

3-4 レーダースプリアスの測定技術の開発

3-4 Development of the Measurement Technology of the Spurious Emission from Primary Radar

瀬端好一 宮澤義幸 北沢弘則 塩田貞明

SEBATA Kouichi, MIYAZAWA Yoshiyuki, KITAZAWA Hironori, and SHIOTA Sadaaki

要旨

ITU-R では、電波の有効利用を図ることを目的に不要な電波の発射をできる限り低減することを決議し、レーダースプリアス発射に関して、アンテナ端の測定ではなく、アンテナからの輻射電磁界を測定することを条件とした、新たなスプリアス規制を勧告している。

情報通信研究機構 (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を目的に研究開発を進めている。これまでの検討の概要及び成果について報告する。まず、ITU-R 勧告の測定法である M.1177 の測定条件を満足する測定サイト構築のために、サイト候補地の電磁環境調査及びレーダー測定実験を実施した。また、測定システムに関連し検討を行い、ITU-R 勧告 M.1177 で求められるダイナミックレンジ及び測定距離に関する条件 (遠方界条件) を満足する必要があること、レーダーアンテナを回転して測定する必要があることを確認した。一方、測定に使用する受信機の分解能帯域幅 (RBW) に関しては M.1177 で規定する値 ($1/\tau$: τ はパルス幅) では不十分であり、測定結果の誤差を少なくするためには、 $1/(4\tau)$ 以下の RBW が必要であるという結果が得られた。

To consider the effective use of the frequency, ITU-R recommends to reduce the unwanted emissions as low as possible. With regard to the measurement method of the spurious emission of Radar, new spurious recommendation requires to measure the spurious emissions which are radiated from the radar antenna.

NICT has been conducting the research and development to establish the measurement site in Japan and to improve the performance of the measurement system. This paper reviews our activities on the project at this moment. In order to construct the measurement site which satisfies the requirement of M.1177, we have surveyed the proposed site in Japan and measured the their electro-magnetic environment. Radar spurious emission experiments were also conducted at each site to select the best candidate for the site. With regard to the measurement system, theoretical evaluation using simulation technique and an experiment was performed. From our investigation, the following conclusions were obtained: The requirements in M.1177 for dynamic range, the measurement distance (far field condition) and the measurement condition of rotating antenna under test are reasonable and must comply. Resolution bandwidth (RBW) of the receiver, however, in the M.1177 is not sufficient and must be narrower than the $1/4\tau$ (τ : pulse width) to decrease the measurement error.

[キーワード]

不要輻射, スプリアス, 国際電気通信連合, M.1177, レーダー
Unwanted emission, Spurious emission, ITU-R, M.1177, Radar

1 まえがき

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 (国際通信連合) では、不要輻射及びスプリアス発射についての規制値を 1997 年に改訂し、2003 年から適用することを求めている [1]。

国内では 2005 年 12 月から法令が改正され、

現行より厳しい規制値が適用されている(ただし、2年間の移行期間が認められている)。一次レーダーについては、他の通信機器と違い帯域外領域とスプリアス領域を確定するために下記のような抑制マスク(-20 dB/decade: 図1の太線参照)を設けることによって規制を行うこととしている。

レーダーシステムの不要輻射測定法としては、ITU-Rで提案されたITU-R勧告M.1177の測定方法を使用して測定することが求められている[2]。

M.1177においては、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算出する方法)の2種類が規定されている。間接法を用いた測定の場合、測定すべき全周波数範囲にわたって別々に測定したアンテナ特性及び送信機を併せて補正したとしても、送信機によっては負荷変動により発振の状態(スペクトラム)が変化し、正確な測定ができない。このため、現時点では、直接法の使用が主流となっている。

M.1177では、測定に必要なダイナミックレンジが70 dB以上であることを要求しており、直接法では測定条件としてアンテナの遠方界条件($((2 \times D^2) / \lambda)$ {D: 被測定アンテナの長さ, λ : 波長} 船舶用レーダーで数百 m、気象用レーダーで数 km)を満たし測定することを規定している。このことから考えると、M.1177に従って測定を行うには、十分な測定ダイナミックレンジを確保できる測定システム、アンテナの遠方界条件を満足する測定場所(測定サイト)の2点が重要なポイントとなっている。

NICTは、平成16年度から総務省の委託により国内で施行される新たな規制に対応するレーダースプリアス測定法の開発を行っており、国内における測定サイトと測定システムの確立などを目的に様々な調査・検討を実施してきた。現時点では遠方界測定が可能なサイトは世界中でも英国QinetiQ社と米国NTIA(National Telecommunications and Information Administration)の2か所だけであることから、2004年10月にはNTIAのサイトにおいてレーダースプリアス測定実験をNTIAのメンバーと共同で行った。

これまでの調査・検討結果より、ITUの勧告M.1177に示された測定法に従いレーダースプリアス測定を行うには、測定サイトの面から考えると、現在NICT(小金井)で所有している測定サイト(オープンサイト)では「測定に必要な距離が足りない」「外来電波の影響が大きい」などの理由により正確な測定が困難であるという結論に至った[4][5]。

そのため、日本国内での測定サイトを構築することが求められ、測定サイト設置可能な場所の調査を進めているところである。

一方、測定システムについては、測定ダイナミックレンジの確保(70 dB以上)が重要課題であり、それをクリアするための方法を検討中である。現在は、基本波(中心周波数)のみを抑える可変帯域減衰フィルタ(V-BRF)とローノイズアンプ(LNA)を組み合わせることによって、スペクトラムアナライザに入力される電力レベルを適正にコントロールしながらダイナミックレンジを拡張する方法などを検討しているところである。

