

X帯沿岸監視用レーダー等の高度化のための
技術的条件に関する調査検討(概要)

令和6年4月5日
三菱総合研究所

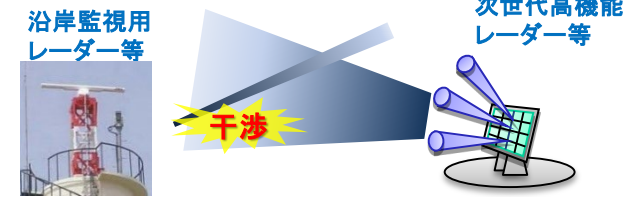
現在、気象分野において、地球温暖化や都市化に伴う豪雨被害の甚大化に対応するため、9.7GHz帯における高機能レーダーの安定的な運用や次世代高機能レーダーの導入が推進されている。一方、同帯域の沿岸監視用レーダーも重要拠点のセキュリティ対策等でのニーズが高まっており、今後設置数が増加することで気象用レーダーとの干渉が増大する見込みであることから、同帯域における周波数の逼迫を解消するための取り組みが求められている。

本技術試験は、上記の状況を踏まえて、気象用レーダー側における9.7GHz帯での周波数共用検討等と並行して、9.7GHz帯の沿岸監視用レーダー等について、X帯に焦点をあてて周波数帯域の拡張の検討等を実施し、必要な技術的条件を検討するものである。

【背景・課題】

気象分野における高機能レーダーの安定的な運用及び次世代高機能レーダーの導入環境の促進を加速するとともに、沿岸監視用レーダー等の需要の増加に対応するため、気象用レーダー側における9.7GHz帯での周波数共用検討等と並行して、沿岸監視用レーダー等のための新たな周波数帯域の確保が必須となっている。

・ 9.7GHz帯におけるレーダーの運用

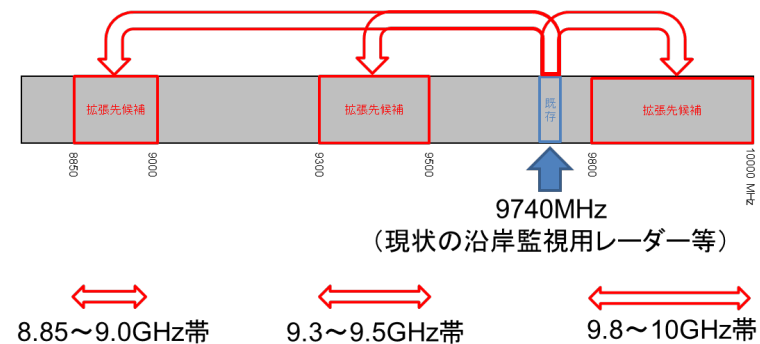


9.7GHz帯レーダーの過密化により干渉が増大する見込み

【実施内容】

- 沿岸監視用レーダーの技術動向等調査
- 複数帯域対応型レーダーの可能性検討
- 総合実証実験
- 技術的条件案の策定

周波数を拡張することで9.7GHz帯における干渉を回避



<複数の帯域に対応可能な沿岸監視用レーダーの技術的条件を検討>

目標 令和5年度までにX帯沿岸監視用レーダー等の技術基準を策定。

対象周波数帯 8.85~9.0GHz、9.3~9.5GHz及び9.8~10GHz帯

実施期間 令和2年度~令和4年度 (3年)

