

情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 報告概要

平成29年9月27日付け諮問第2040号
「気象レーダーの技術的条件」のうち
「9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダー等に関する技術的条件」

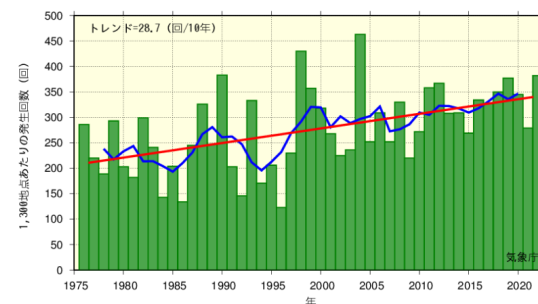
令和5年10月5日
陸上無線通信委員会

検討の背景

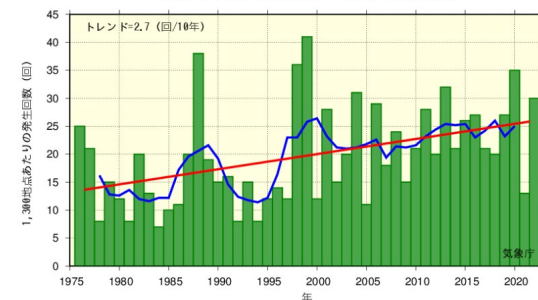
- 気象レーダーは、観測結果を基にした気象予報や防災情報を国民に広く提供することで、国民生活の安心と安全に寄与している。
- 近年では、局地的大雨や大規模の水害等の増加等を背景に、その重要性が更に高まっている。
- このような状況を踏まえ、予報の信頼度を高めるべく、既存の気象レーダーと比して高性能な気象レーダー（フェーズドアレイ気象レーダー）及び、民間等による小型の気象レーダー（汎用型気象レーダー）の配備が求められている。
- このため、フェーズドアレイ気象レーダー等の導入を図るとともに、気象レーダーの周波数確保のために、各気象レーダーの技術的条件※に関する検討を実施した。

※情報通信審議会 諮問第2040号(H29.9.27)

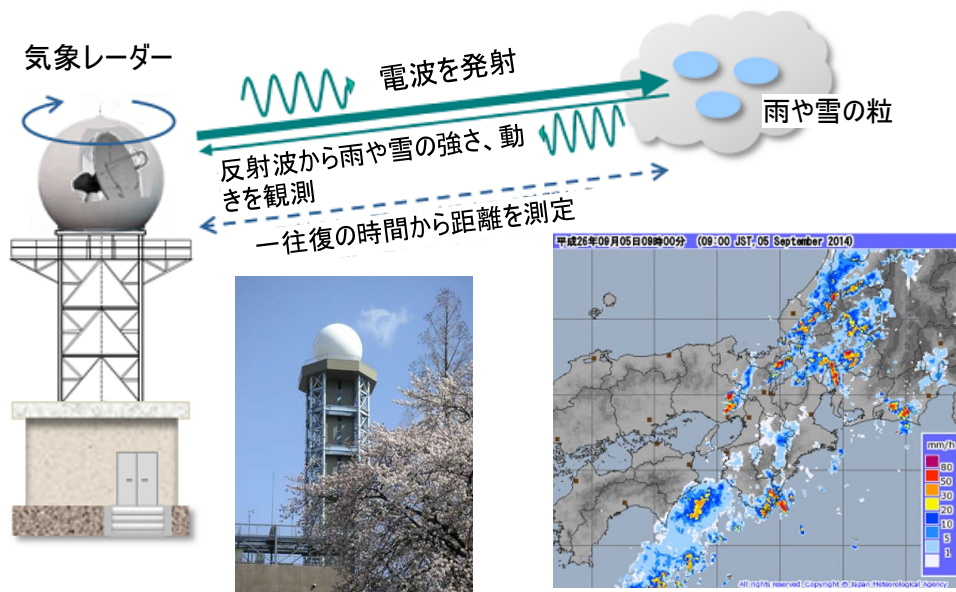
【全国アメダス】1時間降水量50mm以上の年間発生回数



【全国アメダス】1時間降水量80mm以上の年間発生回数



全国の1時間降水量50mm以上及び80mm以上の年間発生回数の経年変化（1976～2022年）
（出典 気象庁）



東京レーダー（千葉県柏市）

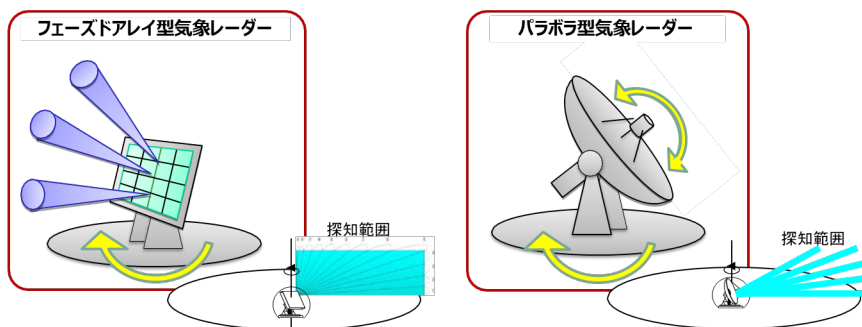
インターネット上で公表している降水強度分布情報例

「気象レーダー観測の概要」（<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/radar/kaisetsu.html>）を加工して作成