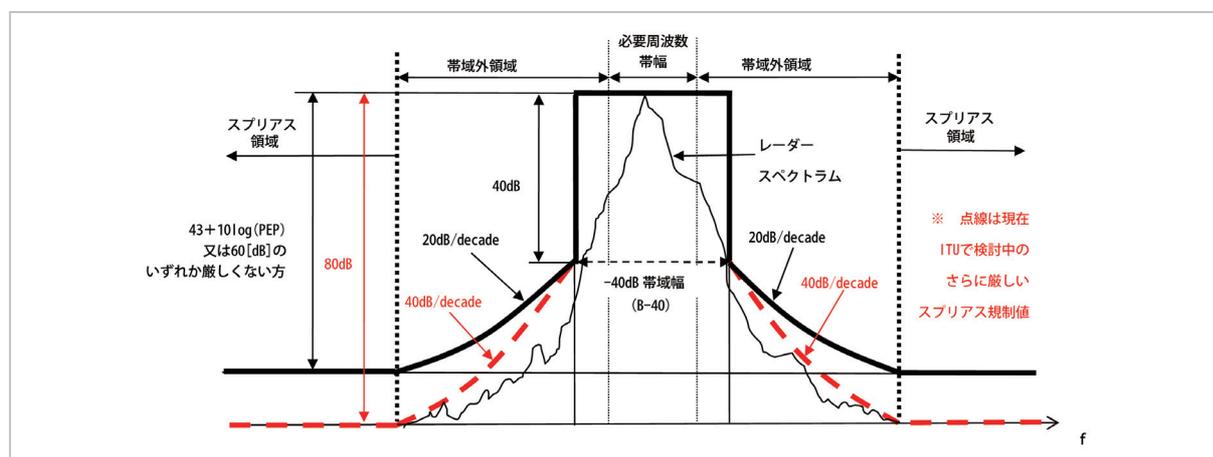


図1 帯域外領域とスプリアス領域

本文書では、M.1177 に従いレーダースプリアスの測定を行う場合に考慮すべき事柄について、前述したポイントとなる **2** 及び **3** の二つの面から、現時点での調査・検討結果を記す。

2 測定サイト

測定サイトを検討するに当たり、現時点で NICT が保有している測定サイト (小金井オープンサイト) 使用の可能性、国内の他の場所にサイトを構築できるかの可能性について以下のような調査・検討を行った。

2.1 測定距離についての検討 (遠方界条件の必要性)

ITU-R 勧告 M.1177 では、測定条件の一つとしてアンテナの遠方界条件を満たすことを要求している。現在 NICT が保有している測定サイトは最大測定距離 100 m であり、このサイトにおいて遠方界条件を満たすことのできないレーダースystem が多数ある。そこで、遠方界条件の必要性を確認するため、遠方界条件を満たす場合と満たさない場合に得られるスペクトラムの違いについて確認する実験を行った。

実験は、アンテナの遠方界を満たして測定が行えるサイトは世界中でも英国 QinetiQ 社と米国 NTIA の 2 か所だけであるため、米国 NTIA の測定サイトにて行った。

測定は ITU-R 勧告 M.1177 の直接法に従いスペクトラムアナライザの測定は 0 スパン、RBW ($\approx 1/\tau$) ステップ、スイープ時間はアンテナ 1 回

転にかかる時間以上とした。NTIA の保有している測定システムブロック図を以下に示す (図 2)。

同一のレーダー (ここでは船舶用レーダー S-band 30 kW PON スロットアンテナ 4.2 m) について、遠方界条件を満たす条件と満たさない条件についてスペクトラムの測定を行った。以下に、得られたスペクトラムを示す (図 3)。

データから分かるように、遠方界を満たさない場合 (約 100 m) と遠方界を満たす場合 (約 360 m) では得られるスペクトラムに明らかな違い (2 倍波で約 11 dB の差。3 倍波で 14 dB の差) が見られた。この結果より、遠方界条件を満たさない場合は、スプリアスを過小評価するおそれがあることが分かる。

2.2 国内測定サイトの調査

2.1 でも示したように、測定サイトを設置する上では遠方界条件を満たすことが必要であることが確認された (図 3 参照)。

よって、国内における新たなサイトの構築が必要となり、以下の条件で検討を行った。

- ① 電磁環境ができるだけ静かな場所。ITU-R SM329-10 [3] で勧告された周波数範囲 1.5 GHz (S バンド導波管の遮断周波数) ~ 26 GHz (X バンドの測定周波数範囲) においてスペクトラムアナライザで観測されるノイズ以下であること。
- ② 周囲に他の無線設備などがいないこと。レーダーは大電力のものが多いため、他の無線設備への相互干渉。
- ③ 遠方界条件を満たすことができる距離が確保