沿岸監視用レーダー等に関する国際動向及び将来動向

【国際動向】

カテゴリー		詳細な動向
設置場所・目的	既存の動向	<ul style="list-style-type: none"> 重要な港湾、重要な河川港を中心に設置されてきた。市場としては、これら既に設置されている沿岸監視用システムを更新する需要も存在する。
	今後想定される動向	<ul style="list-style-type: none"> 中小クラスの港、石油の備蓄基地、船が行き交う河川等にも設置が進むと考えられる。 将来、自律運航船舶の導入がなされると沿岸域の陸側にセンサーを設置する目的で、沿岸監視用レーダーの設置が増える可能性もある。
地域毎の市場動向	各地域の市場	<ul style="list-style-type: none"> 欧州・北米は、メーカー、Sierが多く存在し、それぞれの地域の事業者がその地域の市場を占有する傾向にある。 南米は歴史的な経緯もあり欧州の影響力が大きく、地理的に北米の影響力も受けており、これらの地域のメーカーの独占状況にある。 アフリカは設置数が少なく、今後市場の成長が期待される。南アフリカやケニアには欧州メーカー製のものが設置されている。
	日本メーカーの市場	<ul style="list-style-type: none"> 日本からはベトナム、フィリピン、インドネシア等のアジア圏への輸出が多い。
求められるレーダースペック	各レーダースペックに対する需要 (IALAガイドライン)	<ul style="list-style-type: none"> IALAガイドラインにおけるカテゴリ“Basic”、“Standard”、“Advanced”それぞれに需要がある。 “Basic”カテゴリに該当する沿岸監視用レーダーに特化して製造しているメーカーは少ない。ただし“Basic”カテゴリの製品は価格も比較的安く抑えられることから、アジア地域等で需要がある。 国際入札の場合にはIALAガイドラインにおける“Standard”以上のスペックが要求される傾向にあり、今後は広範囲を探知可能で解像度の高い製品への需要が高まると思われる。
	レーダー固体化に関する動向	<ul style="list-style-type: none"> マグネトロンレーダーの使用を勧める団体は存在するものの、大きな港に設置する沿岸監視用レーダーについては固体化する動向がある。固体化レーダーの方が廃棄物量に関連する環境負荷の観点、使用電力の大きさに関連した使用上の安全性の観点で優れている。

【将来動向】

- 世界の市場規模は7.979億米ドル、年平均成長率は2.1% (2019年)との推定がある。

送受信ユニット

複数周波数帯に対応するため送受信ユニットの改造について以下の検討を実施

- ①LO(Local Oscillator)
 - ・複数の周波数帯域に合わせLO周波数を可変するための検討
 - ・周波数は制御プログラムによる変更の可能性
- ②BPF(Band Pass Filter)
 - ・各帯域の中心周波数に対応した減衰特性を持つフィルタの設計／製造の検討
- ③サーキュレーター
 - ・搬送周波数帯域に対応した部品の調査検討
- ④TRXモジュール
 - ・複数の周波数帯域に合わせ送受信を可能とするための検討
- ⑤信号処理回路ソフトウェア
 - ・複数の周波数帯域に合わせ信号処理を可能とするための検討



評価結果

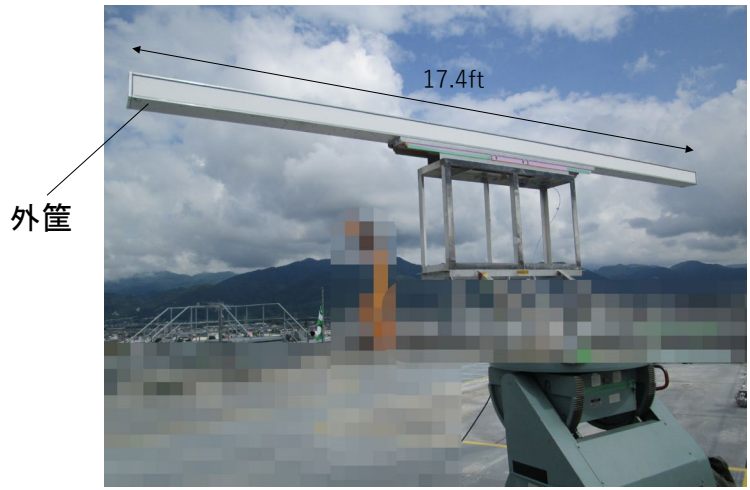
検討状況	LO	BPF	サーキュレーター	TRX モジュール	信号処理 ソフトウェア
8,900MHz	○	○	○	○	○
9,400MHz	○	○	○	○	○
9,800MHz	○	○	○	○	○