- ニーズや必要性を踏まえ、①9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件、②9.4GHz帯汎用型気象レーダーの技術的条件、③5GHz帯DFSパルスパターン、及び④気象レーダーからの衛星放送受信設備への干渉軽減対策、に関する検討を行った。

9.7GHz帯フェーズドレイ気象レーダー 概要

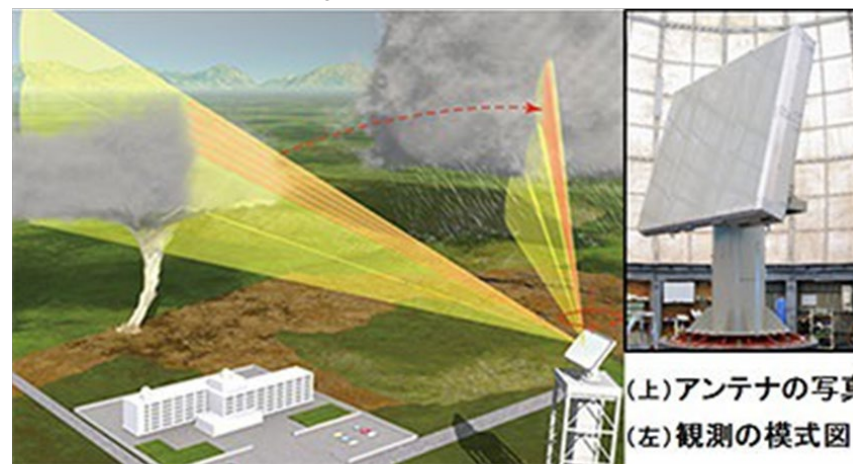
- 甚大な気象災害を引き起こす局地的大雨や集中豪雨は、積乱雲が原因とされている。発達した積乱雲による大雨は、降り始めからわずか10分程度で中小河川が増水、低地や道路のアンダーパスが冠水し、災害を引き起こすことがあり、雨雲の早期把握が重要となっている。
- 二重偏波フェーズドレイ気象レーダー(MP-PAWR : Multi Parameter-Phased Array Weather Radar)は、従来のパラボラ型の気象レーダーより短時間で観測可能であり、また、二重偏波機能により、雨量の観測精度とリアルタイム性の両方を強化することが可能となる。
- このような状況を踏まえ、日本国内における9.7GHz帯MP-PAWRの導入実現に向けて、同一システム間及び、他システムとの共用条件を含めた技術的条件について検討した。



フェーズドレイ型気象レーダー		パラボラ型気象レーダー	
フェーズドレイアンテナ	空中線タイプ	パラボラアンテナ	
単偏波/二重偏波	偏波	単偏波/二重偏波	
仰角 : 電子走査 方位角 : 機械走査	走査方法	仰角 : 機械走査 方位角 : 機械走査	
三次元スキャン(約100仰角) /30秒~1分程度	観測空間 /観測時間	三次元スキャン(約15~20仰角) /5~10分程度	
60 km~80km	観測範囲	60 km~80km	

フェーズドレイ気象レーダーは時間的・空間的に密度の高い観測を実施

フェーズドレイ気象レーダー



(出典 気象研究所, <https://www.mri-jma.go.jp/Facility/phasedarrayradar.html>)

- ①気象レーダー間の共用条件、②他システムとの共用条件および③技術的条件案、について検討した。

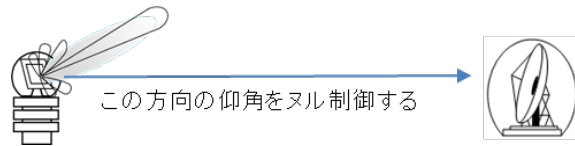
3

「9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダー等に関する技術的条件」の検討

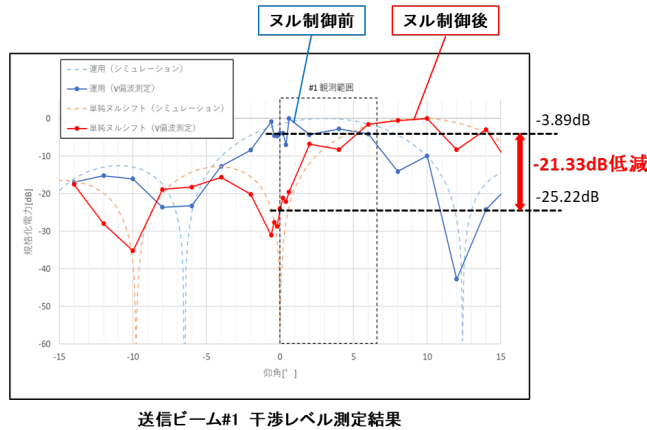
9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダー 気象レーダー間の共用条件検討