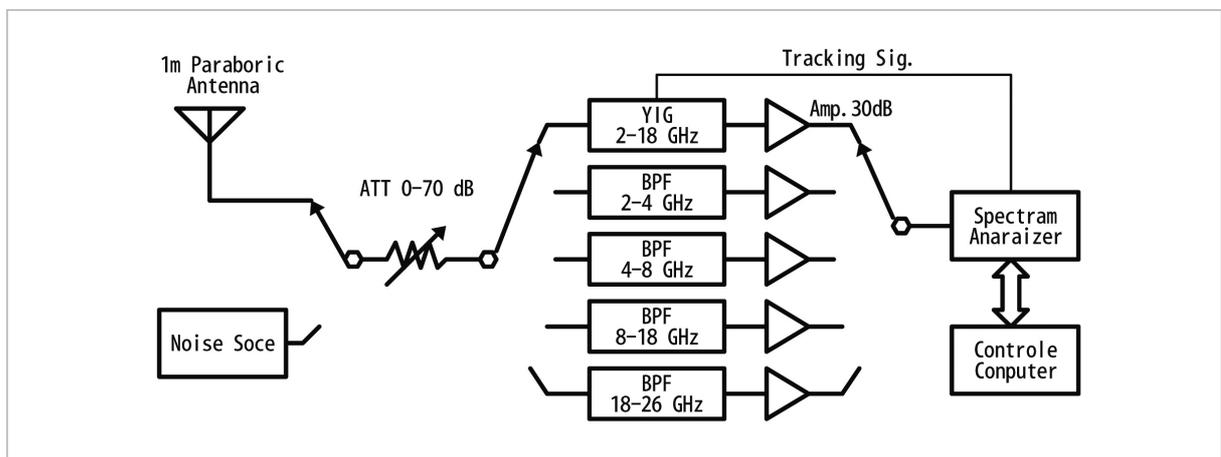


図2 測定システムブロック図

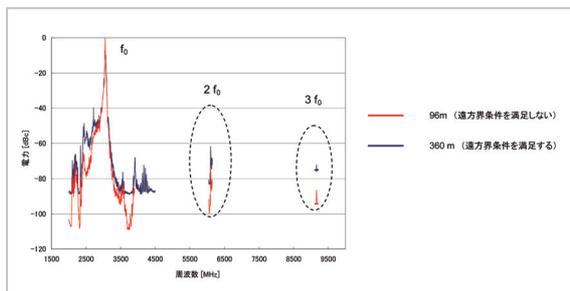


図3 アンテナの遠方界を満たす場合と満たさない場合での得られるスペクトラムの違い

できること。距離は約 360 m 以上 (S-band 4.2 m のスロットアンテナを考慮)。

- ④ 大地からの反射などマルチパスの影響が少ないこと。M.1177 では被測定アンテナを垂直・水平方向に $\lambda D/2H$ (H : 送信点の高さ、 D : 測定距離、 λ : 波長) 移動したとき、3 dB 以下の変動と定義。
- ⑤ できる限りアクセスの容易な場所。

以上のことを考慮し、測定サイト候補地の机上調査を行い数か所の候補地を挙げ、その場所において電磁環境調査を行った。

2.2.2 電磁環境調査

日本国内において測定サイト候補地を事前に調査し、その中で最も適切と考えられる場所 3 か所において、電磁環境を調査した。電磁環境の測定は、実際にレーダーのスペクトラムを測定する際に使用するアンテナ、スペクトラムアナライザ等の測定系(図 4 参照)を測定場所に設置し、アンテナのビーム方向を被測定装置が設置される予定と

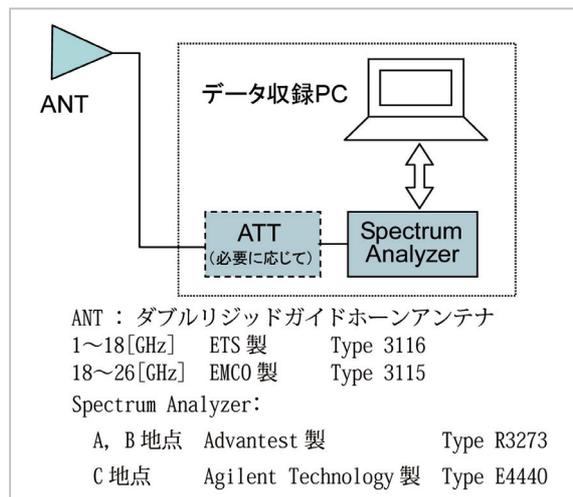


図4 電磁環境の測定システム

なっている方向に向けることで行った。

スペクトラムアナライザの分解能帯域幅 (RBW 及び VBW) の設定は、M.1177 では「 $1/\tau$ (τ : パルス幅) を採用するが、その結果が 1 MHz 以上となる場合は 1 MHz とする。」としている。今回ターゲットとしている船舶用レーダーの場合、最小パルス幅は 80 ns 程度のシステムがほとんどであるので、ここではすべて分解能帯域幅は 1 MHz とした。トレースは MAX HOLD モードにし、長時間に測定を行った。

上記の条件で各サイトの概要及び電磁環境の測定結果は以下のとおりである。

A 地点

測定サイト候補地 (A 地点) は携帯電話の影響がない山間の畑の一角である。送信部 (レーダー) は山裾に位置し、背後は藪である。受信部 (測定車) は段々畑を 2 段ほど下がったところに設置されている。送受信部間は、距離約 500 m、高度差約 10 m (送信アンテナ高 7m、受信アンテナ 10 m を含む) である。このサイト予定地点の電磁環境は -60 dBm 以下 (1 GHz~26 GHz) であった (図 5 参照)。