○: 対応可能

送受信ユニットは複数帯域に対応させることは可能

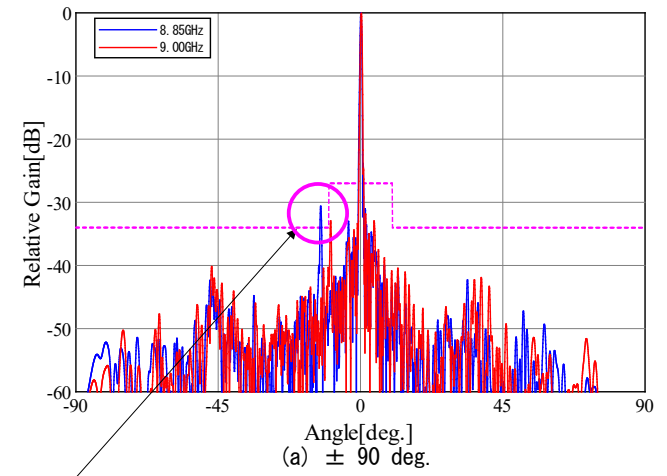
アンテナ

試作したアンテナを他の周波数と共用化可能かを、サイドローブ、利得、VSWRについて評価



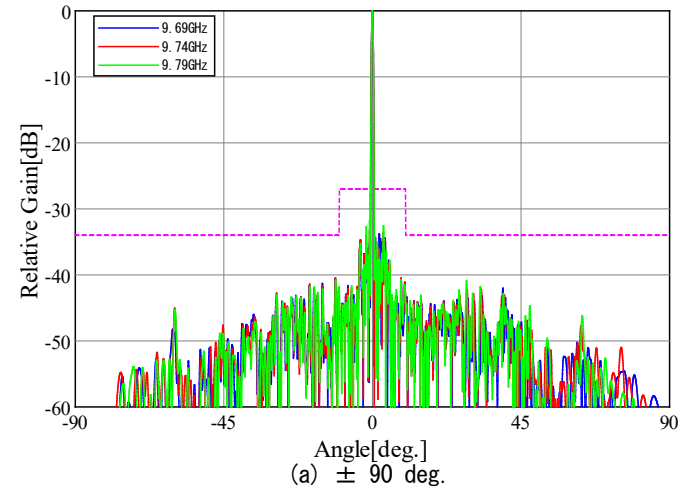
400m受信点にて測定

8850MHz、9000MHzでの測定結果



サイドローブ
(方位角±10度以内): NG

9690MHz、9740MHz、9790MHz
での測定結果



評価結果

- 8,850-9,000MHz帯：仕様未達のため輻射部の共用化は難しい。
- 9,300-9,500MHz帯：仕様を満たすが、VSWRの共振点が近く、放射特性のばらつきに懸念がある。
- 9,740-9,790MHz帯：輻射部の共用化は可能
- 9,800-10,000MHz帯：輻射部の共用化は可能