- 国内で開発されたMP-PAWRは、従来のパラボラ型レーダーと異なり、送信時に広いファンビームを用いる技術が採用されている。これにより、高速三次元観測という利点をもたらすが、一方で、他の気象レーダーへの電波干渉の増大をもたらすという懸念がある。
- このような状況を踏まえ、気象レーダー間における送信・受信それぞれの干渉軽減を実現すべく、「①送信ヌル形成技術の干渉軽減方式」「②受信ヌル形成技術の干渉軽減方式」及び「③隣接レーダー干渉軽減方式」について検討を行い、干渉低減効果を確認した。

①送信対策



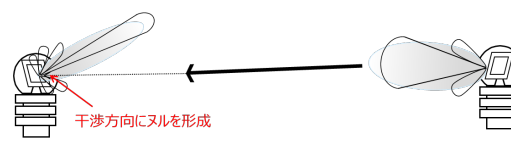
この方向の仰角をヌル制御する



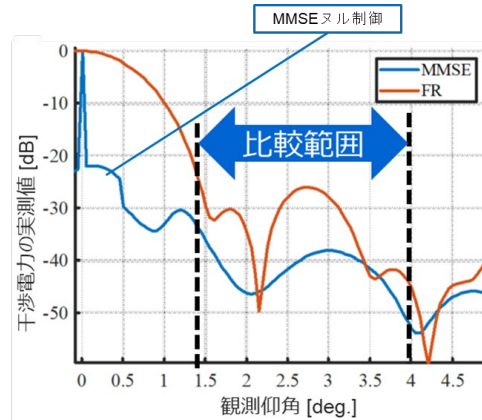
送信ビーム#1 干渉レベル測定結果

送信ヌル形成及びヌル制御により、水平方向(0度方向)の放射量が低減され、**20 dB以上**の干渉低減を確認

②受信対策



干渉方向にヌルを形成



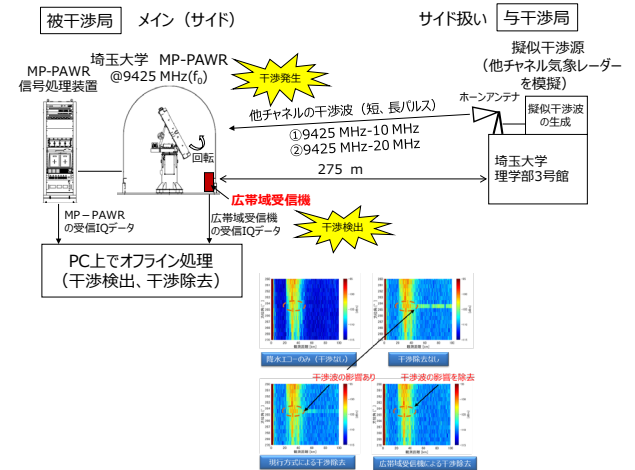
MMSEヌル制御

比較範囲

埼玉大学MP-PAWRでMMSE受信ヌル制御を行った場合、FRよりも**10.5 dB**高い干渉低減を確認

③送信波情報による干渉低減

【無効値化方式による干渉除去】
対向レーダーのパルス情報を用いた干渉低減方式について、実機で有効性を検証



被干渉局 メイン (サイド) サイト扱い 与干渉局

埼玉大学 MP-PAWR @9425 MHz (f_0) 擬似干渉源 (他チャネル気象レーダーを模擬)

MP-PAWR 信号処理装置 ホーンアンテナ 擬似干渉波の生成

他チャネルの干渉波 (短、長パルス) 埼玉大学 理学部3号館

①9425 MHz-10 MHz 275 m

②9425 MHz-20 MHz

広帯域受信機 干渉検出

MP-PAWR の受信IQデータ 干渉除去

PC上でオフライン処理 (干渉検出、干渉除去)

観測仰角 [deg.]

観測仰角 [deg.]

観測仰角 [deg.]

