

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
(案)

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
陸上無線通信委員会

目次

I	検討事項	3
II	委員会及び作業班の構成	3
III	検討経過	4
IV	検討概要	6
	第1章 検討の背景	6
1. 1	気象レーダーを取り巻く背景やニーズ	6
1. 2	気象レーダーの技術動向	14
1. 3	気象レーダーの高性能化の現状と動向	21
1. 4	検討対象の整理	27
	第2章 9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーに係る検討	29
2. 1	X 帯気象レーダー間の共用条件	29
2. 2	同一周波数帯の他の無線システムとの共用条件	44
2. 3	衛星放送受信設備	76
2. 4	9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件	82
	第3章 9.4GHz 帯汎用型気象レーダーに係る検討	91
3. 1	検討の背景	91
3. 2	検討内容	94
3. 3	検討結果	99
3. 4	結論	100
	第4章 9GHz 帯気象レーダーの BS/CS 受信設備の干渉軽減に関する調査検討	101
4. 1	干渉軽減検討の概要	101
4. 2	調査検討の内容・手法	104
4. 3	検討結果	115
4. 4	まとめ	131
	第5章 5GHz 帯気象レーダーと他の無線システムとの共用条件に係る検討	144
5. 1	5GHz 帯無線 LAN の利用状況	144
5. 2	現業で用いられている気象レーダーのパルスパターン	146
5. 3	共用条件案	149
5. 4	共用条件案に対する検討	151
	第6章 今後の課題	152
V	検討結果	153
	別添 9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーに関する技術的条件	154
	参考資料 1 電波防護指針	163

参考資料 2	占有周波数帯幅の測定例	166
参考資料 3	フェーズドアレイレーダーにおける測定法の概要.....	169
別表 1	171
別表 2	172
別表 3	174

I 検討事項

陸上無線通信委員会（以下「委員会」という）は、情報通信審議会諮問第 2040 号「気象レーダーの技術的条件」（平成 29 年 9 月 27 日諮問）のうち、「9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件等」について検討を行った。

II 委員会及び作業班の構成

委員会は、検討の促進を図るために委員会の下に設置された気象レーダー作業班（以下「作業班」という。）において気象レーダーの技術的条件について検討を行った。

委員会及び作業班等の構成は、それぞれ別表 1、別表 2 及び別表 3 のとおりである。

III 検討経過

委員会及び作業班での検討経過は、以下のとおりである。

1 委員会

- ア 第 68 回陸上無線通信委員会（令和 3 年 12 月 14 日～21 日（メール審議））
次世代高機能気象レーダー等の導入に関する技術的条件等に関する調査の進め方について検討を行った。

2 作業班

- ア 第 1 回気象レーダー作業班（令和 4 年 4 月 22 日）
気象レーダーの概要、気象レーダー作業班の運営方針の説明及び気象レーダーの技術的条件に関する検討案を説明した。また、今後の作業班及び各サブ・ワーキング・グループの開催予定について説明、確認を行った。

- イ 第 2 回気象レーダー作業班（令和 4 年 10 月 12 日）
X 帯サブ・ワーキング・グループ及び DFS 検討小グループより検討状況の報告を行った。また、X 帯気象レーダーに関する以下の項目について、詳細の説明を行った。
- ・ X 帯気象レーダーからの BS / CS 放送受信設備への干渉軽減に関する調査検討に係る実証実験
 - ・ 次世代高機能気象レーダー（X 帯）の技術的条件案

- ウ 第 3 回気象レーダー作業班（令和 5 年 1 月 26 日）
技術的条件や DFS パルスパターンについて、今後の対応方針を確認した。また、第 2 回作業班における技術的条件に対する指摘事項への対応について、報告を行った。

- エ 第 4 回気象レーダー作業班（令和 5 年 3 月 22 日）
以下、それぞれに係る報告書について説明を行った。
- ・「X 帯気象レーダーからの BS / CS 放送受信設備への干渉軽減に関する調査検討」
 - ・「9.4GHz 帯汎用型気象レーダーの導入の検討」
 - ・「次世代高機能気象レーダー等の導入に関する技術的条件」
- また、「9GHz 気象レーダーを運用される方へ」の改定のための修正案について議論を行った。

オ 第5回気象レーダー作業班（令和5年※月※日）

作業班報告書の取りまとめを行った。

※ X帯サブ・ワーキング・グループでは、同作業班における気象レーダーの技術的条件の検討に必要な情報の収集等を行い、より専門的な検討を行った。

IV 検討概要

第1章 検討の背景

1. 1 気象レーダーを取り巻く背景やニーズ

近年、局地的大雨¹及び集中豪雨²が増加しており、河川の氾濫や土石流、がけ崩れ、地すべり等の発生により、被害が激甚化している。河川周辺や山間部だけでなく、都市部においても、下水の処理能力を超える大量の雨水が地下街や低い地域に流れ込むことにより、浸水被害を引き起こす危険性がある。こうした豪雨による影響は、物的被害にとどまらず、人的被害にも及んでおり、対策が急務となっている。

1. 1. 1 増加する局所的な大雨

日本における短時間強雨の発生頻度は増加傾向にある。気象庁の「気候変動監視レポート 2020」³によると、1時間の時間降水量が50mm～80mmの「非常に激しい雨⁴」及び80mm以上の「猛烈な雨⁵」の年間発生回数は共に増加している。図1.1-1に全国の1時間降水量50mm以上の年間発生回数の経年変化（1976～2022年）を図1.1-2に全国の1時間降水量80mm以上の年間発生回数の経年変化（1976～2022年）をそれぞれ示す。

¹ 局地的な大雨とは、予報用語で「急に強く降り、数十分の短時間に狭い範囲に数十mm程度の雨量をもたらす雨」と表現され、急な強い雨のため河川や水路等が短時間に増水する等、急激な状況変化により重大な事故を引き起こすことがある。

気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html, 2022年2月7日閲覧

² 集中豪雨とは、予報用語で「同じような場所で数時間にわたり強く降り、100mmから数百mmの雨量をもたらす雨」と表現され、重大な土砂災害や家屋浸水等の災害を引き起こす。

気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kousui.html, 2022年2月7日閲覧

³ 気象庁, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2020/pdf/ccmr2020_all.pdf, 2022年2月7日参照

⁴ 非常に激しい雨とは、予報用語で1時間雨量が50mm以上80mm未満の場合を指し、「滝のように降る（ゴーゴーと降り続く）」と表現されている。傘は全く役に立たなくなり、水しぶきであたり一面が白っぽくなり視界が悪くなる。

気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/amehyo.html, 2022年2月7日参照

⁵ 猛烈な雨とは、予報用語で、1時間雨量が80mm以上の場合を指し、「息苦しくなるような圧迫感がある。恐怖を感じる」と表現されている。傘は全く役に立たなくなり、水しぶきであたり一面が白っぽくなり視界が悪くなる。

気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/amehyo.html, 2022年2月7日参照

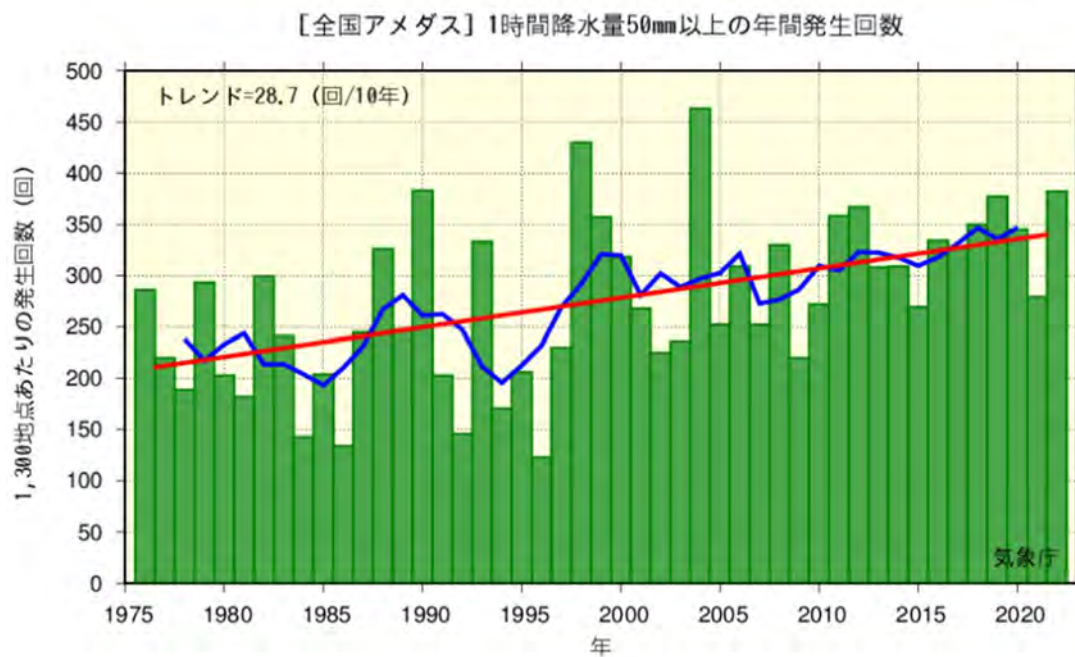


図 1. 1-1 全国の1時間降水量50mm以上の年間発生回数の経年変化
(1976~2022年)

(出典 気象庁)

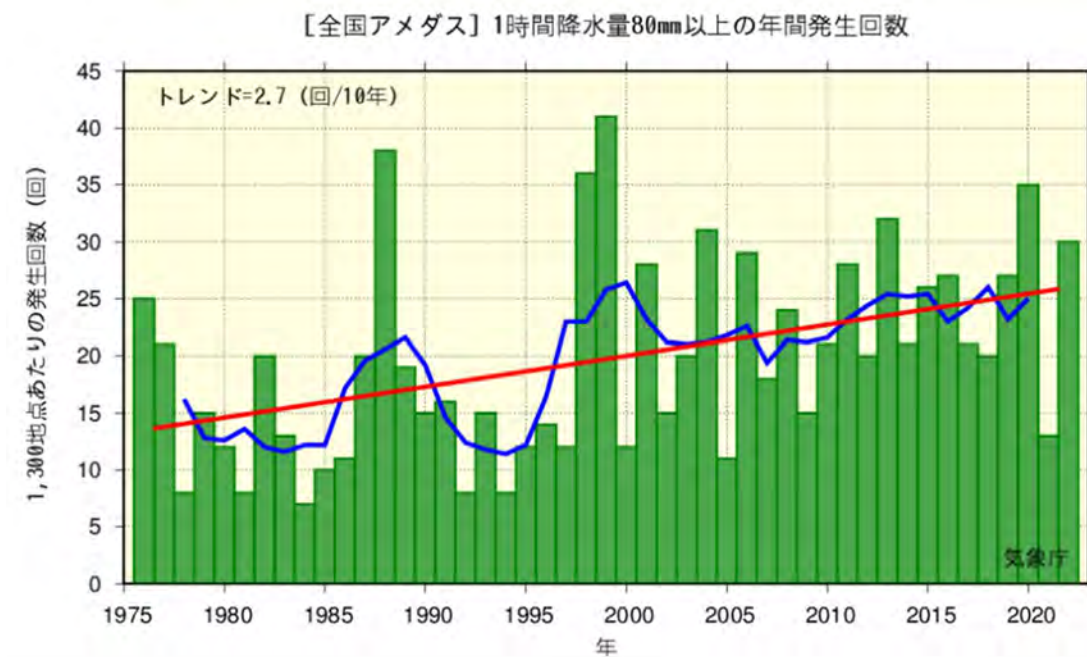


図 1. 1-2 全国の1時間降水量80mm以上の年間発生回数の経年変化
(1976~2022年)