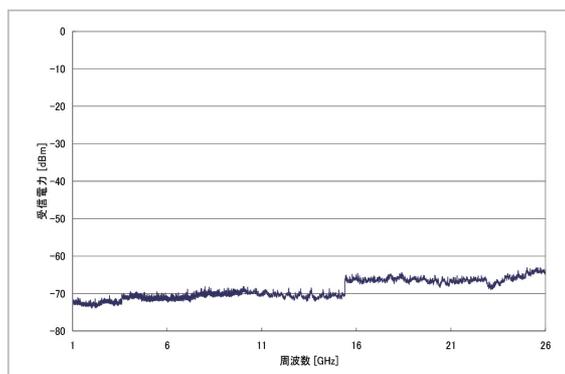


図5 A 地点の電磁環境測定結果

B 地点

測定サイト候補地 (B 地点) は携帯電話の影響がない山中で、V 字型の溪谷を挟んで北側は雑木林 (受信部側)、南側は狭い畑地 (送信部側) である。送信部は畑地の一角に設置され、受信部は林道脇の木立を切り開いた空き地に設置されている。送受信部間は距離約 500 m で間は谷になっている。このサイト予定地点の電磁環境は -60 dBm 以下 (1 GHz~26 GHz) である (図 6 参照)。

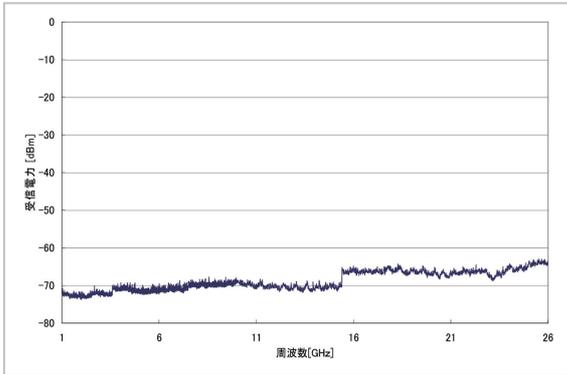


図6 B地点の電磁環境測定結果

C地点

測定サイト候補地(C地点)は、A地点、B地点に比べて比較的アクセスの良い、市街地の中心部から外れた場所である。高速道路と国道に囲まれた場所ではあるが、ほぼ平坦な広大な草地(300 m×300 m:旧農業試験所)となっている。送受信間は、距離約100 m、高度差ほぼ0 m(送信アンテナ高4 m、受信アンテナ6 mを含む)である。このサイト予定地点の電磁環境は-57 dBm以下(1 GHz~26 GHz)であるが、1~3 GHzに携帯電話などの電波が確認された(図7参照)。

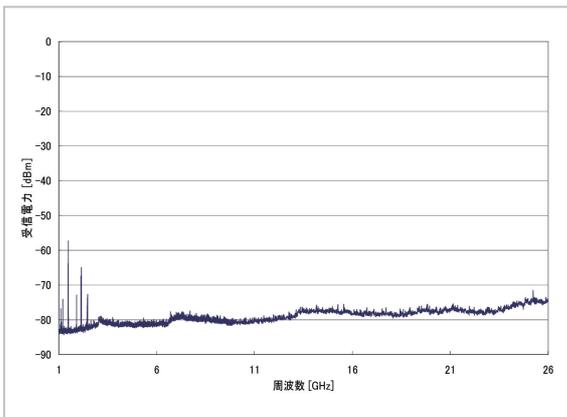


図7 C地点での電磁環境測定結果

2.3 レーダースプリアス測定実験

A~C地点のそれぞれの場所に、実際にレーダーを持ち込み、そのスペクトラムの測定を行った。今回は、中心周波数付近のスプリアス(図1に示された部分)のみに着目して測定を行った。測定法はM.1177による(図11参照)。

実験に使用したレーダー(X-band Marine Radar)

の仕様は以下のとおりである。

電波の形式:P0N、尖頭出力:25 kW、中心周波数:9410 MHz、最小パルス幅:公称60 ns、アンテナ:4 ft(このシステムの遠方界は96 m以上となる)。

測定サイトで使用した設備の写真を以下に示す。



図8 被測定レーダー



図9 実験車(受信点側)

電磁環境調査に基づいて選定されたA地点、B地点及びC地点において、実際に船舶用レーダーを用いて測定実験を行い、得られたデータを米国NTIAのサイトにおいて測定した結果と比較し

た。

実験時の測定点と被測定レーダーの間の距離は、地形の都合により A 地点は 450 m、B 地点は 550 m、C 地点は 100 m となっている。

比較は、各サイトにおいて得られたスペクトラムデータ（周波数範囲 9~9.7 GHz）を、ピーク電力を基準にして正規化して、それぞれのエンベロープを比較することにより行った（図 10 参照）。