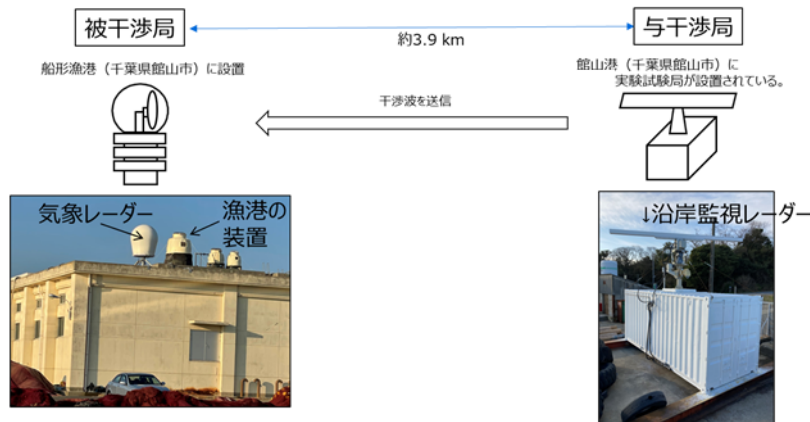
観測仰角 [deg.]

実機による空間伝搬において、対向レーダー情報を用いた干渉が除去できることを検証

送信ヌル形成・ヌル制御を行うことで、低減量の目標値としていた16dBを超える干渉低減が得られ、受信ヌル制御を行うことで、10.5dBの干渉低減が得られた。また無効値化方式による干渉除去が有効であることも確認した。これにより、**フェーズドアレイ気象レーダーを含む気象レーダー間の共用が実現**でき、今後の増設によって、線状降水帯の予測精度の向上等、気象災害の甚大化への対応が期待される。

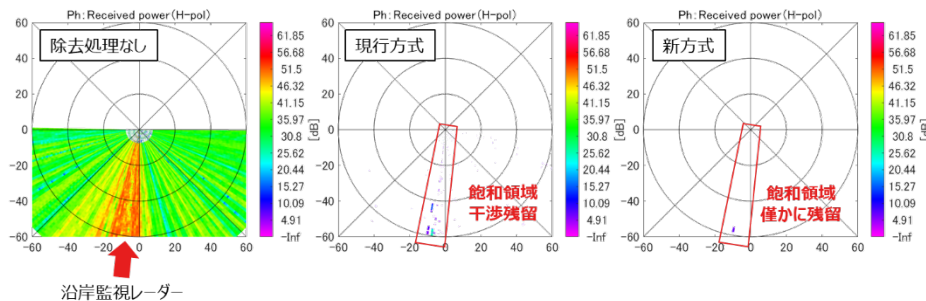
他システムとの共用条件：沿岸監視レーダーからの干渉抑圧技術の検討

- 9.7GHz帯気象レーダーと同一周波数帯を利用する、沿岸監視用レーダーとの共用条件を検討した。
- 沿岸監視レーダーについては、水平偏波を用いて監視を行っていることから、沿岸監視レーダーからの干渉の反射因子差が大きくなりやすいという特徴に着目し、反射因子差を用いる干渉抑圧技術を屋外検証を実施した。

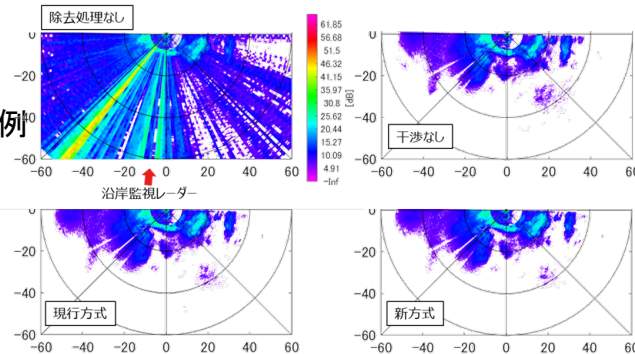


検証結果

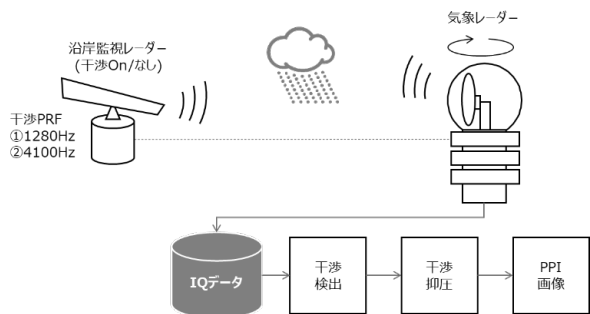
干渉除去結果例 (晴天時)



干渉除去結果例 (雨天時)



試験環境



試験概要

干渉除去後の観測誤差とシミュレーション結果の整合が高いことを確認した。ただし、ADCが飽和した場合、完全な干渉除去を保証するのは難しいため、ADC飽和を回避する周波数共用条件が必要になる。

他システムとの共用条件：沿岸監視レーダーの干渉条件の検討

- 今後の整備計画まで含めた沿岸監視レーダー70台に加え、民間等が整備している沿岸監視レーダー61台を含めて、X帯気象レーダー42台を対象に干渉を生ずる可能性のあるレーダーについて周波数共用基準（案）を整理した。