(出典 気象庁)

図 1. 1-1 及び図 1. 1-2 の図中の緑の棒グラフは各年の年間発生回数を、青線は 5 年移動平均値を、赤線は長期変化傾向をそれぞれ示している。1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数については、統計期間の最初の 10 年間（1976～1985 年）では平均約 226 回であるのに対し、最近 10 年間（2011～2020 年）の平均では約 334 回となっており、約 1.5 倍に増加している。80mm 以上では、最初の 10 年間では平均約 14 回であったのに対し、最近 10 年間（2011～2020 年）平均では約 26 回となっており、約 1.9 倍に増加している。

こうした短時間強雨の増加は、気候変動の影響によるものと考えられており、気象庁による「日本の気候変動 2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書⁶」では、大雨及び短時間強雨の発生頻度は、全国平均では有意に増加すると予測されている。表 1. 1-1 に 20 世紀末（1980～1999 年平均）と比べた 21 世紀末（2076～2095 年平均）の雨の降り方の変化を示す。全国平均で見た場合、大雨や短時間強雨の発生頻度や強さは増加すると予測されている。

表 1. 1-1 20 世紀末（1980～1999 年平均）と比べた 21 世紀末（2076～2095 年平均）の雨の降り方の変化（いずれも全国平均）

	4℃上昇シナリオ (RCP8.5) での予測	2℃上昇シナリオ (RCP2.6) での予測
日降水量 200mm 以上の 年間日数	約 2.3 倍に増加	約 1.5 倍に増加
1 時間降水量 50mm 以上の 短時間強雨の頻度	約 2.3 倍に増加	約 1.6 倍に増加
年最大日降水量の変化	約 27% (約 33mm) 増加	約 12% (約 15mm) 増加
日降水量が 1.0mm 未満の日 の年間日数	約 8.2 日増加	(有意な変化は予測されず)

※上記の予測は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）2 による第 5 次評価報告書第 I 作業部会報告書で用いられた代表的濃度経路（RCP）シナリオ 3 のうち、RCP2.6 シナリオ（2℃上昇シナリオ）及び RCP8.5 シナリオ（4℃上昇シナリオ）の 2 つに基づく。

（出典 気象庁）

1. 1. 2 日本における豪雨災害

表 1. 1-2 に日本における過去 5 年間（2017 年～2021 年）の大雨による被害を示す。特に、令和 2 年 7 月豪雨及び平成 30 年 7 月豪雨では、人命や家屋、ライフライン、地域の産業等に及ぶ甚大被害をもたらした。

⁶ 気象庁、https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_honpen.pdf, 2022 年 2 月 7 日閲覧

表 1. 1-2 日本における過去5年間（2017年～2021年）の大雨による被害

発生時期	名称	人的被害	住家被害
2021年8月	令和3年8月の大雨	30人	8,209棟
2021年7月	令和3年7月1日からの大雨	39人	3,626棟
2020年10月	令和2年台風第14号及び前線に伴う大雨	2人	なし
2020年7月	令和2年7月豪雨	163人	16,599棟
2019年8月	令和元年8月の前線に伴う大雨	6人	6,668棟
2019年7月	梅雨前線に伴う大雨及び令和元年台風第5号	7人	852棟
2019年6月～7月	令和元年6月下旬からの大雨	7人	523棟
2018年7月	平成30年7月豪雨	678人	50,470棟
2017年7月	平成29年7月22日からの梅雨前線に伴う大雨	なし	2,285棟
2017年6月～7月	平成29年6月30日からの梅雨前線に伴う大雨及び平成29年台風第3号	78人	3,753棟

（出典 内閣府⁷⁾

・ 令和2年7月豪雨⁸⁾

令和2年7月3日から7月31日にかけて、日本付近に停滞した前線の影響で、暖かく湿った空気が継続して流れ込んだことにより、各地で大雨となり、人的被害や物的被害が発生した。7月3日から8日にかけて、梅雨前線が華中から九州付近を通って東日本にのびてほとんど停滞し、西日本や東日本に大雨をもたらした。特に、九州及び岐阜県周辺では記録的な大雨となり、長野県や高知県では、総降水量が2,000ミリを超える所もあった。

河川の氾濫や土砂崩れ等により甚大な人的被害及び物的被害（住家被害、道路被害及び重要インフラの被害等）が発生し、本災害は、災害の経験や教訓を後世に伝えることなどを目的として「令和2年7月豪雨」と名称が定められた¹⁰⁾。

図 1. 1-3に48時間降水量の期間最大値の分布図を表 1. 1-3に期間内の主な総降水量を示す。また、表 1. 1-4及び表 1. 1-5に人的被害及び住家被害（令

⁷⁾ 内閣府 <http://www.bousai.go.jp/updates/index.html>, 2022年2月7日閲覧

⁸⁾ 気象庁 https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2020/20200811/jyun_sokuji20200703-0731.pdf, 2022年2月7日閲覧

⁹⁾ 内閣府 令和3年防災白書, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r03/honbun/0b_1s_02_01.html, 2022年2月7日閲覧

¹⁰⁾ 気象庁 https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2020/20200811/jyun_sokuji20200703-0731.pdf, 2022年2月7日閲覧

和3年2月26日時点)について示す。

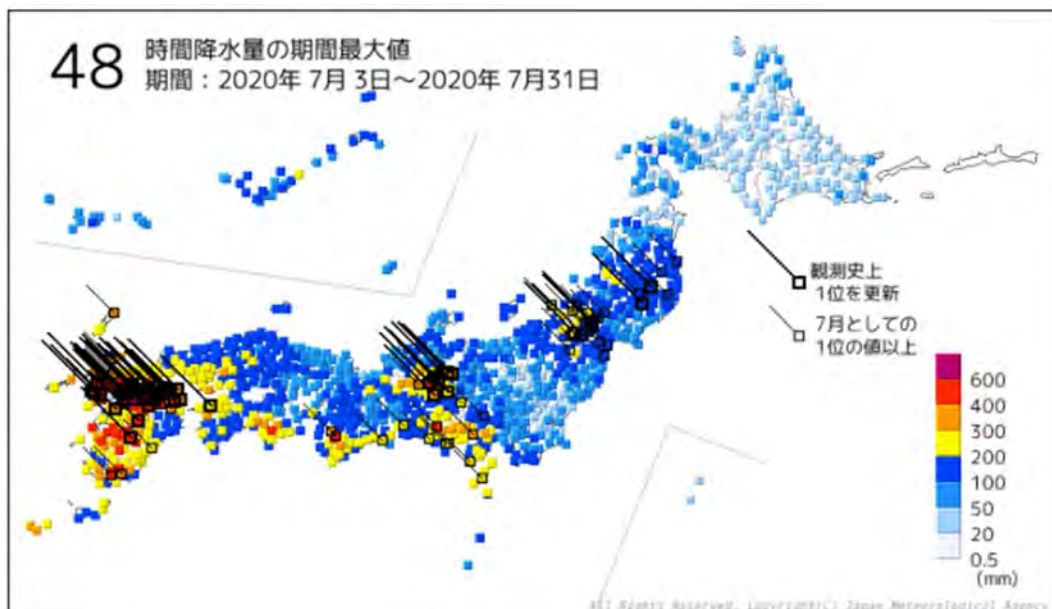


図 1. 1-3 48 時間降水量の期間最大値の分布図 (7 月 3 日～7 月 31 日)

(出典 気象庁)

表 1. 1-3 期間内の総降水量 (7 月 3 日～31 日)

都道府県	市町村	地点名 (ヨミ)	降水量 (mm)
長野県	木曾郡王滝村	御嶽山 (オンタケサン)	2135.5
高知県	安芸郡馬路村	魚梁瀬 (ヤナセ)	2032.5
岐阜県	下呂市	萩原 (ハギワラ)	1810.0
大分県	日田市	椿ヶ鼻 (ツバキガハナ)	1714.5
和歌山県	田辺市	護摩壇山 (ゴマダンザン)	1672.0

(出典 気象庁)

表 1. 1-4 人的被害（令和2年7月豪雨）

	死者	行方不明者	重傷者
広島	2	0	3
福岡	2	0	9
長崎	3	0	1
熊本	65	2	47
大分	6	0	2
その他	6	0	18
合計	84	2	80

※令和3年2月26日時点の数値

（出典 内閣府¹¹）

表 1. 1-5 住家被害（令和2年7月豪雨）

	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水
山形	1	62	7	150	555
岐阜	6	36	85	31	304
福岡	14	992	977	681	1,920
熊本	1,489	3,097	2,031	301	441
大分	68	209	202	129	469
その他	42	113	292	360	1,484
合計	1,620	4,509	3,594	1,652	5,173

※令和3年2月26日時点の数値

（出典 内閣府¹²）

¹¹ 内閣府 令和3年防災白書, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r03/zuhyo/zuhyo_t007.html, 2022年2月7日閲覧

¹² 内閣府 令和3年防災白書, http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r03/zuhyo/zuhyo_t007.html, 2022年2月7日閲覧

1. 1. 3 次世代高性能気象レーダー等へのニーズ

気象レーダーは、降水分布や風向・風速等の観測に用いられており、全国に配置されている。気象レーダーによって取得された観測データは気象予報や防災情報に役立てられており、国民生活の安全・安心の確保に不可欠なものとなっている。局地的大雨等の発生をいち早く検知し、予報の信頼度を高めるために、より高性能な気象レーダー（フェーズドアレイレーダー）の導入と自治体等における小型の気象レーダーの配備が求められている。

気象災害の甚大化に対応するため、より精度の高い気象観測を実現するための気象レーダーの高性能化と、安価かつ小型化することで従来の高性能型気象レーダーではカバーしきれない地域への設置を可能とするための汎用化を目指した取組が進められている。図 1. 1-4 に日本における気象レーダーの高度化に向けた取組状況を示す。

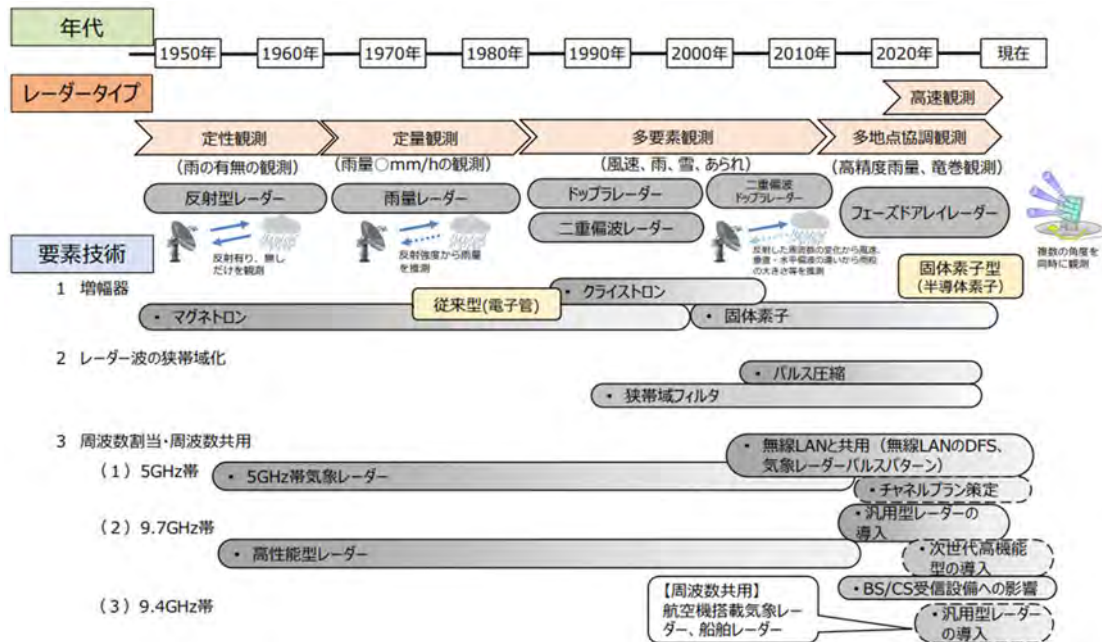


図 1. 1-4 気象レーダーの高度化に向けた取組状況

(出典 総務省¹³⁾)