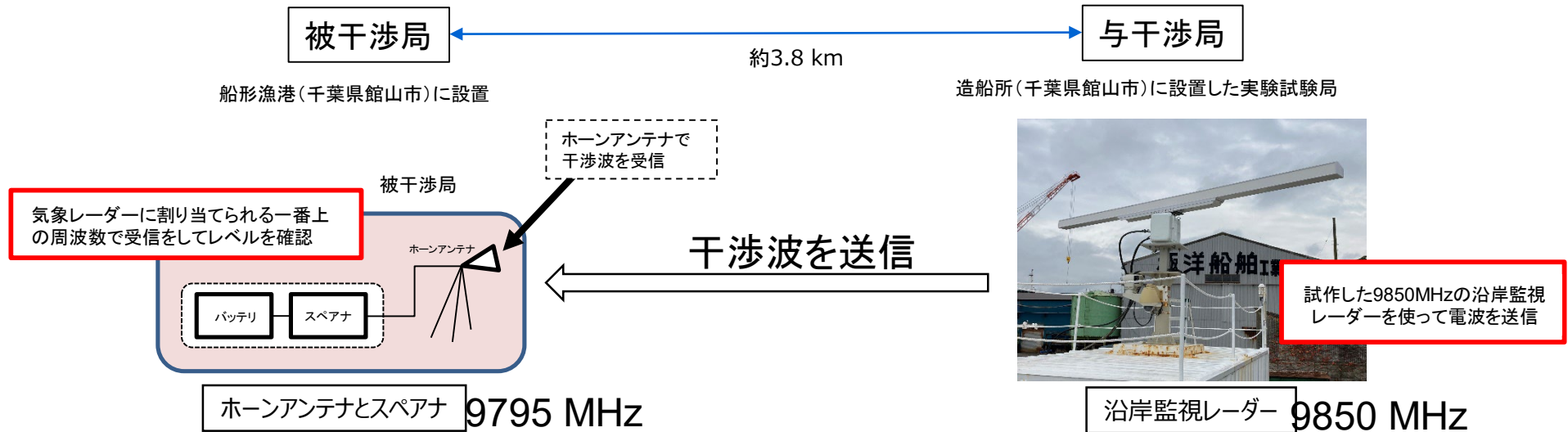
この結果から9800MHz帯が望ましい

- CS受信機は衛星から受信した信号に対し、局部発振信号(ローカル信号)を使い中間周波数の信号に周波数変換する。このとき、局部発振信号に対しイメージ周波数領域に存在する信号はフィルタなどを用いて信号強度の抑圧が行われるが、レーダー波がこの周波数領域に存在すると抑圧比の限界から、CS信号と同じ中間周波数の帯域にレーダー信号が現れる懸念がある。
- 沿岸監視レーダー(9,850MHz)から、124・128度CS放送チャンネルのうちJD5とJD2に影響を与える可能性がある。



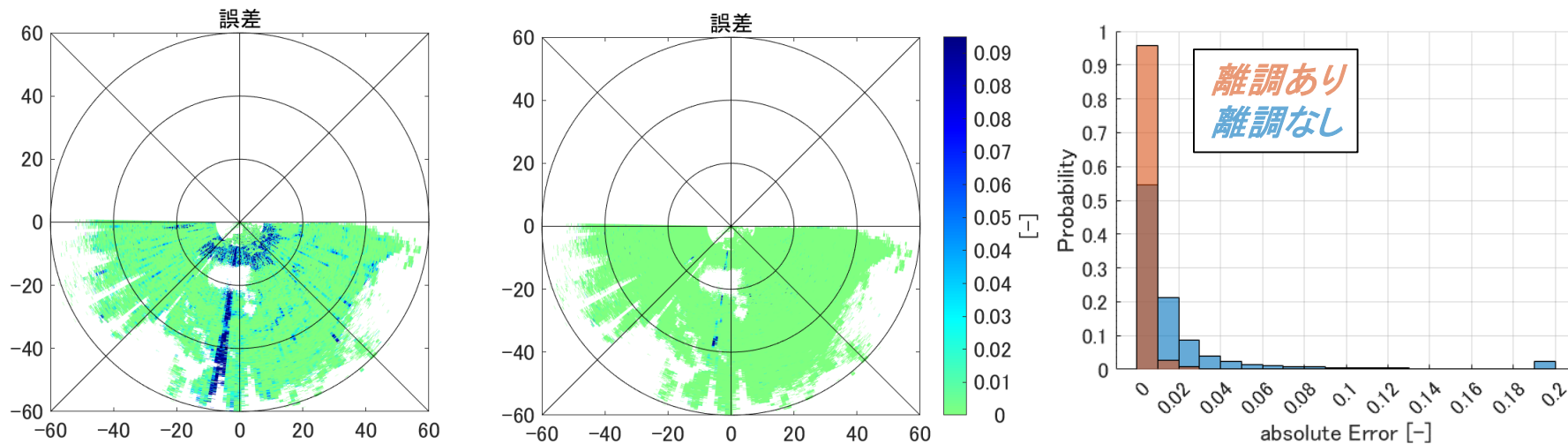
- 実施した屋外試験では沿岸監視レーダーから30m地点のCS放送受信装置への干渉は生じなかった。これはCS受信装置の抑圧性能およびアンテナ識別度が計算値よりも良好であったためである。
- この結果をもとにCS放送受信装置との共用条件を以下とした。
 - 沿岸監視用レーダーの設置を求める者は、CS受信設備に対する干渉閾値レベル(pfd_{lr})を踏まえた上で、設置場所における見通し条件などを明らかにすること。
 - また、CS受信設備への干渉影響が懸念される場合は、当該環境における共用検討を実施した上でCS放送事業者と運用調整を行い、合意が行われること。

- R3年度実施された高機能レーダーに関する技術試験事務(※)の実証実験結果と今回の測定データを用い、沿岸監視レーダーが気象レーダーとは別の周波数帯(9.8GHz帯)に移行することで干渉がなくなる(あるいは軽減される)ことを確認



*令和3年度 次世代高機能レーダー等の導入による周波数の有効利用のための技術的条件に関する調査検討(X帯)