干渉ペア数

メイン-メイン	メイン-サイド	サイド-メイン	サイド-サイド
153 パス	111 パス	89 パス	67 パス

周波数共用基準（案）

メイン-メイン	メイン-サイド	サイド-メイン	サイド-サイド
許容する	I/N 0dB 未満	I/N 0dB 未満	I/N 0dB 未満

固体素子型の沿岸監視レーダーに対しては、ADCの飽和を回避するための以下の基準を規定する。

$$I + Lossf < 80 + N$$

- シミュレーションによる干渉検討の結果、気象レーダーが集中する都市部において電波干渉が多く発生する可能性があることが明らかになった。ただし、実際にはビル等の遮蔽によって沿岸監視レーダーに及ぼす影響は少ないものと考えられる。このことから周波数共用基準(案)としてメイン-メイン干渉を許容し、それ以外はI/N 0dB未満とした。
- 一方で、サイド-メイン、メイン-サイド干渉について、実際のレーダーサイトで人工構造物による遮蔽がなく、実際に干渉を許容しながら運用されていることが裏付けられれば、干渉を許容していくことも十分に考えられる。

他システムとの共用条件：BS/CS放送受信設備との共用検討

- 9.7GHz帯※気象レーダーのメインビームがCS受信設備を照射し、CS受信設備の周波数変換におけるイメージ妨害抑圧比を超える場合、CS受信設備への混信となり画像破綻が発生するため、共用についての検討を実施した。
- 想定される2つのタイプの9.7 GHz帯MP-PAWRについて、EIRPの想定実力値からCS放送との遮断離隔距離の理論値を以下の起算式により計算した。
- 計算の結果、遮断離隔距離の理論値はタイプA(国交省X-MP相当。EIRP=97dBm)の場合：490m、タイプB(東京アマチュア相当。EIRP=104dBm)の場合：1097mとなった。但し、一般的に高機能レーダーは候補地の周辺一帯で最も高い場所へ設置されているため、メインローブの中心が直接CSアンテナ方向を向くことはない。また、CSアンテナ方向の遮蔽や入射角度によっては干渉レベルが低下するため、条件によっては干渉が発生しないこともある。

※ 9,702.5～9,797.5MHz

$$\text{遮断離隔距離} = \sqrt{\frac{10^{\frac{EIRP - pfd_{lr}}{10}}}{4\pi}}$$

$$pfd_{lr} = CS\text{受信}pfd - \text{所要} \frac{C_{ave}}{I_{peak}} - M + S + D$$

項目	説明
pfd_{lr}	気象レーダーからBS/CS受信アンテナへの許容干渉電力束密度(ピーク値)
$\frac{C_{ave}}{I_{peak}}$	BS/CS 受信画像が破綻する電力比 C_{ave} : チャンネル幅当たりのBS/CS 放送波の平均電力[dBW/チャンネル帯域幅] I_{peak} : 気象レーダー波の最大(ピーク)電力[dBW]
M	マージン (dB) マージンM を0 としたときのpfdIr を遮断確認干渉波pfd とよぶ。
S	イメージ妨害抑圧比 (ボアサイト) (dB)
D	アンテナ識別度

- CS放送事業者と運用調整を行い合意がなされていることを条件とする。
- 今後項目の精査を行い、総務省資料「9GHz帯気象レーダーを運用される方へ(平成22年4月26日)」の改定を行うとともに、必要に応じて審査基準等の見直しを実施する。

9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件（案）（1 / 2）

項目		9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件
一般的条件	周波数帯	9,702.5～9,797.75MHzの範囲（割当周波数9,705～9,795MHz）とする。
送信装置 の条件	周波数の許容偏差	百万分率で100とすることが適当である。
	占有周波数帯幅の許容値	占有周波数帯幅の許容値は、P0Nを3MHzとし、Q0Nを2.5MHzとすることが適当である。
	等価等方輻射電力(EIRP)	EIRPは107dBm以下（単偏波）、110dBm以下（二重偏波）とすることが適当である。
	空中線電力	空中線電力は、5KW以下(単偏波)とすることが適当である。また、垂直及び水平偏波を同時に用いる場合（二重偏波）、それぞれの送信出力の和を取ることとする。電波の型式がP0N、Q0Nともに尖頭電力で表示することとする。
	空中線電力の許容偏差	空中線電力の許容偏差は、上限50%、下限50%とすることが適当である。
	デューティー比	気象レーダー観測の感度を向上させるためには、デューティー比をなるべく大きくし送信平均電力を上げた方が良いが、複数台の隣接レーダーによる協調観測を行うには、それぞれのレーダーの受信時間を確保する必要がある。自局以外に2台程度設置された際には、それぞれの送信タイミングを調整した上で受信時間を確保するために、デューティー比は10%以下とすることが望ましい。降雨エコーは対流圏（中緯度では最大約15km程度）の高度内であり、高仰角の観測ではレーダーからある程度離れると通常の降雨エコーが存在しないため、パルス繰返周波数(PRF)を大きく、デューティー比を大きくすることで、効率よく観測することが可能になる。鉛直方向にファンビームを送信するフェーズドアレイ気象レーダーの仰角30度以上では、デューティー比を 20 %以下とすることが望ましい。
搬送波の変調波スペクトラムの許容範囲		搬送波の空中線電力（尖頭電力）から、次の減衰量とすることが適当である。 <ul style="list-style-type: none"> ・割当周波数から±3.75 MHz以上離隔した周波数における減衰量：50 dB 以上 ・割当周波数から±8.75 MHz以上離隔した周波数における減衰量：60 dB 以上 ただし、変調波スペクトラムの許容範囲は、周波数の許容偏差を含むこと。