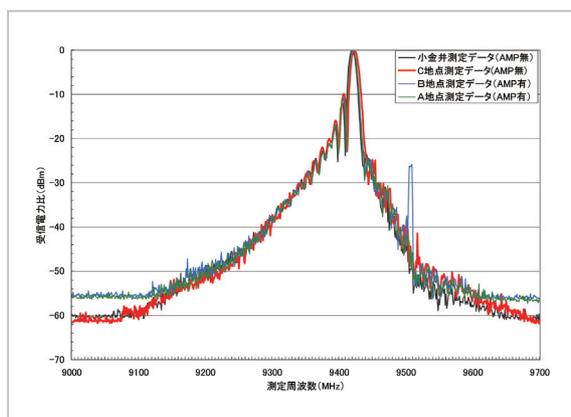


図 10 異なるサイトにおけるレーダースプリアス測定結果

以上の結果から、以下の事が確認できた。

- ① 最大測定レベルから約 -40 dB までの測定値には大きな差違はなく、いずれの候補地においても測定データのスペクトラム形状の再現性がある。C 地点における測定データは中心周波数が他の測定地と異なり少し高めの周波数にシフトしているが、これは発振源であるマグネトロン特性によるもので、測定時の外気温が低温であったためである。
- ② -40 dB 以下の測定データはいずれの候補地においても変動があり、測定場所の地形等の要因（マルチパスの影響など）によるものと考えられる。
- ③ 急激に受信電力が高くなっているなど、外来電波の混入と思われるスペクトラムが測定結果の数か所に表れている。航空機に搭載されているレーダーなどの影響によるものと思われるが、更に調査する必要がある。原因が航空機などと特定できれば、航空機の飛来を監視するなどの方法により、この影響はなくなることができると考えられる。

マルチパスの影響などを考慮した場合、送信点と受信点との高度差はできるだけ少ない方がよい

と思われる。今回の候補地はいずれにおいても高度差が存在しており、現状のままでは -40 dB 以下の微細な信号を安定的に測定するための障害となる。特に立木等の障害物が多い候補地（A 地点、B 地点）では影響が出ていることが確認できる。しかし、この点については微弱な信号であるため、信号レベルの変動の原因を更に調査する必要がある。

3 測定システム

スプリアス測定法・装置を検討するに当たり、現時点で NICT が保有している測定システムの実力、M.1177 で測定方法も含めた測定システムに要求されている項目についての妥当性など、検討を行っている。今まで行った検討結果の概略を以下に示す。

3.1 測定システムの確認

NICT のスプリアス測定システムを以下に示す。

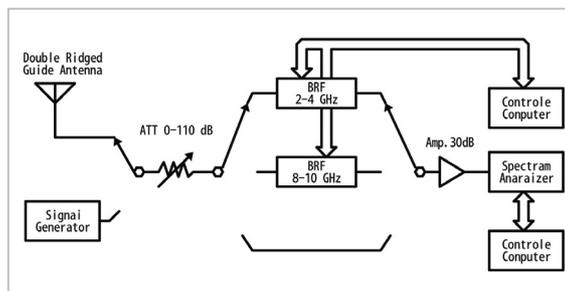


図 11 NICT スプリアス測定システム

この測定システムで得られたスペクトラム（NICT 測定サイトで測定）と、NTIA 測定システム（図 2）で得られたスペクトラムについて比較を行った。その結果を図 12 に示す。NICT オープンサイトの場合、ダイナミックレンジは 60 dB 程度で、M.1177 で要求されている“80 dB 以上”という値は確保できていない結果となった。その主な原因は、メイン周波数成分を BRF で減衰させても、他の周波数帯域で AMP の混変調が発生したので、AMP への入力を抑えたためである。この結果を受け、現在は AMP に帯域制限をかける、アンテナに高ゲインのものを使用などの改善を行っているところである。

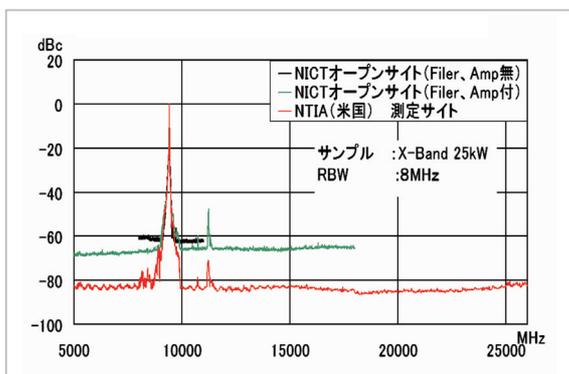


図12 NICTサイトとNTIAサイトのダイナミックレンジ比較

3.2 アンテナ回転の必要性

M.1177 直接法の測定では、スプリアスがアンテナの輻射面に対してどの角度に輻射されるか不明であることから、アンテナを回転させて輻射されたエネルギーを測定することを規定している。しかし、アンテナの回転は一回転するのに数十秒以上かかるレーダーシステムもあり、アンテナの回転時間は測定時間に大きく影響することから、ITUの作業部会などでこの項目を削除する動きがあった。そのため、アンテナを回転させる必要性について確認を行った。

図13にアンテナを回転した場合と、測定アンテナに対し正面(メインビーム方向)に停止した場合の測定データを示す。得られたスペクトラムには明らかな違いがある。この原因としては、スプリアスの輻射方向は基本波の輻射方向とは異なる場合があるためである。よって、アンテナを固定した状態ではスプリアスの正確な値を得ることができないことが確認できた。