2018年に交通政策審議会気象分科会がまとめた「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方（提言）」¹⁴において、気象監視技術の向上のため、二重偏波レーダーやフェーズドアレイレーダーといった次世代気象レーダーの段階的な導入を進めることが提言された。また、2018年に実施した次世代気象レーダーの一つである二重偏波フェ

¹³ 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会資料 160-2,

https://www.soumu.go.jp/main_content/000789018.pdf, 2022年2月7日閲覧

¹⁴ 交通政策審議会気象分科会, 2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方（提言）,

https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_teigen.pdf, 2022年2月7日閲覧

ーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR: Multi Parameter Phased Array Weather Radar）のニーズ調査において、調査対象となった全ての機関・組織で、導入されればそのデータを「活用したい」または「どちらかといえば活用したい」との回答が得られており、導入後のデータ活用も期待される場所である。表 1. 1-6 にニーズ調査の対象先を示す。

表 1. 1-6 MP-PAWR ニーズ調査の対象先

No.	調査先	
1	国土交通省	水管理・国土保全局、気象庁
2	地方自治体	東京都、大阪府
3	民間企業	5社（鉄道2社、航空1社、道路1社、建設1社）

1. 2 気象レーダーの技術動向

国内で現業用気象レーダーが稼働して既に半世紀以上が経過している。開発当初から現在、また近い将来までの気象レーダー技術のトレンドを図 1. 2-1 に沿って解説する。

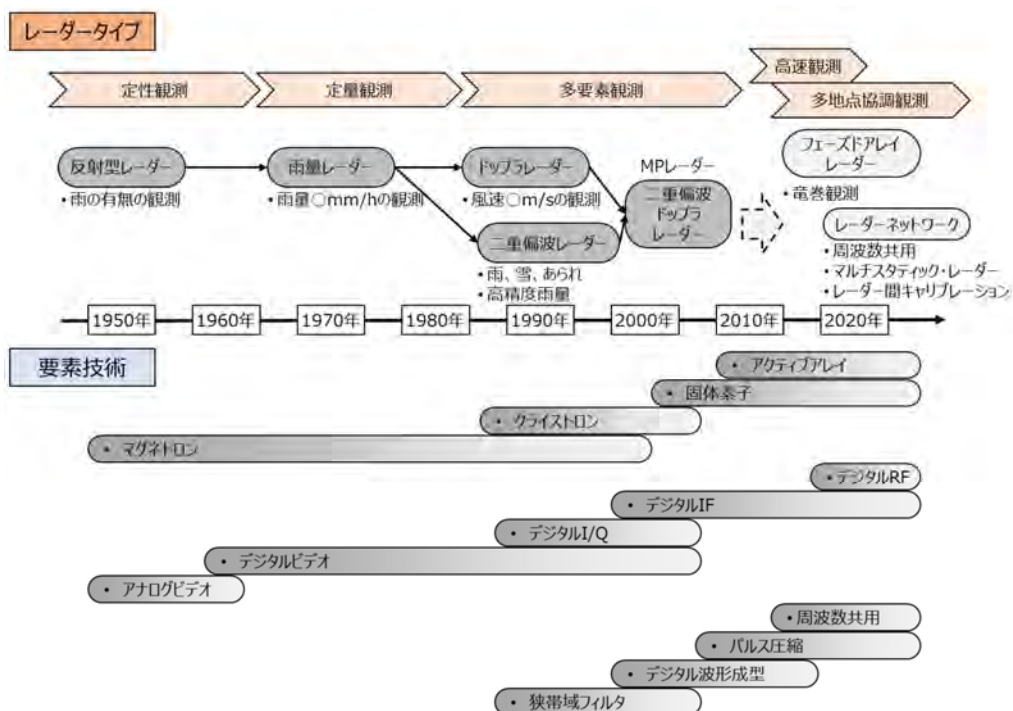


図 1. 2-1 気象レーダーの技術トレンド

気象レーダーは、1950年代、降雨からのレーダー反射電力強度から雨の強弱を定性的に観測する反射型レーダーから始まった。この時代の要素技術としては送信管として自励発振型のマグネトロンが用いられ、受信機はアナログ方式の対数増幅器が用いられた。受信機の出カビデオ信号は白黒の残光型ディスプレイ（Plan Position Indicator: PPI）に空中線回転と同期しながら映し出され、雨域の強弱を輝度の強弱に比例させ暗室で観測（スケッチ）するアナログタイプのシステムであった。

その後1970年代にはデジタルICやミニコンピュータなどデジタル技術が発達し、これらの採用によりシステムの安定化と高度な処理が可能となり、定量的雨量観測ができる雨量レーダーへと発展してきた。観測データはカラー表示器により明るい場所でも鮮明に映し出され、デジタル記録によりオフラインでの解析等も可能になった。

1990年代に入ると、降雨強度に加え、大気の流れ（反射電波の位相情報から風を推定）を観測できるドップラーレーダーへと発展してきた。位相情報を安定的に扱うために送信機として増幅型のクライストロンが主流となり、受信機もリニアアンプとデジタ

ル IQ 方式が採用されるようになった。

また、ここまでのレーダータイプでは単一の偏波（一般的には水平偏波）のみを用いた電波の送受信であったが、2つの偏波、つまり水平偏波と垂直偏波を用いた二重偏波レーダーがドップラーレーダーとほぼ同時期に実用化されてきた。これにより、降水現象を2つの偏波を用いて観測することで降水の粒径分布がリアルタイムに推定でき、より精度の高い降水量を推定することが可能となった。ドップラーや二重偏波による観測を多要素（マルチパラメータ）観測と呼ぶこともある。

2000年代に入ってくると、ドップラーレーダーと二重偏波レーダーを統合した二重偏波ドップラーレーダー、いわゆる本格的なマルチパラメータ（MP）レーダーの実用化が進み、Xバンド（9GHz帯）レーダーについては防災用にネットワーク化され運用を行っている。またCバンド（5GHz帯）についても順次MPレーダーに置き換えられている。CバンドレーダーとXバンドレーダーについての比較表を表1. 2-1に示す。

表 1. 2-1 CバンドレーダーとXバンドレーダーの比較

比較項目	Cバンドレーダー	Xバンドレーダー
用途	広域を対象とした観測	市街地など局地的な観測
観測範囲	半径 120km～400km 程度	半径 100km 程度
使用周波数帯	5GHz 帯（波長 5cm 帯）	9GHz 帯（波長 3cm 帯）
観測分解能	250m～1km 程度	250m 程度
降雨減衰	比較的小さい	大きい
空中線サイズ	直径 4m 程度（ビーム幅約 1°）	直径 2m 程度（ビーム幅約 1°）
設置場所	比較的高い山頂、市街地のビルや鉄塔、固定運用	市街地のビルや鉄塔、移動タイプもある

この 2000 年代ではデジタル技術が更なる発展を遂げ、より高い周波数の信号もデジタル処理できるようになってきた。要素技術としては中間周波数（IF）をデジタル処理するデジタル IF 処理が採用され、信号を更に安定的に扱うことができるようになった。

更に周波数有効利用の観点から、総務省の「クライストロン送信機デジタル波形成形技術及び固体素子等を用いたレーダー技術の研究開発」（2005～2007年）によって固体化気象レーダーが開発され、2010年代に現業気象レーダーとして実用化された。このレーダーは、図 1. 2-2に示すように従来のマグネトロンやクライストロンの代わりに半導体素子を使用した固体化送信機を採用している。これにより狭帯域化、低送信電力化が図られて、レーダー間の電波干渉が低減された。

この固体化素子レーダーの登場によって、従来の半分以下の離調幅で密な周波数配置をした場合でも与干渉レベルの大幅な軽減が可能となった。これを受けて、従来気象レーダー用に割り当てられていた 100MHz の周波数帯を 45MHz に抑える周波数の再配置計

画が制定され、更新されるレーダーから順次周波数移行が進められている。

既に防災目的で運用中である固体化マルチパラメータレーダーシステムの一例として、その外観を図 1. 2-3 に示す。



図 1. 2-2 送信素子のトレンド



図 1. 2-3 固体化マルチパラメータレーダーシステム外観例

気象レーダー送信電波のスプリアス（当該レーダーの必要周波数帯以外で放射される電波）を抑圧するための狭帯域フィルタ技術、更なる低スプリアス化を実現するデジタル波形技術、また固体化レーダーで必要となるパルス圧縮技術などが近年のレーダーにおける重要な技術要素である。

今後の展望としては更なる高速観測を目指したフェーズドアレイ気象レーダーの実用化などがある。フェーズドアレイ気象レーダーについては既に研究用に運用されており、運用概念図を図 1. 2-4 に示す。また、二重偏波フェーズドアレイ気象レーダーも実用化に向けた取り組みが行われている。

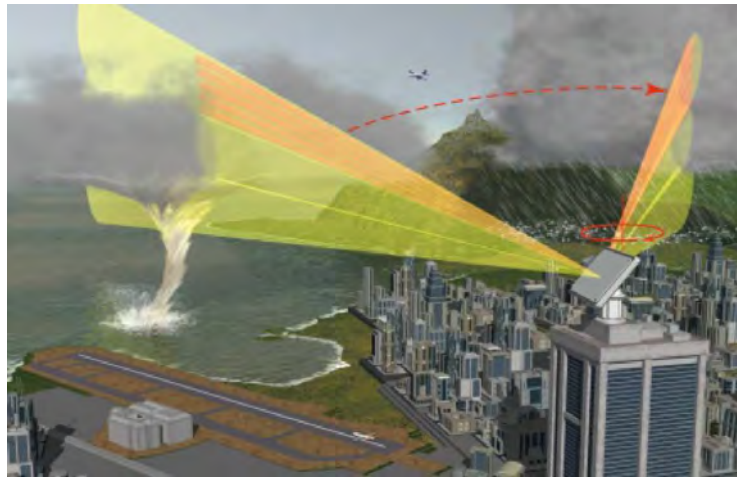


図 1. 2-4 フェーズドアレイ気象レーダーの運用概念

1. 2. 1 X 帯気象レーダー

世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）のレーダーデータベース¹⁵によると、海外では X 帯気象レーダーの利用はあまり多くなく、我が国が先行して実用化を進めている状況である。

国内においては、次世代気象レーダーとして、二重偏波フェーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR）の活用が期待されている。図 1. 2-5 に MP-PAWR の外観を示す。



図 1. 2-5 二重偏波フェーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR）の外観

甚大な気象災害を引き起こす局所的大雨や集中豪雨は、積乱雲が原因とされている。

¹⁵ 世界気象機関, <https://wrd.mgm.gov.tr/Home/Wrd>, 2022 年 3 月 10 日閲覧

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し、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¹⁶、雨雲の早期把握が重要となっている。MP-PAWR では、従来のパラボラ型の気象レーダーでは降水の 3 次元立体観測に 5 分程度かかっていたところを、1 分～30 秒で観測可能となり、さらに二重偏波機能も備えることにより、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。