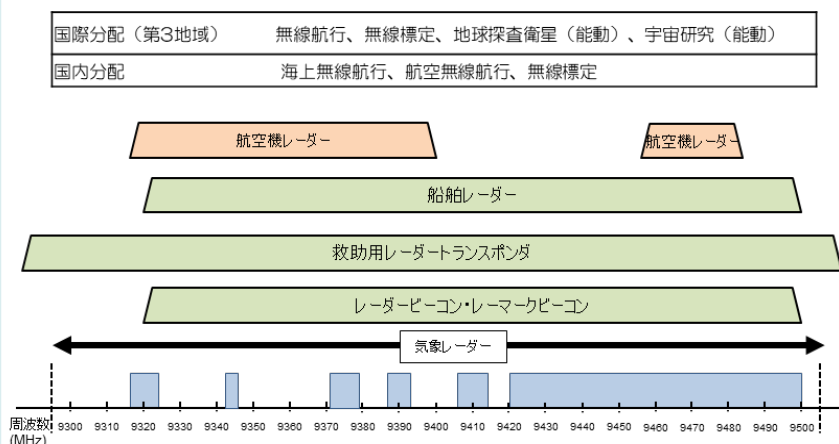
9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件（案）（2 / 2）

項目		9.7GHz帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件
空中線	空中線ビーム幅	水平方向のビーム幅を1.2度以下とする。
	送信方向制御	送信方向制御として、任意の方位角方向へのブランキングができることが適当である。更に任意の仰角方向に送信ヌルが設定できることが望ましい。
	主指向方向以外の等価等方輻射電力の上限値	方位角方向の主指向方向から3度以上離隔した方向における最大EIRPを84dBm以下（単偏波）、87dBm以下（二重偏波）、方位角方向の主指向方向から15度以上離隔した方向における最大EIRPを72dBm以下（単偏波）、75dBm以下（二重偏波）とする。 観測性能や実現性に無理の無い範囲で上限値を管理するのが現実的対応であり、空中線の指向性モデルが必要であることより、ITU-R勧告M.1851-1のsincモデルを想定する。
受信装置	等価雑音帯域幅および雑音指数	雑音指数は規定しない。
	最小受信感度	最小受信感度は、-108dBm/MHzとすることが望ましい。
測定法	フェーズドアレイ気象レーダーにおける測定法	フェーズドアレイ気象レーダーの周波数、パルス幅、空中線電力、占有周波数帯幅、スプリアス発射又は不要発射の強度の測定では、空中線から空間に発射された電波を測定する方法(空間発射測定)と、各送信モジュールに直接測定器を接続して送信出力段における電力を測定する方法(有線接続測定)、各送信モジュールの出力を合成器等でまとめ測定する方法(複数合成測定法)のいずれかの方法で測定する。なお、空間発射測定については、マルチパス等の影響を十分考慮した測定環境の確保が必要である。
	その他	今後気象は激甚化していき、高性能気象レーダーを含む気象レーダー局数は増加していくものと想定される。その際、気象レーダー間の干渉問題が深刻化することが予想される。そのため今後導入される高性能気象レーダーには相手局情報+広帯域受信による干渉除去等の高度な干渉除去処理を行うことにより、メインローブ-サイドローブ間の干渉基準としてI/N < 35dBを許容することが将来的には望ましい。ただし、高度な干渉除去処理に関しては、相手局情報をどのように入手するかなど実際の運用方法に注意が必要である。