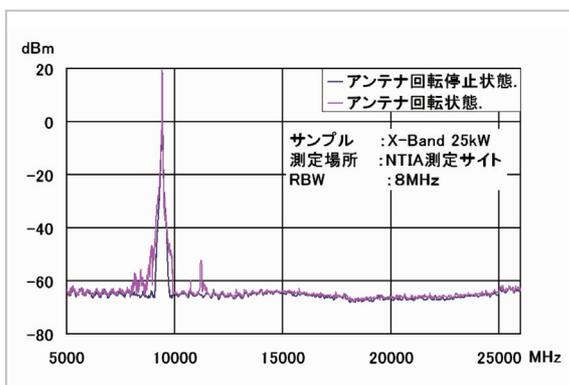


図13 アンテナの回転と停止による輻射特性比較

3.3 RBWによる影響評価

M.1177の直接法における測定装置(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1MHzとしている。その結果M.1177ではスペクトラムアナライザの設定を0スパン、アンテナの回転時間以上の掃引時間、RBWステップで行うことが規定されていることから、 $1/\tau$ の値によっては測定時間が長時間となる。そのため、ITUの作業部会において、測定時間の短縮にはより広いRBWを採用することも可能としたという動きがあったことから、RBWの設定によって得られるスペクトラムの違いについて検討を行った。

3.3.1 シミュレーションによる評価

理想的なIFフィルタにおいて理想的な矩形波を測定した場合のシミュレーション結果を図14、15、16、17に示す。ここでは、パルス幅(τ)=1 μ Sとしている。

図14は完全方形波パルスのスペクトラムである。図15はそれをスペクトラムアナライザで測定したときのスペクトラム波形である。

図16はRBWが100kHz($1/10\tau$)、図17はRBWが1.5MHz($1.5/\tau$)を使用して測定した場合の結果である。シミュレーション結果では、RBWの違いで差が生じ、RBWが1.5MHzの場合の方がサイドローブの値が低下していることが分かる。

同様に、ガウシアンフィルタによる台形波(パルス幅=0.5 μ S、立ち上がり/立ち下がり時間=20nS、パルス繰り返し周期=1000 μ S)を測定した場合のシミュレーション結果を図18に示す。

ガウシアンフィルタによる台形波の測定においてもメインローブとサイドローブの測定値の差がRBWにより異なることが分かる。

3.3.2 測定による評価

3.3.2.1 信号発生器をパルス変調したときの信号源による測定

信号発生器とパルス変調器を使用して発生させたマイクロ波パルスをスペクトラムアナライザに入力し、RBW設定値を変化させた場合において、異なるパルス幅におけるスペクトラム測定結果を図19、20に示す。

信号発生器によるパルスのスペクトラム測定においても、メインローブとサイドローブの測定値

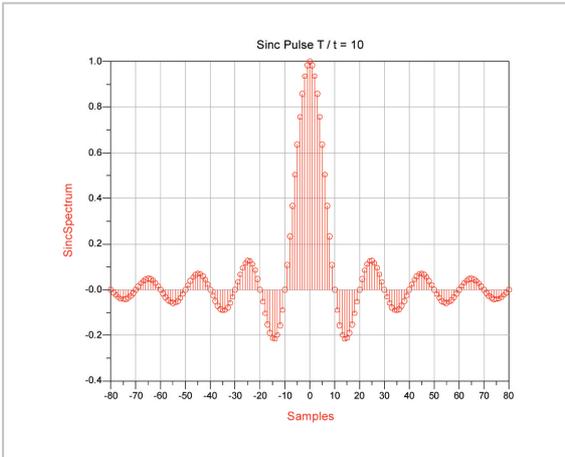


図14 パルス振幅変調されたスペクトラム

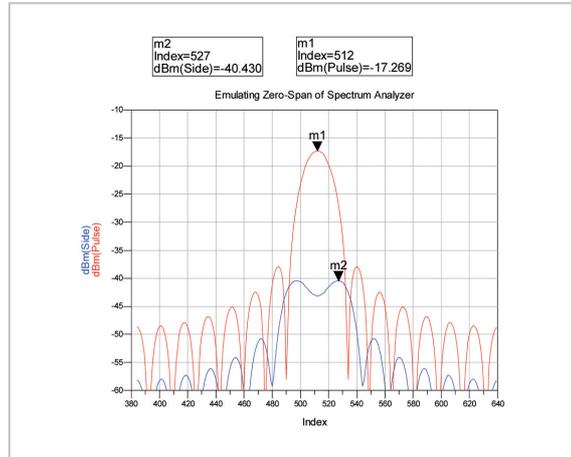


図16 RBWが100kHzの場合のメインローブ m1 とサイドローブ m2 の値の差 (17.9dB)

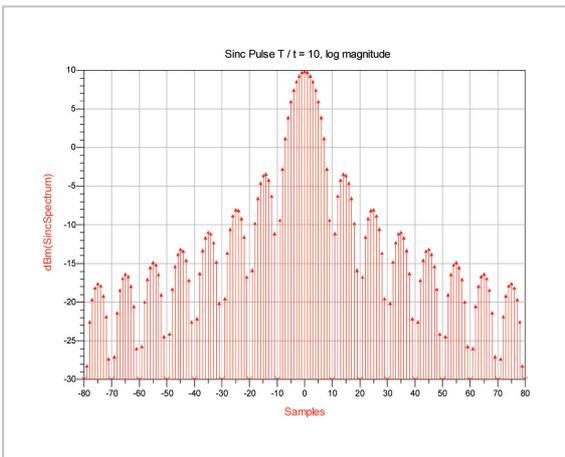


図15 スペクトラムのスペアナ表示波形

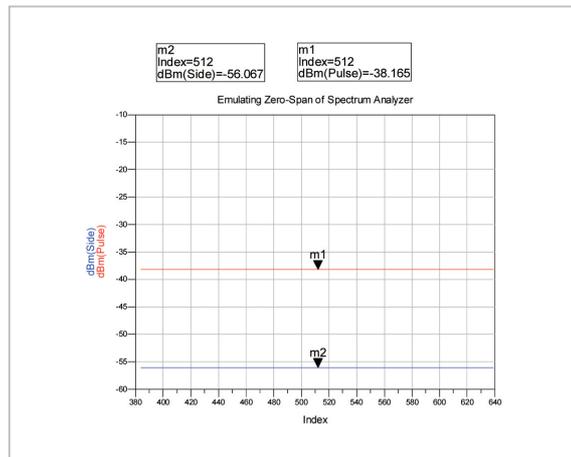


図17 RBW=1.5MHzの場合のメインローブ m1 とサイドローブ m2 の値の差 (23.2dB)