フェーズドアレイ気象レーダーは、今後、段階的に導入されることが見込まれているが、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 DBF (Digital Beam Forming) 技術が採用されているため、高速三次元観測という利点がある一方で電波干渉の増大をもたらす懸念があり、その対策が課題となっている。

1. 2. 1. 1 フェーズドアレイ気象レーダーの開発動向

フェーズドアレイ気象レーダーの開発動向を把握するため、国内外の学会に参加し、情報収集を行った。表 1. 2-2 に参加した学会の一覧を示す。

国外では、米国と中国でフェーズドアレイ気象レーダーの開発が行われていることが確認された。

米国では、現行の S 帯パラボラ型レーダーを二重偏波フェーズドアレイ気象レーダーにアップデートすることが検討されている。プレーナー型とシリンダー型の二つの方式で開発が進んでいるが、運用を想定した水平・垂直偏波同時送信タイプの実観測は、我が国がリードしている。また、米国で研究されている X 帯の二重偏波 PAWR については、実運用を想定したレベルには至っていない状況である。

中国については、局所的な雷雲や対流の様子を 3 台の PAWR (X 帯 1 台、S 帯 2 台) を使って三次元観測した事例の紹介等もみられ、気象レーダーの研究が急速に進んできていることが伺える。複数台の PAWR によるネットワーク観測が行われており、今後はフェーズドアレイ気象レーダーのネットワーク化が進むと考えられる。

国内では、高い時空間分解能を活かした極端現象の事例解析だけでなく、AI を活用した技術の検討など、研究のトピックは多岐にわたっている。また、2021 年 7 月～9 月に開催された東京 2020 オリンピック・パラリンピックにおいて、スーパーコンピュータ「富岳」と埼玉大学に設置されている MP-PAWR を活用した超高速高性能降水予報のリアルタイム実証実験が行われており、研究だけでなく、エンドユーザーによる利活用も進みつつある状況である。更に、首都圏、関西ともに 2 台のフェーズドアレイ気象レーダーを活用した研究も進んでおり、今後、フェーズドアレイ気象レーダーが新たに配備されることで、より詳細な気象解析や、その結果を活かした気象予測精度の向上も期待される。

¹⁶ 気象庁, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/tenki_chuui/tenki_chuui_p3.html, 2022 年 3 月 10 日閲覧

表 1. 2-2 調査対象学会

学会名称	開催日	概要
Workshop on Ground-Based Phased Array Radars	2021年5月25日	オクラホマ大学が主催するフェーズドアレイ気象レーダーに関するワークショップ。基調講演を含む計8件の発表のほかに、13件のトピックスに関するBOS (BreakOut Session) が行われた。
日本気象学会 2021年度秋季大会	2021年12月2日～ 12月8日	5つの専門分科会、一般口頭発表及びオンラインポスター発表により、合計373件の発表が行われた。この内、フェーズドアレイ気象レーダーに関連する報告は、データ品質管理、予測への応用、気象解析等、計9件であった。
日本気象学会 2020年度秋季大会	2020年10月25日 ～10月31日	4つの専門分科会、一般口頭発表及びオンデマンド講演1のセッションが設けられ、合計309件の発表が行われた。この内、フェーズドアレイ気象レーダーに関連する報告は、データ品質管理、予測への応用、気象解析等、計10件であった。
ERAD2020	新型コロナウイルスの影響により、開催が2022年に延期となったため、発表予稿集を基に調査	気象レーダーのエンジニア、オペレータ及びエンドユーザーの為のオープンフォーラムである。2000年から2年ごとにヨーロッパ各国で開催されている。
2020 IEEE Radar Conference	2020年9月21日～ 9月25日	IEEEが主催するレーダーの国際学会である。気象分野以外にも様々な分野のレーダーに関する発表が行われた。60のセッションが設けられ、計388件の発表があった。その内、気象レーダー関連の発表は11件、フェーズドアレイ気象レーダー関連の発表は4件であった。
日本気象学会 2019年度秋季大会	2019年10月28日 ～10月31日	6つの専門分科会、一般口頭発表及びポスター発表のセッションが設けられ、合計442件の発表が行われた。この内、フェーズドアレイ気象レーダーに関連する報告は、電波干渉低減、データ品質管理、予測への応用、気象解析等について、計14件の発表がなされた。
ICRM2019 (39th International Conference on Radar Meteorology)	2019年9月16日～ 2019年9月20日	米国気象学会 (AMS : America Meteorological Society) が主催する国際学会で、特に気象レーダーにフォーカスした気象学会としては世界最大規模の学会である。8つのセッションにおいて合計481件の発表が行われた。フェーズドアレイ気象レーダー関連の発表は49件であった。

1. 2. 2 5GHz 帯気象レーダー

スマートフォン市場の拡大や、無線 LAN の大容量化などに伴い、電波利用状況はひっ迫した局面を迎えており、首都圏では C 帯気象レーダーに割り当てられる周波数が枯渇している。5GHz 帯周波数のひっ迫状況の改善策として、国内の 5GHz 帯気象レーダーに割り当てられる周波数帯は 5330 MHz～5370 MHz への移行が計画されており、これまで以上に周波数利用の効率化が求められている。今後は、気象レーダー同士の干渉計算に基づいた新規格や送信スペクトルの狭帯域化の検討に基づいた新基準が策定され、更に周波数が有効利用されていくことが望まれている。

海外における C 帯気象レーダーの利用は、S 帯気象レーダーと同等かそれ以上の割合を占めているが、それらのほとんどが電子管型であり、固体素子型は我が国が先行して実用化を進めている状況である。

1. 2. 3 国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) の動向

海外では、国際電気通信連合無線通信部門 (ITU-R) 勧告 M.1849-2 において 9.3～9.5GHz 帯の諸元が Annex に 3 種類記載されているが、9.7GHz 帯の位置付けは ITU-R において必ずしも明確ではない。また、国際標準化機構 (ISO) は WMO と共同した検討を進め、システム性能や運用等に関する国際標準を示している。その中では X 帯の記載はあるが、ITU-R と同様に、9.3～9.5GHz 帯が対象となっている。

海外におけるレーダーの送信タイプでは、電子管タイプが大勢を占めるが、日本国内では固体素子型の実用化が進んでいる。こういった背景から、固体素子型の気象レーダーに関する諸元等は、現時点において国際機関の標準化に関する文書等に十分には記載されていない状況である。

5250～5350MHz と 5470～5725MHz については、ITU-R の決議 229 の resolves 8 により、レーダーシステムと RLAN (Radio Local Area Network。無線 LAN と同義) の共用を保障するため、RLAN 機器は ITU-R 勧告 M.1652-1 の Annex1 の干渉緩和技術、すなわち、DFS (Dynamic Frequency Selection) の搭載が義務付けられている。ただし、5650～5850MHz については、我が国における移動業務によるこの帯域の使用は決議第 229 の対象外となり、DFS の具備は義務となっていない。なお、現時点では、当該周波数帯において保護の対象となるレーダーは、ITU-R 勧告 M.1638-0 に規定されたものに限定されている。

1. 3 気象レーダーの高性能化の現状と動向

1. 3. 1 現在国内で展開されている気象レーダーについて

災害をもたらす気象現象をなるべく早く検知するためには、広範囲での観測が可能な気象レーダーを用いることは非常に有効である。かつ、なるべく少ない台数で日本全国をカバーできる観測網を整備することが、周波数の利用効率の観点から見ても望ましい。このため、我が国では広範囲が観測可能なC帯の気象レーダーを中心に展開を進めてきた。C帯気象レーダーの特徴として、観測半径が気象レーダーから最大400km程度で非常に広範囲な観測が可能であるため、気象庁による予報業務への活用に加えて、国の関係機関や地方自治体、公共インフラ運営企業（電力、ガスなど）、及び一般国民が広く利用できる。また、X帯に比べて降雨減衰の影響を受けにくい特長を生かし、空港に設置して、航空機の離着陸に大きな影響を与える低い高度での風向変動である低層ウィンドシアアの検出にも用いられている。

これに対して、X帯気象レーダーは、アンテナ径を小さくできるのでレーダー本体を小型化することができ、様々な探査方法（高速スキャンやスキャン方法の多様化）を実現しやすい。ただし、送信周波数がX帯であるため、降水による信号の減衰が大きく、観測半径をあまり大きくすることはせず、気象レーダーから半径50~80km程度としている。現在では、X帯気象レーダーの免許人として、国や地方自治体、公共インフラ運営企業に加えて、民間企業でも設置が可能となってきている。

気象レーダーの観測範囲の特徴として、地球の曲率のため、気象レーダーから遠ざかると観測可能な最低高度が徐々に上がる。一般に、気象現象のうち降水を伴い、また、大きな影響を与えるような気象現象は地表付近で発生するため、地表付近での観測が困難になることはなるべく避けたい。そのため、X帯気象レーダーは、広範囲を観測できる気象レーダーの縁辺部での地表付近が観測できないような場所に補完的に設置し、きめ細やかな観測を行うのに向いている。また、地表付近での降水量を正確に推定するためには、なるべく地表に近い高度での雨雲の強さや降水強度から、降水量を推定することで推定誤差が小さくなり望ましい。

また、一般に、波長が短い（周波数が高い）X帯の方がC帯に比べ、粒径が小さい雪に対する感度が高い¹⁷。このような波長の違いもC帯気象レーダーだけでなくX帯気象レーダーを活用する理由の一つである。

このような現状を踏まえると、日本国内における気象レーダーの展開計画として、C帯気象レーダーで観測が難しい気象現象や範囲について、X帯気象レーダーを展開し観測網を強化していくのが有効と考えられる。

¹⁷ C帯とX帯の違いについては、波長が違うだけでなく、現在展開されているレーダーの送信出力の違いやパルス長、変調方式といったレーダーシステムの違いの他、C帯は広範囲、X帯は近距離を観測するといった観測範囲の違い等があり、X帯の方が有利な条件が波長のみ依存する訳ではない。

1. 3. 2 X帯気象レーダーの高性能化

X帯で運用している気象レーダーの周波数帯は、9.4GHz帯と9.7GHz帯に分かれている。

9.4GHz帯では主に実験試験局が運用されており、免許人は、大学、研究所といった研究機関や、レーダーメーカー、民間気象事業者等が挙げられる。この帯域での周波数分配では、気象レーダーの無線標定業務は、無線航行業務（船舶用レーダー及び航空機用レーダー）に対し、劣位となっている。

9.7GHz帯では実用局（無線標定陸上局）が運用されており、主な免許人は、国土交通省や地方自治体のほか、鉄道事業者等の公共インフラ運営者である。X帯気象レーダーはアンテナ径を小型化できるためアンテナ走査を高速化しやすく、半径50～80km程度の観測を短時間で行うことができる。これにより、免許人の観測目的に対し、よりきめ細やかな観測が可能となった。ただし、国土全体をカバーする目的で設置されていないため、現在行われている観測範囲は限定されている。周波数分配では、無線航行業務の周波数分配がないことより、9.4GHz帯と異なり、気象レーダーの無線標定業務は劣位となっていない。

我が国は、世界で最もXバンド気象レーダーが普及、利用されている国の一つである。こうしたレーダーネットワークは、日々の降雨状況とその変化をモニタし、予測するのに役立てられている。局地的大雨等による気象災害の甚大化を受け、雨雲等の早期検知を可能とする気象レーダーの設置の要望がさらに高まっている。