9.4GHz帯汎用型気象レーダーに係る検討

- 近年の災害の激甚化に伴い、半径数百kmの広域な観測を目的とする既存の気象レーダーだけでなく、半径30km程度の特定の地域の気象観測に特化した、小型の気象レーダー(汎用型気象レーダー)について配備が求められている。
- こうしたニーズを踏まえ、9.4GHz帯汎用型気象レーダーについて、導入に必要な技術的条件などを検討した。
※なお、9.7GHz帯汎用型気象レーダーについては、令和4年度に技術基準を策定済み。
- 9.4GHz帯汎用型気象レーダーの使用する周波数は、航空機搭載気象レーダーや船舶用レーダー等として使用されていることから、共用に際してキャリアセンス機能の具備が必要となることを確認した。

他システムとの共用検討



◆ 動的な周波数共用のためのキャリアセンス機能の実現性

- ① 沿岸周辺は、船舶レーダーからの電波が常時観測され、電波強度が強く、スペクトルの広がりが大きいため、利用していない周波数が存在しない。
- ② 空港周辺は、航空機用気象レーダーからの電波は観測されるが、9300～9400MHzを主に利用している。但し、ガーミン社の航空機用気象レーダーの利用周波数(9315～9494MHz)も含めると、利用していない周波数が存在しない。
- ③ キャリアセンス機能を外部機器(測定器)にて実現するとコストアップになることから、気象レーダー自身での周波数検出を検討したが、受信系に妨害波対策の物理的なBPFを挿入していることから、BPFの帯域内の周波数しか検知できない。
- ④ 利用頻度の少ない周波数は、9300～9500MHzの範囲の中で両端の周波数であり、両端の周波数をカバーするには、9300MHzと9500MHzの気象レーダーを2式準備して、切り替える必要がある。但し、両端の周波数において今後も利用しないとは言えない。
- ⑤ 周波数を変更できないと、同一周波数を検知すると停波するしかない。

9.4GHz帯の周波数の利用状況において、キャリアセンス機能での運用は非常に難しい

- 9.4GHz帯汎用型小型気象レーダーの技術検討結果により、共用システムへの与干渉影響を回避できないことから、実用局化は困難と判断した。
- 海外展開に向けた無線機器製造事業用実験および学術研究機関における実験等への活用は引き続き見込まれることから、将来的なイノベーションの促進等を見据え、実験試験局のみでの活用とする。

5GHz帯気象レーダー DFSパルスパターンに係る検討

- 5GHz帯気象レーダーは5GHz帯無線LANと周波数を共存しており、5GHz帯無線LANは予め気象レーダーの運用状況を確認するため、DFS(Dynamic Frequency Selection)機能の具備が必須である。昨今、5GHz帯気象レーダーの高度化、即ちパルスパターンの複雑化に伴い、無線LANのDFS側の対応が求められている状況。
- このような状況を踏まえ、現行の気象レーダーのパルスパターンを調査し、DFSによる動作確認を検証し、新たに登録が必要なパルスパターンを特定するとともに、レーダー間干渉除去技術等が有効に機能するパルスパターンの作成の必要性について検討した。

検討内容

現業の気象レーダーのパルスパターンを整理し、パルスパターンを集約

システム	PRF [Hz]	パルス幅 [μs]		ヒット数	チャープ幅 [MHz]
		短パルス	長パルス		
国交省 C 帯レーダ雨量計	440 / 352	2.2	68.2	10 ~ 42	1.175
	400 / 320	1	100	25 ~ 38	1.63
	360 / 288	1	100	22 ~ 28	1.8
気象庁一般気象レーダー	330	1	128	9	2.2 or 2.4
	345	1	64	10	2.2 or 2.4
	535	1	64	15	2.2 or 2.4
	756 / 630	1	32	22 / 19	2.2 or 2.4
	888 / 740	1	32	25 / 21	2.2 or 2.4
	1080 / 900	1	32	21 / 19	2.2 or 2.4
気象庁 DRAW	1830 / 1525	1	32	21 / 17	2.2 or 2.4
	1116 / 930	1	64	21 ~ 31 / 18 ~ 26	1.2
	1500 / 1200	1	64	25 / 20	1.2
	1040 / 832	1	32	22 ~ 29 / 18 ~ 23	1.63
	1365 / 1092	1	32	23 / 18	1.63

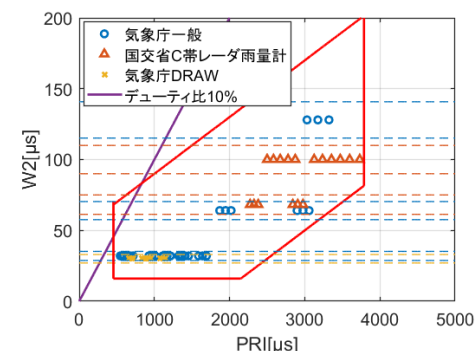


検討結果

将来的にDFSへ登録を求めるパルスパターン案を検討

パラメータ	規定値
W1(短パルス幅)	$1 \leq W1 [\mu s] \leq 2.22$
T1(短パルス受信時間)	$T1 \geq W2$
PRIとW2(長パルス幅)	$450 \leq PRI [\mu s] \leq 3800$ $16 \leq W2 [\mu s]$ $0.04PRI [\mu s] + 50 \geq W2 [\mu s]$ $0.04PRI [\mu s] - 70 \leq W2 [\mu s]$
周波数チャープ変調幅	2.5 MHz以下
1周期当たりのパルス数の最小値	7