- 無干渉データ(降雨データ真値)に対する誤差の絶対値から離調による効果の比較



	$ \text{誤差} < 0.1$	分散
離調あり	99.9%	0.007
離調なし	96.4%	0.037

※: $|\text{誤差}| = |\text{干渉除去後の推定値} - \text{無干渉データ}|$

- 全体の99%で $|\text{強度誤差}| < 1\text{dB}$ 、 $|\text{偏波間相関係数誤差}| < 0.1$ の低誤差であることを確認した。また、沿岸監視レーダーのPON、QONの周波数配置を入れ替えることでさらなる干渉低減が可能であった。

• 陸上設置気象レーダー

- 沿岸監視用レーダー(マグネトロン方式)
 - 現行と同様、帯域外領域の不要輻射不要発射の強度に許容値の現行基準を超えないこと。
- 沿岸監視用レーダー(固体化方式)
 - 9,740MHz帯: 現行と同様、帯域外領域の不要輻射に従うこと。
 - 9,800MHz帯: 送信スペクトラムが9,800MHz以下で40dB抑圧していること。

さらに、帯域内干渉のため送信スペクトラムの抑圧を考慮した離隔距離及び見通し環境などをもとに、運用者協議において合意されること。

• 航空機搭載気象レーダー

- 沿岸監視用レーダー(9,400MHz帯)
 - 現行と同様、沿岸監視用レーダーの性能は船舶レーダーと同等とし、現行の審査基準で認められている条件に従うこと。
- 沿岸監視用レーダー(9,740MHz帯及び9,800MHz帯)
 - 航空機搭載気象レーダー装置との共用は可能。
 - ただし、今後運用に影響する干渉事例が発生した場合は、運用者間協議において運用調整を行うこと。

• CS放送受信装置

- 沿岸監視用レーダー(マグネトロン方式・固体化方式)
 - 沿岸監視用レーダーの設置を求める者は、CS受信設備に対する干渉閾値レベル(pfd_{lr})を踏まえた上で、設置場所における見通し条件などを明らかにすること。
 - また、CS受信設備への干渉影響が懸念される場合は、当該環境における共用検討を実施した上でCS放送事業者と運用調整を行い、合意が行われること。

- 沿岸監視レーダーの技術的条件は、これまでの技術試験事務の検討と共に現状の免許審査の状況をもとにして技術的条件案を検討
- 9740MHz帯及び9800MHz帯に対し、下記の方針で検討

周波数	8900MHz帯	9400MHz帯	9740MHz帯	9800MHz帯
現状	運用外	<ul style="list-style-type: none"> 無線標定陸上局として電波法関係審査基準に指示あり ⇒無線設備規則第48条(船舶用レーダー)の技術的条件に従う ※MAG:9735M/9410M/9415M/9445M ※固体化:9400M帯/EIRP58dBW以下 ※BS干渉抑制記載あり 	<ul style="list-style-type: none"> 無線標定陸上局/沿岸監視用として電波法関係審査基準で指示あり マグネトロン方式のみ ※CS干渉抑制の項目のみ 	運用外
本技術試験事務での検討方針	<ul style="list-style-type: none"> 複数周波数帯域における共用判定にて不適と考えられたため、運用外とする 	<ul style="list-style-type: none"> 既に技術的条件が示され、他の無線システムと共用されている。本検討では現用に従う事とする。 <ul style="list-style-type: none"> …無線設備規則第48条 …電波法関係審査基準 他の無線システムと共用のため帯域外領域の規定を追加する 	<ul style="list-style-type: none"> 既に運用される沿岸監視用の仕様を参考とし技術的条件を検討 他の無線システムに対する干渉抑制の技術的条件を含める 固体化送信方式を含める 送信方式(MAG/固体化)で技術的条件を提示する 	<ul style="list-style-type: none"> IALAスタンダードに対応する無線設備として検討 他の無線システムに対する干渉抑制の技術的条件を含める 送信方式は固体化方式のみ

主な技術的条件の案(2/3)

<一般的条件>

項目	技術的条件(案)	考え方
適用範囲	9,740MHz帯及び9,800MHz帯沿岸監視用レーダーに対して適用	
周波数帯	<ul style="list-style-type: none"> ・マグネトロン方式 9,740MHz ・固体化方式 9,740MHz ± 15MHz 9,850MHz ± 15MHz	