そのX帯気象レーダーで、次世代型と期待されているのが、フェーズドアレイ型である。我が国では、世界に先駆けて、X帯偏波フェーズドアレイレーダーが開発され、種々の検討が行われている。複数仰角の同時観測を行い、従来のパラボラ型気象レーダーよりも短時間に三次元観測が可能なことから、局地的大雨等を早期に検知できるため、次世代高機能気象レーダーであるマルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダー(MP-PAWR)の実用化が期待されている。

MP-PAWRをはじめとするフェーズドアレイ型気象レーダーは垂直方向に広い扇形状のビームを送信するため、その干渉が頻繁に発生する可能性が高くなる。そのため、気象レーダーの増加に加え、干渉回避のために異なる周波数を割り当てると、周波数のひっ迫度が増加することが懸念される。このような状況を回避するための共用条件を策定することにより、以下のことが期待される。

- 既存のパラボラへの、あるいはフェーズドアレイ同士の干渉なしでレーダーを運用することが可能となる。
- 高性能レーダーの実験試験局（現在は9.4GHz帯）更新時に9.7GHz帯のチャンネルを与えることが可能となる。

1. 3. 3 C帯気象レーダーの高性能化

C帯気象レーダーは、免許人が気象庁や国土交通省、電力会社等により運用されている。C帯気象レーダーの特徴の一つとして、半径数百 km の広範囲での観測が可能であることが挙げられる。このため、台風や低気圧、前線などを要因とする雨雲、冬によく見られる日本海での筋状の雪雲といった、現象のサイズが数百 km 程度の気象現象の観測を行い、雨雲や雪雲の発生や台風、低気圧の動きを早期検知することに強みを持つ。こうした特徴は、気象庁や国土交通省等の公的機関が国民に対する一般的な気象予測や幅広い気象情報の提供といった目的に合致する。図 1. 3-1 に C帯気象レーダーの外観例、図 1. 3-1 に 5GHz 帯の周波数割り当て状況、図 1. 3-1 に令和3年9月末現在の C帯気象レーダーの設置（常置）場所を示す。



図 1. 3-1 気象庁東京レーダー

(出典 気象庁 HP より)

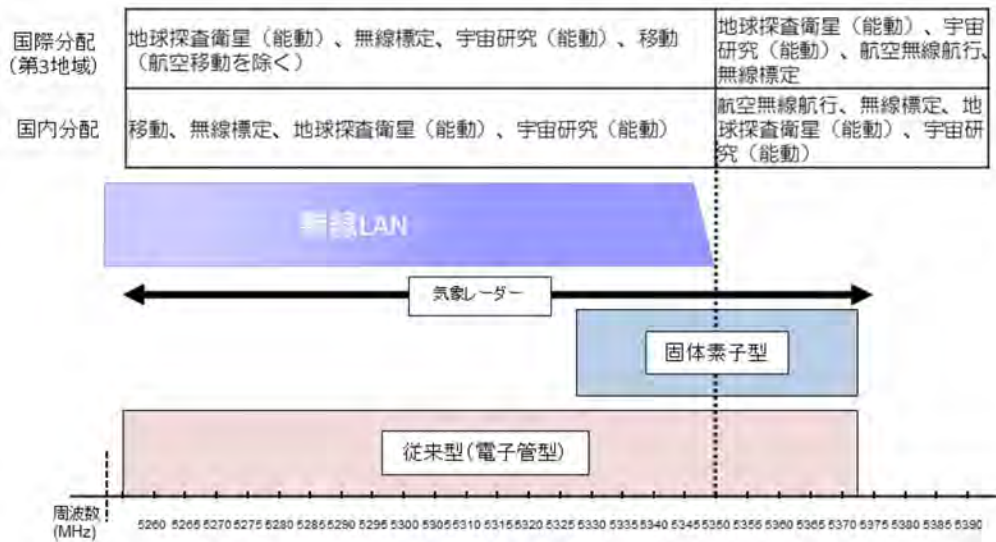


図 1. 3. 3-2 5 GHz 帯の周波数割当状況

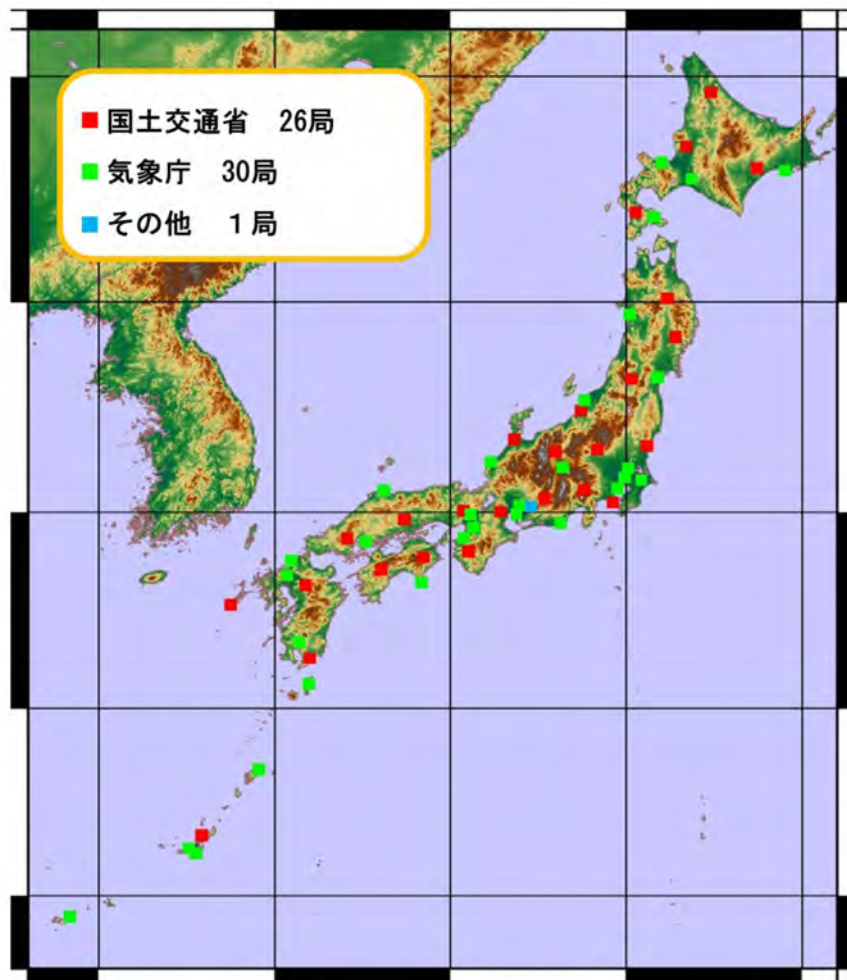


図 1. 3. 3-3 C帯気象レーダーの設置（常置）場所（令和3年9月末現在）

周波数有効利用の観点から、総務省の「クライストロン送信機デジタル波形成形技術及び固体素子等を用いたレーダー技術の研究開発」(2005～2007年)によって固体化MPレーダーが開発され、2010年代に現業気象レーダーとして実用化された。このレーダーは、図1.3-1に示すように従来のマグネトロンやクライストロンの代わりに半導体素子を使用した固体化送信機を採用している。これによりチャンネル幅の狭帯域化、送信電力の低出力化が図られて、レーダー間の電波干渉が低減された。

この固体化MPレーダーの登場によって、従来の半分以下の離調幅で密な周波数配置をした場合でも与干渉レベルの大幅な軽減が可能となった。これを受けて、従来気象レーダー用に割り当てられていた100MHzの周波数の帯域幅を45MHzに抑える周波数の再配置計画が実施され、設備更新されるレーダーから順次周波数移行が進められている。既に防災目的で運用中である固体化MPレーダーシステムの一例として、その外観を図1.3-5に示す。

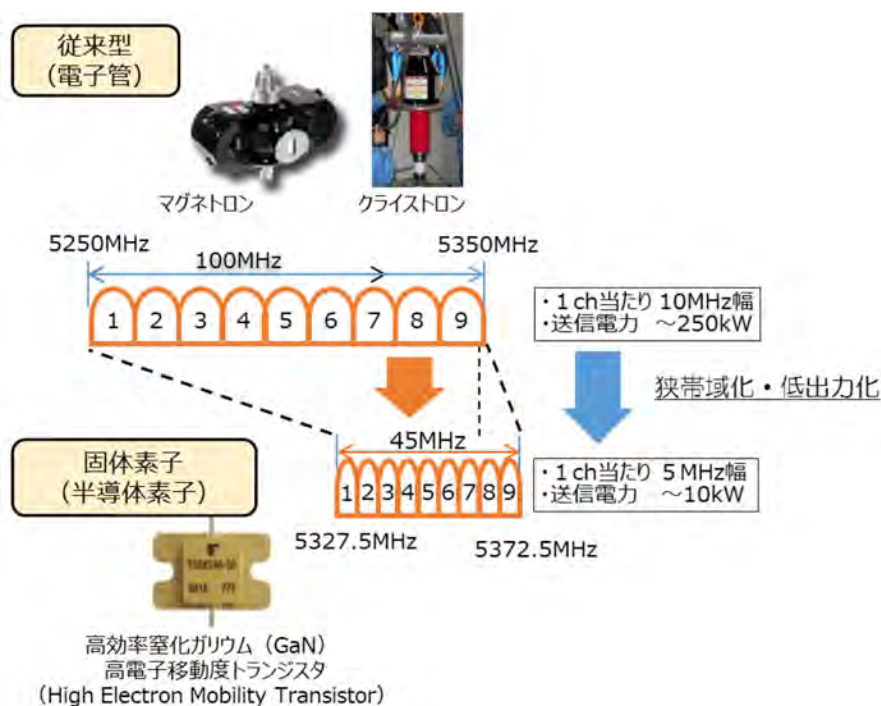


図 1. 3-4 送信素子の移行による狭帯域化と低出力化



図 1. 3-5 固体化 MP レーダーシステムの外観

気象レーダーの送信電波のスプリアス（当該レーダーの必要周波数帯以外で放射される電波）を抑圧するためのデジタル波形技術、また固体化 MP レーダーで必要となるパルス圧縮技術等が近年のレーダーにおける重要な技術要素である。

こうした気象レーダーの高度化が進んでいる一方で、電波利用の側面に目を向けると、スマートフォン市場の拡大や、無線 LAN の大容量化などに伴い、電波利用状況は逼迫した局面を迎えており、同一周波数帯域で共用する他の無線システム、具体的には 5.3GHz 帯無線 LAN は、このような技術変化に対応することが必要となる。

我が国においては、WRC-03 において 5150～5350MHz 及び 5470～5725MHz が無線 LAN を含む無線アクセスシステムに一次業務として分配され、無線標定業務、地球探査衛星及び宇宙研究業務との共用に係る DFS 及び TPC (Transmit Power Control) の仕様や共用基準に係る勧告が採択されたことを受け、平成 16 年度情報通信審議会一部答申において、無線 LAN に 5250～5350MHz が開放された際、無線標定業務との共用を考慮して、親局は DFS を具備することとされたと同時に、今後の検討課題として、無線 LAN と気象レーダーとの間で 5250～5350MHz を共用する観点から、「今後の気象レーダーの高機能化等に際しては、その諸元や技術的特性に配慮」することとされた。

平成 18 年度情報通信審議会一部答申においては、半導体素子を用いた気象レーダー技術の移行が想定され、既存システムの DFS の検出レベルや測定方法では共用できない可能性が指摘されたことを踏まえ、今後、気象レーダーが採用する技術方式の動向を注視するとともに、必要に応じ、無線 LAN の DFS に係る技術的条件を見直すことが必要であるとされ、平成 24 年度及び 29 年度情報通信審議会一部答申においても同様に、