(案)将来的にDFSへ登録を求めるパルスパターン



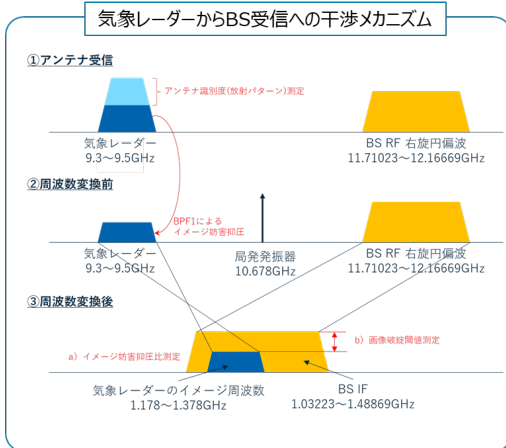
(案)将来的にDFSへ登録を求めるパルスパターンの範囲

- 現業のパルスパターンを整理し、DFS機能に登録を求めるパルスパターンの案を検討した。
- DFS機能へのパルスパターン追加については、今後、気象レーダー及び無線LAN関係者間での定期的な情報共有を通して、継続的に協議を進めることとした。

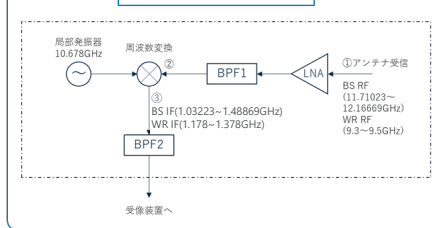
9GHz帯気象レーダーのBS/CS放送受信設備の干渉軽減検討

- 9.4GHz帯気象レーダーの使用する周波数帯は、BS放送受信設備の宅内配信用周波数変換におけるBS信号に対するイメージ周波数と重なっており、イメージ周波数の電力が大きい場合に、BS放送の受信に影響を与える可能性がある。
- 気象レーダーからの干渉軽減を目的とし、BS放送受信設備における干渉対策モデルの検討を行った。
- 9.4GHz帯気象レーダーの実験試験局を利用して、BS放送受信設備への干渉評価野外試験を実施した。

検討内容



BSコンバータの構成



検討結果



アンテナ		S+D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
市場流通品 右左旋アンテナ	A社 (BS-23 稚内)	117.1	2602.5	638.8
	B社 (BS-1 稚内)	83.2	129120.5	31695.3
	C社 (BS-1 稚内)	82.1	147026.3	36090.7
	D社 (BS-23 石垣)	114.2	3634.1	892.1
右旋アンテナ (2014~2016年品)	E社 (BS-1 稚内)	77.5	248825.6	61079.4
	① (BS-23 石垣)	141.5	156.8	38.5
試作品	② (BS-1 石垣)	136.7	271.0	66.5
	③ (BS-23 石垣)	117.0	2632.7	646.2

以下3つの対策モデルを試作し検討を行った。

- ① IF周波数を既存の周波数と同じとし、局発周波数をハイローカルにすることでイメージ干渉を回避。
 - ② イメージ帯域を阻止するバンドパスフィルターを追加することでイメージ干渉を回避。
 - ③ 一次放射器の円形導波管の設計変更でイメージ干渉を回避。
- 上記対策モデルおよび市販BSアンテナを用いて干渉評価野外試験を実施した。

- ・ 試作品①②においては、所要離隔距離短縮効果が確認できた。
- ・ 新たな課題として、9GHz帯以外のイメージ帯域の考慮の必要性や、雑音指数の劣化によるBS受信サービス時間率低下等の影響を確認した。
- ・ 野外試験では、市販BSアンテナでは画像破綻が生じたが、試作品では生じなかった。

- ・ 所要離隔距離を算出する共用検討モデルについて、屋外試験結果に基づき妥当性を確認した。
- ・ 対策モデルは、BS放送受信設備に対する所要離隔距離の低減に寄与するが、新たな課題が明らかとなった。
- ・ これらの課題を含む対策の技術的実現性、費用対効果、対策に要する時間などを勘案し、気象レーダー側の運用制限による干渉低減方策や衛星受信設備側の特性改善に関する可能性について、引き続き検討を行う必要がある。
- ・ 本検討において妥当性を確認した共用検討モデルに基づき、総務省資料「9GHz帯気象レーダーを運用される方へ（平成22年4月26日）」の改定を行うとともに、必要に応じて審査基準等の見直しを実施する。