<受信装置の条件>

項目	技術的条件(案)	考え方
副次的に発する電波等の強度	受信機から副次的に発する電波の限度は、4nW以下	・現行無線設備規則第24条の規定の通り

<送信装置の条件>

項目	技術的条件(案)	考え方
空中線電力と許容偏差	(1)9740MHz帯 ・マグネトロン方式 50kW ・固体化方式 700W (2)9800MHz帯 ・固体化方式 700W (3)許容偏差(9740MHz帯 / 9800MHz帯) ・+50%、-50%	<ul style="list-style-type: none"> ・9740MHz帯のマグネトロン方式は電波法関係審査基準に沿う。 ・9740MHz帯の固体化方式は9400MHz帯の電波法関係審査基準を参考とする。 ・9800MHz帯ではIALAスタンダードのガイドラインに沿える電力とする。 ・電力は給電線の損失を含めたEIRPの規定を併設する。 ・電力の許容偏差は無線設備規則第14条6(3)とするが、許容偏差を含めて別途定めるEIRPを超えないこと。
E.I.R.P.	(1)9740MHz帯 ・マグネトロン方式 82dBW以下 ・固体化方式 58dBW以下 (2)9800MHz帯 ・固体化方式 62dBW以下	<ul style="list-style-type: none"> ・9740MHz帯マグネトロン方式は既設状況から 送信電力77dBm(50kW) + アンテナ利得: 35dBi = 112dBm ⇒ 82dBW ・9740MHz帯固体化方式は9400MHzの電波法関係審査基準を参考とし現運用局とも整合する58dBWとする。 ・9800MHz帯ではIALAスタンダードに沿う電力計算とする。また電力の許容偏差を、+20%を含めて規定する。

<送信装置の条件>(続き)

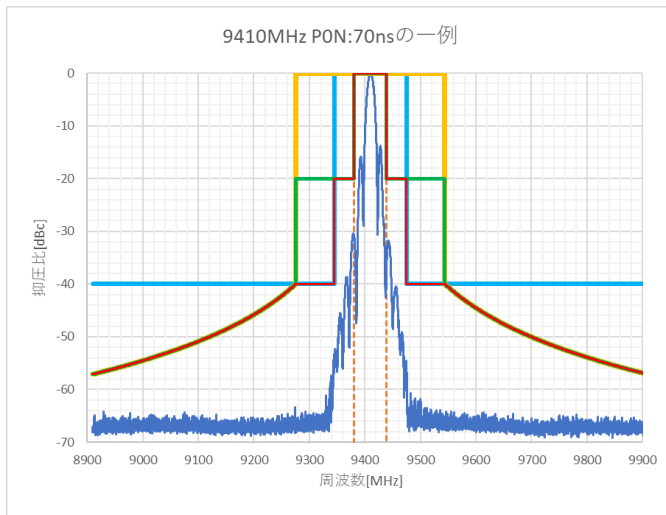
項目	技術的条件(案)	考え方
送信パルス幅	(1-1)9740MHz帯 マグネトロン方式 ・PON信号 : 0.1us以上 (1-2)9740MHz帯 固体化方式 ・PON信号 : 0.16us以上 ・QON信号 : 22us以下 (2)9800MHz帯 ・PON信号 : 0.07us以上 ・QON信号 : 30us以下	<ul style="list-style-type: none"> ・9740MHz帯は現用機器との整合をとる。 ・9800MHz帯は下記による。 PONパルス幅はIALAスタンダードの距離分解能より、 $\text{分解能} 20\text{m} \rightarrow 2 \div (20\text{m}/150\text{m/us}) = 66\text{ns} \Rightarrow 70\text{ns}$ QONパルス幅はIALAスタンダード探知性能に必要な電力計算より。
占有周波数帯幅	(1-1)9740MHz帯 マグネトロン方式 ・PON信号 : 40MHz以下 (1-2)9740MHz帯 固体化方式 ・PON信号 : 25MHz以下 ・QON信号 : 24MHz以下 (2)9800MHz帯 ・PON信号 : 58MHz以下 ・QON信号 : 24MHz以下	<ul style="list-style-type: none"> ・9740MHz帯マグネトロン方式 PON信号は現用から最小パルスを 0.1us とし 40MHz 幅とする。 ・9740MHz帯固体化方式 PON信号は現用から最小パルスを 0.16us とし 25MHz 幅とする。 QON信号は現用のチャープ掃引周波数 22MHz 以下としてパルス変調の拡がり を ±1MHz を付与し 24MHz 幅とする。 PONとQONは離調周波数30MHzとすると39.5MHz. マグネトロンと同様。 ・9800MHz帯 PON信号はIALAスタンダード対応として 0.07us より58MHz 幅とする。 QON信号は 9740MHz帯を参照する。