「5250MHz から 5350MHz までの周波数の電波を使用する気象レーダーの高度化が導入される段階で現行の DFS の測定条件で適切に動作するかの検証を行い、その上で必要が生じれば DFS の測定条件の見直しを図ることが適当である」とされた。

これを受けて令和 2 年度情報通信審議会一部答申においては、動的周波数選択 (DFS) の技術的条件について、「既に仕様が確定しているパルスパターンへの速やかな対応を図る観点から、5.3GHz 帯無線 LAN の DFS について暫定的な基準」が設けられた。しかしながら「将来運用されるパルスパターンへの対応については、引き続き検討することが適当であり、今後とも 5.3GHz 帯気象レーダーのパルスパターンの調査を進め、観測性能が同等のものをまとめるなど精査を行った後、最適なパルスパターンを作成し、DFS の見直しのために無線 LAN 側と引き続き協議を行っていく必要がある」とされたところである。

1. 4 検討対象の整理

検討対象とする技術的条件の分類について、周波数による分類以外に、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では、気象レーダーの観測性能や大きさに合わせ、図 1. 4-1 に示すように、「PAWR(フェーズドアレイ)型」、「高性能型」および「汎用型」に類別している。

今回の検討対象は、現時点で新たな高度化・共用検討を実施する要望がないものや開発計画がないものは対象外とし、9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件、9.4GHz 帯汎用型気象レーダーを対象とした。

	9.7GHz帯	9.4GHz帯	5GHz帯
PAWR型	<ul style="list-style-type: none"> ・空中線電力：10kW以下 ・最大EIRP：110dBm以下 ・ビーム幅：方位角方向1.2度以下 (例 MP-PAWR等) 	※現時点で当該レーダーの開発計画がないため、本作業班での検討対象外とする。	※研究段階にあるため、将来的な検討対象とする。
高性能型	※現時点で、新たな高度化・共用検討を実施する要望がないため、本作業班での検討対象外とする。 <ul style="list-style-type: none"> ・空中線電力：10kW以下 ・最大EIRP：110dBm以下 ・ビーム幅：1.2度以下 (例 X-MP、自治体等) 	※現時点で当該レーダーの開発計画がないため、本作業班での検討対象外とする。	※現時点で、新たな高度化・共用検討を実施する要望がないため、本作業班での検討対象外とする。 <ul style="list-style-type: none"> ・空中線電力：10kW以下 ・最大EIRP：115dBm以下 ・ビーム幅：1.2度以下 (例 国交省レーダー雨量計、気象庁一般気象レーダー、気象庁空港気象ドップラーレーダー等)
汎用型	※技術的条件策定済みで制度化手続き中のため、本作業班での検討対象外とする。 <ul style="list-style-type: none"> 一参考一 ・空中線電力：400W以下 ・最大EIRP：92dBm以下 ・ビーム幅：4.5度以下 (例 民間気象会社、メーカー、自治体等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・空中線電力：400W以下 ・最大EIRP：92dBm以下 ・ビーム幅：4.5度以下 (例 民間気象会社、メーカー、自治体等) 	

※5GHz帯については“高性能型”、“汎用型”という分類はしていない。

※X帯(9.7/9.4GHz帯)については、上表の技術的条件に加え、X帯気象レーダーからのBS/CS放送受信設備への干渉軽減に関する検討を行う。

※ PAWR型：フェーズドアレイ型(Phased Array Weather Radar)。MP-PAWRなどのフェーズドアレイアンテナを有する大型のレーダーを想定。

高性能型：X-MPなどの大型のレーダーを想定。

汎用型：民間等が運用する小型のレーダーを想定。

※気象研究目的等の実用化を想定していないレーダーの諸元は含まない。

図 1. 4-1 本作業班における技術的条件の検討対象の整理

第2章では9.7GHz帯フェーズドアレイ型気象レーダーの技術的条件等の検討結果を、2.2では9.4GHz帯汎用型気象レーダー検討結果を示した。また、2.4及び第5章では、それぞれ、9GHz帯気象レーダーのBS/CS放送受信設備の干渉軽減の検討結果と、5GHz帯気象レーダーと他の無線システムとの共用条件に係る検討結果を示した。

第2章9. 7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーに係る検討

2. 1 X帯気象レーダー間の共用条件

国内で開発されたフェーズドアレイ気象レーダーは、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 DBF 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、一方で電波干渉の増大をもたらすという懸念がある。フェーズドアレイ気象レーダーネットワークを我が国だけでなく世界的な規模で展開した際、電波干渉の問題をどのように回避するかが課題となる。

電波干渉低減の検討課題を解決方法として、送信時のビームにヌルを形成し水平方向の放射量低減による与干渉低減方式、受信時は参照波活用による干渉低減方式、観測性能を維持しながら干渉低減を実現する手法である位相最適化制御による与干渉低減手法、受信時の対策として、隣接気象レーダーのパルス情報を利用する干渉低減手法が検討されている。本章では「送信ヌル形成技術の干渉軽減方式」「受信ヌル形成技術の干渉軽減方式」「隣接レーダー干渉軽減方式」について示し、気象レーダー間の共用条件について検討する。

2. 1. 1 干渉低減方式

2. 1. 1. 1 送信ヌル形成技術の干渉軽減方式

フェーズドアレイ気象レーダーは送信ビームとしてファンビームを用いるため、他のレーダーに対する与干渉増大が懸念される。対向レーダーへの干渉量低減対策として、送信ビームのヌル形成による干渉低減手法を検討する。まずは現行の MP-PAWR のパターンが有する鉛直面内の第 1 ヌルを仰角 0 度方向に近づけるようにビームをチルトさせて与干渉を低減させる単純ヌルシフトについて検討を行う。次にフェーズドアレイ気象レーダーを導入した場合の干渉状況についてシミュレーションを行い、対向気象レーダー方向への放射電力を、第 1 ファンビームのメインローブのピーク電力に対して 16dB 以上抑えることで、相互干渉する台数や時間を従来のパラボラ気象レーダーと同等程度にできることを示す。また、単純ヌルシフトでは観測角度範囲での放射強度劣化が顕著となるため、仰角 0 度方向の与干渉を低減するとともに、観測角度範囲における放射強度の劣化を最小限とする位相最適化制御について検討した。

本検討では埼玉大学に設置された MP-PAWR の X-MP を想定した運用モードを対象に評価を行っている。運用モードの送信ビームを図 2. 1-1 に示す。送信ビームは低仰角側から #1、#2、#3、#4 となっている。

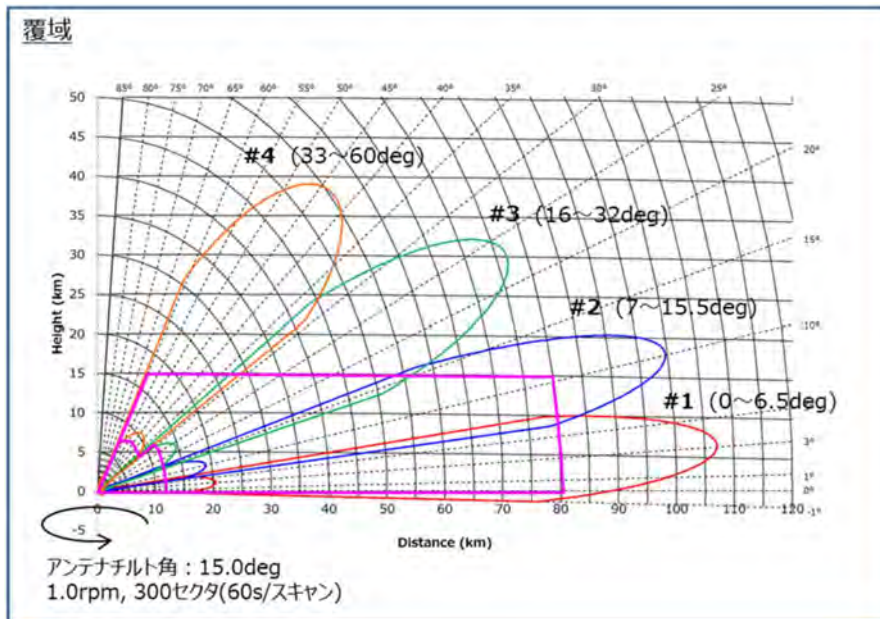


図 2. 1-1 MP-PAWR 運用モードの送信ビーム

送信ヌル形成とは送信アンテナの鉛直方向に並ぶアンテナサブアレイの位相を制御し、MP-PAWR のパターンが有する鉛直面内のヌルを仰角 0 度方向に近づけるようにビームをチルトさせ、与干渉量の低減を図る手法である。

単純ヌルシフトでは対向気象レーダー方向への放射強度が目標値まで低減されるまで、送信ビームをチルトさせる。単純ヌルシフトでは送信ビームのチルトが大きいため、観測領域内で放射電力が低下し、観測範囲が低下する影響が出る。そのため観測性能への影響を最小化する手法として位相最適化制御が行われる。送信ビーム#1 は低仰角を観測するために、対向気象レーダー方向への放射電力が 4 つの送信ビームのなかで最も強くなる。#1 については、送信時対策なし、即ち通常の運用モードと、単純ヌルシフトの 2 つの送信ビームについて、仰角方向送信電力パターンのシミュレーション値を図 2. 1-2 に示す。横軸は仰角であり 0 度方向に対向気象レーダーがあることを想定している。縦軸は運用モードの#1 のピーク電力を 0 dB とした規格化電力を示している。黒破線は#1 の観測範囲を示している。単純ヌルシフトにより、対向気象レーダー方向への送信電力を運用モード#1 のピークに対して約 55dB 低減できることがシミュレーションからわかった。単純ヌルシフトの放射電力は運用モードに比べて、観測範囲仰角の内 0.0° から 6.0° の範囲で小さくなっている。これにより観測範囲の低下等観測品質への悪影響が懸念される。

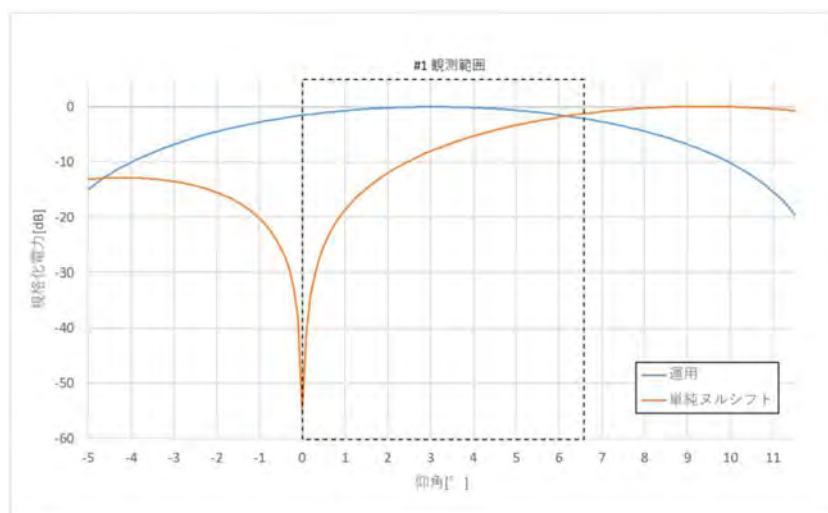


図 2. 1-2 送信ビーム#1 の仰角方向送信電力パターン

送信ビーム#2 では運用モードの送信ヌルが対向気象レーダー近傍（約 -1° ）に向いている。単純ヌルシフトと位相最適化制御の送信電力パターンが検討されたが、送信時対策なし・単純ヌルシフト・位相最適化制御の干渉低減量で有意な差が見られない。送信ビーム#3 及び#4 では、送信時対策なし・単純ヌルシフト・位相最適化制御の差が有意に認められる。図 2. 1-3 に送信ビーム#3 について、運用モード（青）、単純ヌルシフト（橙）、位相最適化制御（緑）の送信電力パターンを示す。単純ヌルシフト及び位相最適化では運用モードよりも対向気象レーダー方向である仰角 0° 方向への放射電力が低下している。黒破線で囲まれた#3 の観測範囲に注目すると、単純ヌルシフトではビームのチルト量が大きいため、仰角 22 度以上では放射電力が運用モードに比べて低下している。一方位相最適化では、ビームをほとんどチルトしないため、#3 観測範囲内では、運用モードと同程度の電力を送信している。以上より、単純ヌルシフトでは観測への悪影響が懸念される一方で、位相最適化制御では観測への影響を最小にできる。

