システムが必須条件である。また、最近では船舶用レーダーにおいても固体素子レーダーの技術基準が実施段階にあり、発振素子の固体素子化による出力の低下、それに伴う測定系の受信電力低下によるダイナミックレンジ不足も課題となってきた。さらに、屋外測定サイトでの長時間測定は電波環境の変化など、測定精度を低下させる要因が多く存在する。これらの不要発射測定への影響をできる限り小さくするためには、(5)のように測定時間を短縮する手段を検討することも、今後の課題と考えている。

謝辞

本研究成果は、総務省からの受託研究「電波資源拡大のための研究開発」の成果である。

【参考文献】

- 1 ITU-R Radio Regulations, edition of 1998, 2001,2004,2008
- 2 Recommendation ITU-R SM.1541-6 (Unwanted emissions in the out-of-band domain), Aug. 2015
- 3 Recommendation ITU-R M.1177-4 (Techniques for measurement of unwanted emissions of radar systems), April 2011
- 4 Recommendation ITU-R SM.329-12 (Unwanted emissions in the spurious domain), Sept. 2012
- 5 瀬端好一, 宮澤義幸, 北沢弘則, 塩田貞明, "レーダースプリアスの測定技術の開発," 情報通信研究機構季報, vol.52, no.1, pp.49-58, 2016
- 6 国立研究開発法人情報通信研究機構、レーダースペクトラム計測装置、特許第 4893988 号
- 7 国立研究開発法人情報通信研究機構、レーダースペクトラム計測装置、特許第 4893989 号

北澤弘則 (きたざわ ひろのり)

電磁波研究所
電磁環境研究室
専門調査員
EMC 測定、レーダー技術、電波計測

塩田貞明 (しおた さだあき)

電磁波研究所
電磁環境研究室
主任研究技術員
EMC 測定、レーダー技術、電波計測