主な技術的条件の案(3/3)

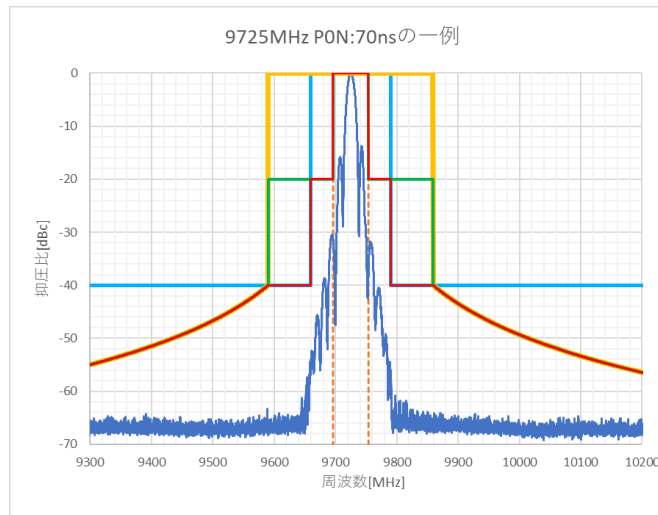
<送信装置の条件>(続き)

項目	技術的条件(案)	考え方
帯域外領域	<p>(1)帯域外領域</p> <ul style="list-style-type: none"> ITU-R SM.1541Annex8に従う。 B-40帯域幅と30dB/decade降下線で指定 <p>(2)帯域外領域のスプリアス発射の強度</p> <ul style="list-style-type: none"> 占有周波数帯幅からITU-R SM.1541で示されるB-40帯域幅の間。 平均電力から20dBc以下 固体化送信方式においては上記20dBcに加え、送信周波数±65MHz以外の周波数領域は40dBc以下若しくはB-40dB帯域のスロープ以下。 B-40帯域幅からスプリアス領域との境界の間 平均電力から下記マスクを低減した信号強度以下 マスク)B-40帯域からスプリアス領域との境界まで、40dBcから開始する30dBc/decadeのスロープが示すマスク 	<ul style="list-style-type: none"> 隣接する他の無線システムと共用するためITU-Rに沿う中で、送信方式を問わず帯域外領域でより干渉抑圧を得るための規定を施す。 B-40帯域内はITU-R SM.1541Annex8の必要周波数幅を参照し20dBcとする。 帯域外領域を規定するマスクを利用する。 固体化方式においてはスペクトラム管理から送信周波数±65MHz以外では他の無線システムとの共用のため40dBc以下にする。

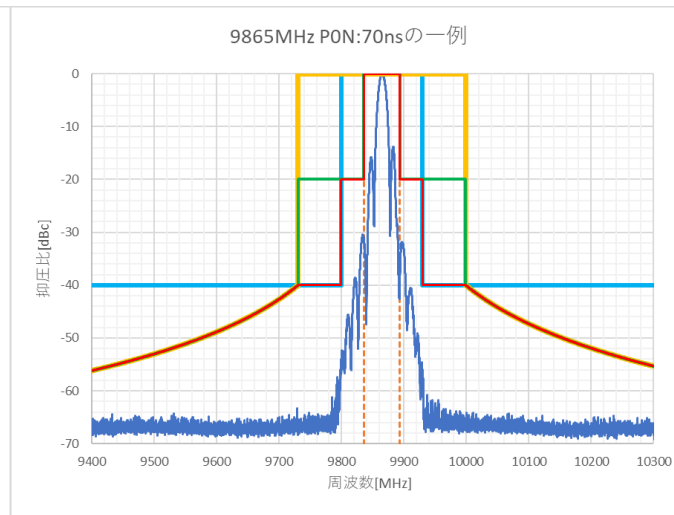
- 赤 : スペクトラムの規定値。
- オレンジ : 占有周波数帯幅を示す。4÷70nsの計算値による幅。
- 緑 : 帯域外領域を必要周波数帯20dBとして示すライン。
- 水色 : 送信周波数±65MHz以外の-40dBcを示すライン。
- 黄色 : B-40帯域及び30dB/decadeのスロープ。



9410MHz帯固体化レーダーの例



9740MHz帯固体化レーダーの例



9800MHz帯固体化レーダーの例