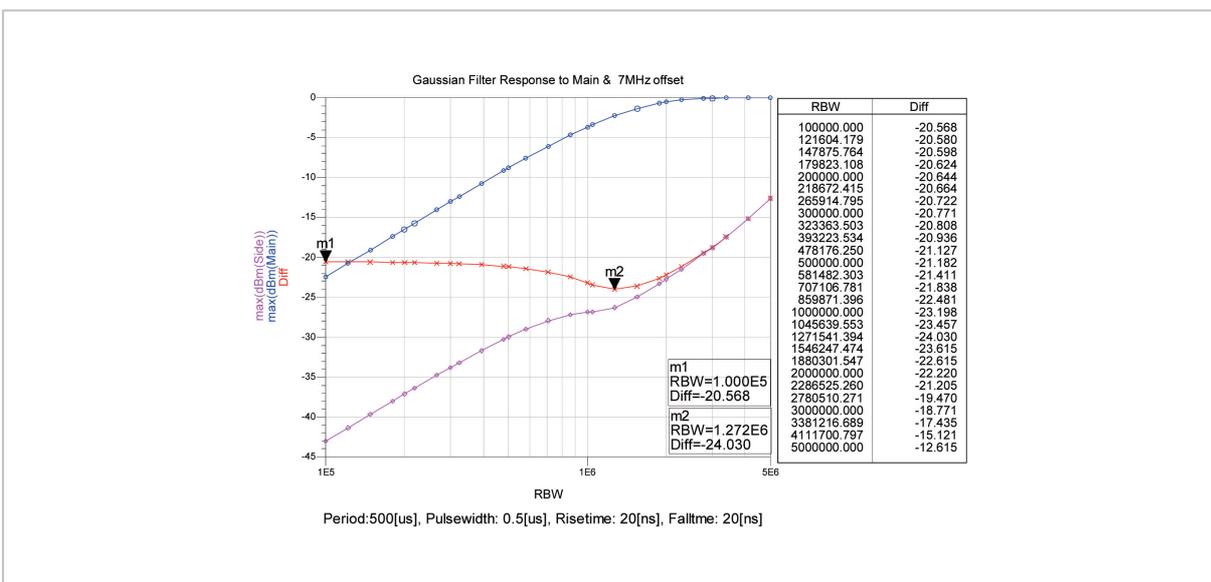


図18 ガウシアンフィルタを使用した場合の異なるRBWの測定値

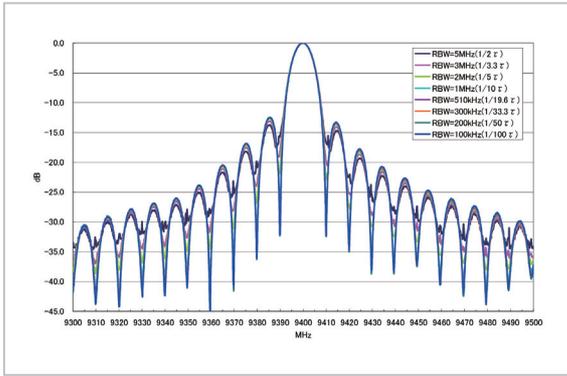


図19 パルス幅=0.1 μs の場合のスペクトラム

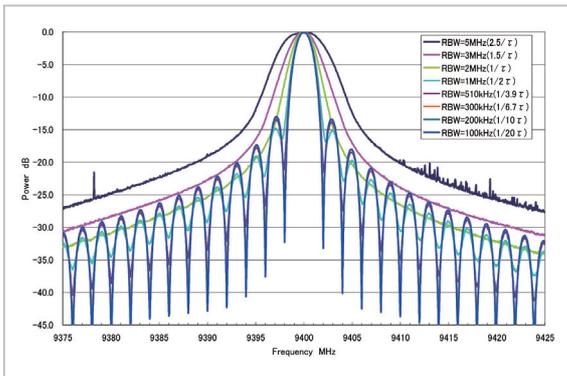


図20 パルス幅=0.5 μs の場合のスペクトラム

の差が使用する RBW によって異なる場合があることが分かる。しかしながら、 $RBW < 1 / (4\tau)$ の条件を満足すれば同様の誤差 (約 0.5 dB 以内) で測定が可能であること示している。

3.3.2.1 実際のレーダーによる測定

マグネトロンを使用した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スペクトラムを測定した場合の測定結果を図 21、22、23 に示す。

図 21 のように、実際のレーダーシステムのスペクトラム波形は理想的な矩形波ではないため、周波数成分によって形状が異なり、スペクトラムアナライザの RBW の設定によって測定値の差異の程度が異なるおそれがある。しかしながら、 $RBW < 1 / (4\tau)$ の条件下では測定誤差は 0.5 dB 以下となる結果が得られた。