図 2. 1-4 に送信ビーム#4 について同様に送信電力パターンを示す。#4 でも#3 と同様に位相最適化制御では対向気象レーダー方向への送信電力を低減させると同時に、観測への影響を最小化できる。

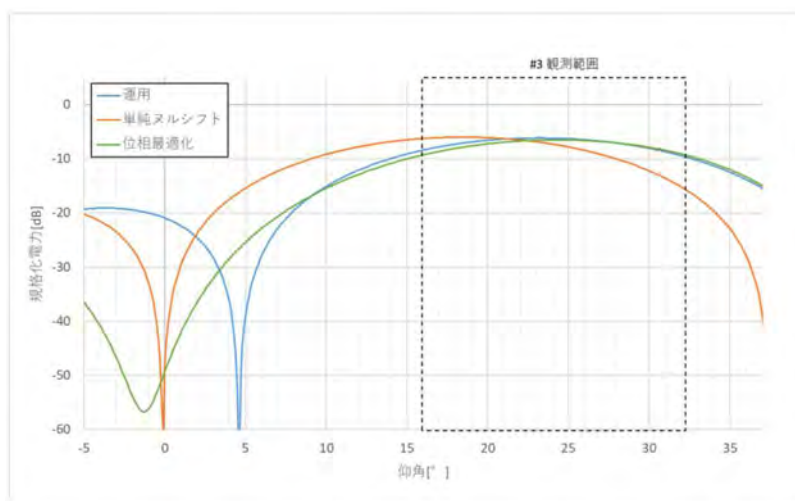


図 2. 1-3 送信ビーム#3 の仰角方向送信電力パターン

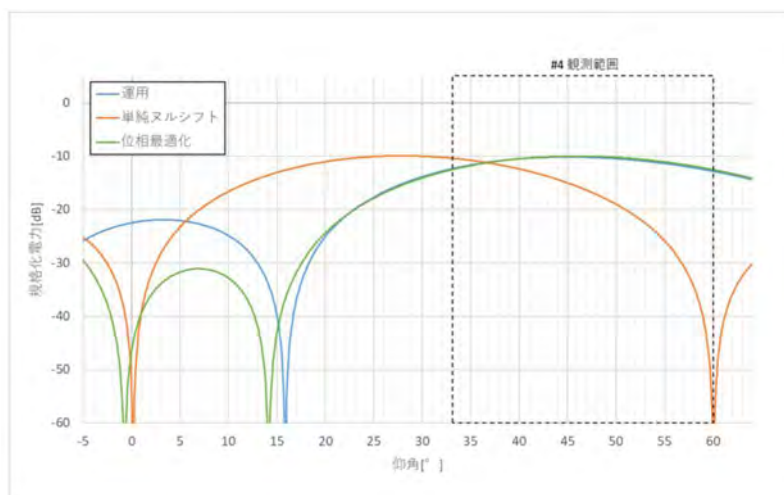


図 2. 1-4 送信ビーム#4 の仰角方向送信電力パターン

干渉低減量について、単純ヌルシフト及び位相最適化制御による干渉低減対策を適用することで、干渉低減量の目標値である 16 dB を超える 20dB 以上の干渉低減を達成することが可能となる。観測性能については、単純ヌルシフトでは観測範囲内の放射電力が低下することに伴う、探知範囲の低下の影響がみられるが、位相最適化制御では干渉対策を実施しない運用モードと同等の結果が得られる。送信時干渉低減対策手法間の比較を表 2. 1-1 に示す。

既存のパラボラレーダーに対して、MP-PAWR が許容できない干渉を与える場合に限り、必要な抑圧量の分だけこれらの干渉低減対策を適用することにより、MP-PAWR の観測範囲を極力維持しながら既存のパラボラレーダーへの干渉を低減することが可能である。なお、#1#2 の送信ビームに対して干渉低減が必要な場合は、メインビームが被干渉局に影響を与えるため、単純ヌルシフトを選択することとなる。

表 2. 1-1 送信時干渉低減対策手法間の比較

干渉低減対策手法	与干渉低減	観測性能	コメント
対策なし	×	○	#1の干渉低減量が-4 dBで目標を達成しない。
送信ブランキング	○	×	干渉低減量は目標を達成する。 ブランキング設定方向の観測ができない。
単純マルチシフト	○	△	干渉低減量は目標を達成する。 観測範囲内の放射電力低下による、探知範囲低下の影響がある。
位相最適化制御	○	○	干渉低減量は目標を達成する。 運用モードと同様の観測結果が得られた。

2. 1. 1. 2 受信ヌル形成技術の干渉軽減方式

フェーズドアレイ気象レーダー（PAWR）は送信ビームとしてファンビームを用いるため、ほかのレーダーに対する与干渉増大が懸念される。被干渉側が同じく PAWR の場合、受信ビームで干渉方向に深いヌルを形成することで被干渉レベルの増大による影響を低減できると考えられる（図 2. 1-5）。

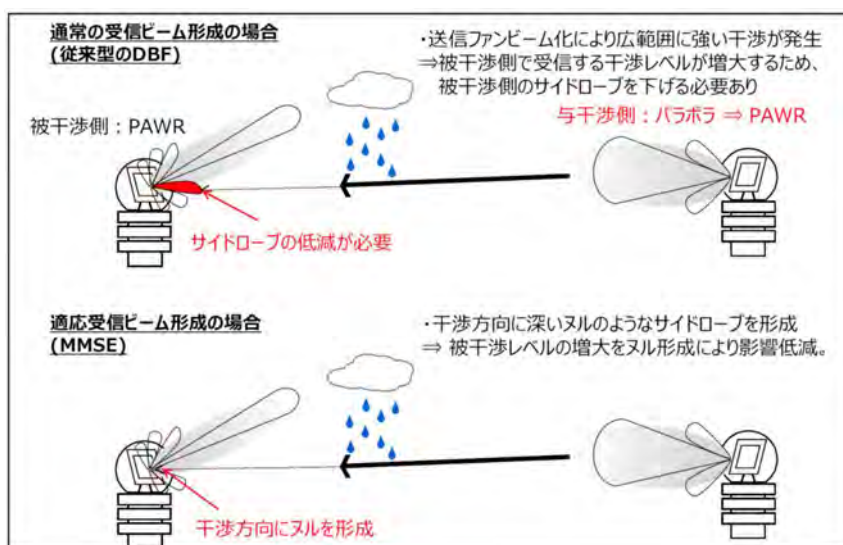


図 2. 1-5 適応受信ビーム形成の概念図

現在設置されているX帯のパラボラレーダーをフェーズドアレイ型に置換した場合、干渉台数は倍となるが、PAWRの干渉電力を10dB低減することで現状と同じ干渉台数に抑えられることが分かっている。また、干渉の内訳はメイン-メイン干渉が支配的であ

ることより受信ヌル形成技術は有効と考えられる。

以下では、受信ビーム形成の概略、受信ヌル制御と送信ヌル制御の比較及び送受ヌルの運用方法について示す。

受信ビーム形成の概略

図 2. 1-6 に受信ビーム形成の概略を示す。図中の x 、 y 、 n 、 \hat{x} 、 w はそれぞれアンテナ素子への入力信号、取得される受信信号、熱雑音、アンテナ素子への入力信号の推定値、ウェイトを表す。また、添え字の l 、 m 、 n は、それぞれパルス番号 ($1 \sim L$)、入力信号の角度方向の番号 ($1 \sim M$)、EL 方向の素子番号 ($1 \sim N$) を表す。

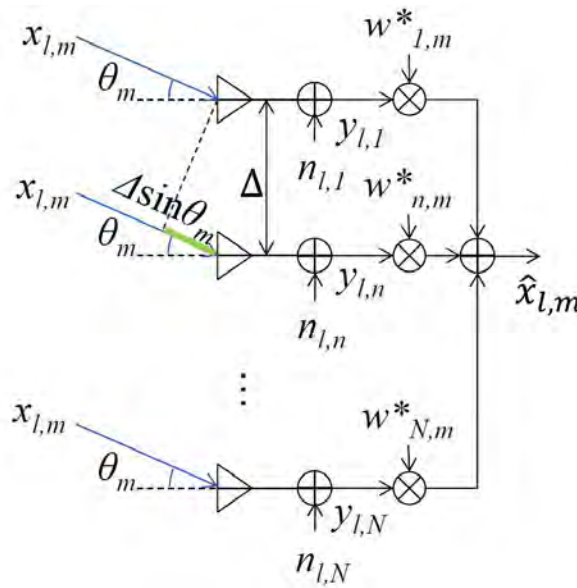


図 2. 1-6 PAWR のシステムモデル

角度方向が m 番目のアンテナへの入力信号である $x_{l,m}$ が平面波であると仮定すると、各素子間の位相差情報を扱うステアリングベクトルは下式で定義できる。

$$S_m = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta \sin \theta_m}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta(N-1) \sin \theta_m} \right]^T$$

上記のステアリングベクトル S_m を M 個の角度方向で並べた方向行列 S は下記となる。

$$S = [S_1, S_2, \dots, S_M]$$

l 番目のパルス番号の受信信号 y_l は、方向行列 S を用いて下記で表される。

$$y_l = Sx_l + n_l$$

※但し、 n_l は、 $n_l = [n_{l,1}, n_{l,2}, \dots, n_{l,N}]^T$

y_l は、 $y_l = [y_{l,1}, y_{l,2}, \dots, y_{l,N}]^T$

x_l は、 $x_l = [x_{l,1}, x_{l,2}, \dots, x_{l,N}]^T$

上式で表される受信信号 y_l に下記のようにウェイト w_m を乗算することで、受信信号

y_t から m 番目の角度方向の推定値 $\hat{x}_{t,m}$ を算出することが可能である。

$$\hat{x}_{t,m} = w_m^H y_t$$

上記のような複数の角度方向を同時に電子的に走査する処理を DBF と呼び、ここでは特にウェイト w_m を次式のように一様な振幅で与えるものを FR (Fourier) と呼ぶ。

$$w_m = \frac{s_m}{N}$$

一方、本検討で用いる MMSE (Minimum Mean Square Error) では、ウェイト w_m は下記のような式で表される。

$$w_m = \frac{R^{-1}s_m}{s_m^H R^{-1}s_m}$$

但し、 R は次式で与えられる。

$$R = E[y_t y_t^H]$$

DBF で全方向の受信電力を同時に観測したときの各観測方向の電力 p_t は次のように計算される。

$$p_t = \text{diag}[W^H R W]$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_M]$$