以上のことから、広い RBW を使用し測定時間の短縮を図る場合には、許容できる測定誤差についても併せて検討する必要がある。

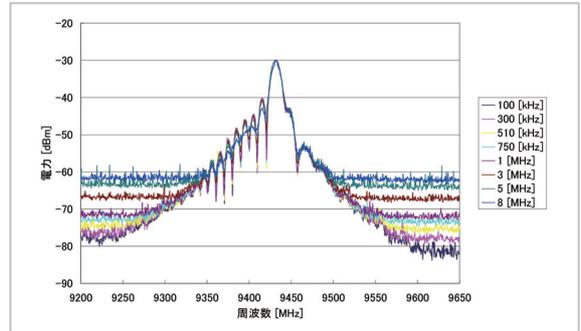


図21 レーダーシステムのスペクトラム

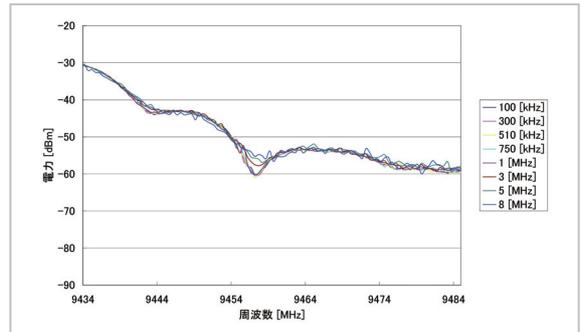


図22 中心周波数以下のスペクトラム拡大

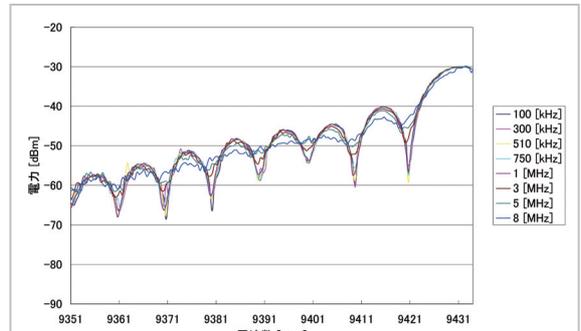


図23 中心周波数以下のスペクトラム拡大

4 まとめ

4.1 測定サイト

4.1.1 サイトによる影響について

NTIA サイトにおける実験結果より、スプリアスの輻射方向はメインビームとは異なる場合があるため、M.1177で規定されているようにレーダーアンテナを回転しながら測定する必要があることが確認できた。

また、現在の NICT の測定系では、ダイナミックレンジ、測定距離に関する条件等に問題があり、正確な測定を行うためには多くの課題があることが確認できた。

4.1.2 国内測定サイトの調査について

国内標準サイトの構築のため、サイト候補地の評価を行った。-40 dB 以下の信号レベルの調査及びメイン周波数以外でのスペクトラム（スプリアス）の状況など、更に調査すべき課題が残されているが、今後、これらの問題点の調査を行うことなども考慮して最適な候補地は C 地点と考えている。

4.2 測定システム

4.2.1 アンテナ回転の必要性について

スプリアスはメイン周波数とは異なる周波数のため、アンテナメインビームとは異なる方向に放射される場合がある。また、スプリアスほどの周波数で発射されるのか分からないことから、アンテナを回転して全方位にわたり測定する必要があることが確認された。

4.2.2 RBW の検討結果について

シミュレーション及び測定結果より、スペクトラムアナライザで得られるメインローブの周波数幅とサイドローブの周波数幅の関係は、基本波が $1/\tau$ の 2 倍の帯域幅があるのに対してサイドローブの帯域幅は $1/\tau$ である。このことから、RBW を大きくすると隣のローブの信号（逆位相の信号）も取り込むことになる。したがって、使用する RBW によってはメインローブとサイドローブのレベル差を比較するときには誤差が大きくなる場合がある。この誤差の影響をなくするためには $1/(4\tau)$ 以下の RBW が必要である。

しかし、RBW を $1/(4\tau)$ にするという事は、現状よりも更に長時間の測定が必要となる。

今後、国内における遠方界測定が可能な測定サイトの調査及び使用する RBW と許容される測定誤差を考慮しながらレーダースプリアス測定法構築技術の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1 ITU-R Radio Regulations Appendix3 (Tables of maximum permitted power levels for spurious or spurious domain emissions): 2004 年版.
- 2 Recommendation ITU-R M.1177-3 (Techniques for measurement of unwanted emissions of radar systems).
- 3 Recommendation ITU-R SM.329-10 (Unwanted emissions in the spurious domain).
- 4 ITU-R 新測定法によるレーダー不要輻射測定 信学技報 EMCJ2005-94, MW2005-100.
- 5 ITU-R 新測定法によるレーダー不要輻射測定 2005 信学全大, 分冊 2, No.SB2-1, pp.20-21, Mar. 2005.



せんだういち
瀬端好一
無線通信部門 EMC 計測グループ主任
研究員
EMC 測定



みやざわよしゆき
宮澤義幸
無線通信部門 EMC 計測グループ主査
EMC 測定



きたはらひろゆき
北沢弘則
無線通信部門 EMC 計測グループ技術員
EMC 測定



しおた さだあき
塩田貞明
無線通信部門 EMC 計測グループ技術員
EMC 測定