$\text{Diag}[\cdot]$ は、行列の対角成分を抽出してベクトル化する処理を表す。 p_t を、DBF 出力電力と定義する。

図 2. 1-7 に、DBF 出力電力 p_t の概念図を示す。ここでは例として、仰角 0 度からひとつの平面波が PAWR に到来しているときの MMSE ウェイトの DBF 出力電力を説明する。

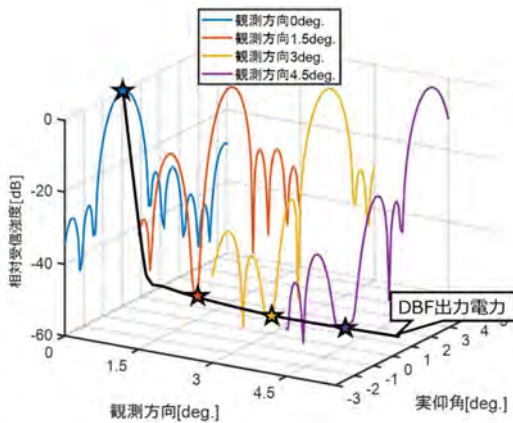


図 2. 1-7 DBF 出力電力の概念図

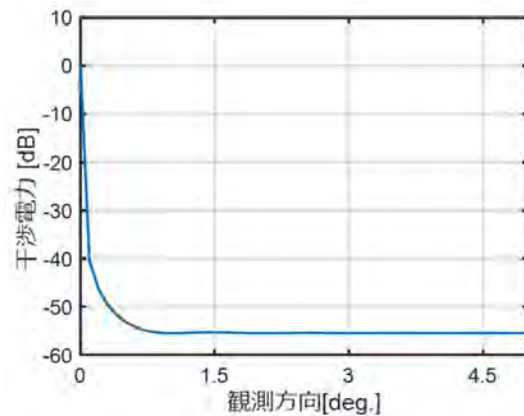


図 2. 1-8 各観測方向における干渉電力

図 2. 1-7 の、青、赤、黄色、紫の実線はそれぞれ観測仰角が 0° 、 1.5° 、 3.0° 、 4.5° のときの MMSE ウェイトによる指向性パターンを示している。これらに対する観測仰角の軸は、各観測仰角を担う指向性パターンの指向方向を示していて、実仰角の軸は

各指向性パターンの仰角軸（一般的な指向性パターンの横軸）である。いま、到来波は 0° 方向からの干渉信号のみを仮定しているため、各指向性パターンの、 0° の点を結んだ黒線を、横軸観測仰角、縦軸相対受信強度で見たものが“DBF 出力電力”であり、この場合“各観測方向における干渉電力”に相当する（図 2. 1-8）。

到来信号が仰角方向に広がりを持つ分布関数となる場合、到来信号の分布関数と、各指向性パターンとの内積が DBF 出力電力として、各観測仰角にプロットされる。本報告書では、FR による DBF 出力電力を FR パターン、MMSE による DBF 出力電力を MMSE パターンと定義する。図 2. 1-8 の MMSE パターンにおいては、干渉波が到来する 0° 以外の方向の値が、干渉波によって生じる不要波の強度を示している。つまり、従来型の FR よりも高い干渉低減を行うためには、 0° 以外の方向の MMSE パターンの値が FR パターンの値よりも小さい必要がある。このことから、本検討では、FR パターンと MMSE パターンの、仰角 $1.4^\circ \sim 4.0^\circ$ の範囲の積分値の比を、干渉低減量として評価する。

受信ヌル制御と送信ヌル制御の比較及び運用方法

送信ヌル制御は、送信ファンビームのヌルを干渉レーダー方向に向けることで、干渉低減を図るものである。送信ヌル制御によって干渉量は低減されるものの、低仰角観測性能が劣化してしまう問題がある。それに対して、受信側はアンテナ開口長が送信よりも大きくビーム幅が狭いため、低仰角観測性能の劣化が送信側よりも起きにくい。このことを表 2. 1-2 にまとめる。

表 2. 1-2 受信ヌルと送信ヌルの比較

	受信ヌル制御	送信ヌル制御
干渉低減量 (0° の利得)	10.5 dB (観測方向 $1.4^\circ \sim 4^\circ$ の平均)	20 dB
低仰角観測性能 (1.4° 方向の利得)	0 dB	-16 dB (理論値)

表中の受信ヌルの干渉低減量は、FR パターンと MMSE パターンの $1.4^\circ \sim 4^\circ$ における受信電力の比を示している。また、送信ヌル制御の干渉低減量は、送信ビーム#1 の、送信ヌル制御前と制御後の 0° 方向の相対放射強度の比を示している。低仰角観測性能の評価指標としては、仰角 1.4° の相対放射利得を用いた。

図 2. 1-9 に、送信ビーム#1 と、観測方向 1.4° の MMSE ウェイトによる指向性を示す（理想条件下での計算値）。

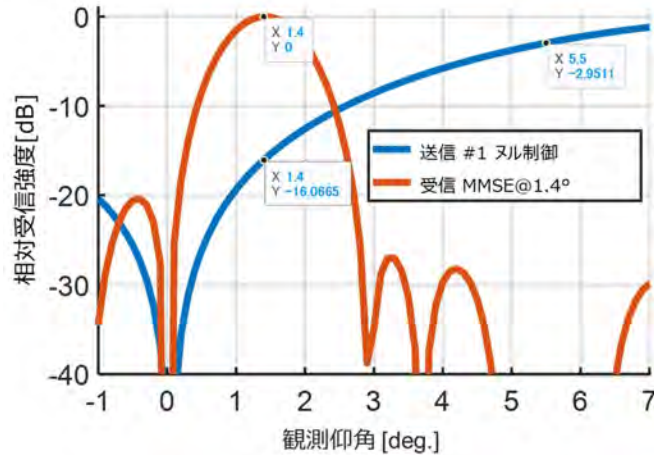


図 2. 1-9 送信ビーム#1(ヌル制御後)と MMSE ウェイト(観測仰角 1.4°)の指向性パターンの比較

表 2. 1-2 と図 2. 1-9 から、受信ヌル制御による干渉低減量よりも、送信ヌル制御による干渉低減量の方が約 10dB 大きいものの、低仰角観測性能は受信ヌル制御の方が送信ヌル制御よりも劣化が抑えられていることが分かる。具体的には仰角 1.4° の観測利得に着目すると、受信ヌル制御の観測利得劣化量が 0dB であるのに対し、送信ヌル制御によって 16dB の利得劣化が発生している。このことより、メイン-メイン干渉対策を行う場合、必要な干渉低減量が 10dB 以下のときは被干渉レーダーが受信ヌル制御、10dB 以上のときは与干渉レーダーが送信ヌル制御を行うことで、パラボラレーダーを PAWR に置換しても現状の累積干渉件数を維持できる。

2. 1. 1. 3 隣接レーダーの干渉軽減方式

国内で開発された MP-PAWR は、従来のパラボラアンテナと異なり、送信時に広いファンビームを用いるため電波干渉の増大が懸念されており、より高度な干渉対策が必要になると考えられる。干渉対策として、異なる周波数チャンネルに対する干渉対策と、同一周波数チャンネルに対する干渉対策をそれぞれ検討する。

本節ではまず同一周波数チャンネル干渉対策について示す。既設の気象レーダーには、着目データと隣接観測データとの電力比を閾値と比較することで、干渉検出と干渉低減を行う受信信号処理が搭載されている。現行処理では、降水エコーを誤って抑圧しないように閾値を 20dB 程度と高く設定する必要があるが、電力比が閾値に満たない干渉は見逃され観測精度が低下する。この方式に対し、対向レーダー間のパルス情報を付加情報として利用することで精度良く干渉を検出し低減する方式がある。

次に他チャンネルの気象レーダーからの干渉において、広帯域受信機を用いた干渉検出と無効値化による干渉除去する方式について示す。

同一周波数チャネル干渉対策

ここでは同一周波数チャネル干渉対策として対向レーダー情報を利用する干渉低減方式を説明するが、その前に現行の干渉低減方式について説明する。

ア 現行の干渉低減方式

現在運用中の気象レーダーには、干渉を低減する信号処理が搭載されている。この処理の一例として、観測データのレンジ、パルスの各信号において、隣接パルスや隣接レンジとの電力差をモニタしておき、受信電力に急激な変動があった場合干渉混入ありと判定し、干渉信号周辺の無干渉信号を用いて振幅調整することで干渉を低減する方式がとられている。

国内外で普及が進む固体素子気象レーダーは、長パルス送信とパルス圧縮受信技術により遠距離観測の感度低下を防ぎ、長パルス送信による近距離の不感エリアを短パルス観測で補う運用形態を採用している。現行の干渉低減処理においては、パルス圧縮への影響を加味し、パルス圧縮前後で異なる処理を搭載する製品もある。具体的には、着目データの受信信号 $x[n][m]$ に対し、パルス圧縮前は数式 2. 1-1 に、パルス圧縮後には数式 2. 1-2 に従い、干渉を検出し低減する。 n はパルス番号、 m はレンジ番号である。

$$x_{bp}[n][m] = \begin{cases} \sqrt{\frac{1/2(|x[n][m-k]|^2 + |x[n][m+k]|^2)}{|x[n][m]|^2}} x[n][m], & (r_1 < \alpha_1 \wedge r_2 > \alpha_2 \wedge r_3 > \alpha_3) \\ x[n][m], & (else) \end{cases} \quad \text{数式 2. 1-1}$$

$$x_{ap}[n][m] = \begin{cases} \frac{|x_{bp}[n-1][m]|}{|x_{bp}[n][m]|} x_{bp}[n][m], & (r_1 < \alpha_1 \wedge r_2 > \alpha_2) \\ x_{bp}[n][m], & (else) \end{cases} \quad \text{数式 2. 1-2}$$

なお、 r_1 は $x[n-2][m]$ と $x[n-1][m]$ の電力差、 r_2 は $x[n-1][m]$ と $x[n][m]$ の電力差、 r_3 は $x[n][m-k]$ と $x[n][m+k]$ の電力の平均値との $x[n][m]$ 電力差である。 $\alpha_1 \sim \alpha_2$ は干渉検出閾値である。

イ 対向レーダー情報を利用する干渉低減方式

干渉の可能性のある対向レーダー間で送信パルス情報を共有することで、より高精度に干渉検出、低減する方式について検討する。検討方式は、干渉が発生した際、その干渉時間が長く問題となる長パルス干渉の低減を目的としている。したがって、短パルス

干渉は、現行方式同様にパルス圧縮前の干渉低減処理から低減するものとする。

対向レーダー間のパルス情報を利用する干渉低減方式概要図を図 2. 1-10 に示す。

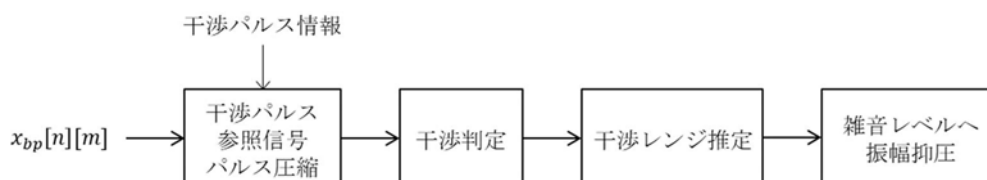


図 2. 1-10 対向レーダー間のパルス情報を利用する干渉低減方式概要図

対向レーダー情報によるパルス圧縮では、事前測定やデータベース等から入手した与干渉レーダーの送信パルス情報を用いて受信信号 $x_{bp}[n][m]$ をパルス圧縮する。

一般的に、レーダーの送信波形はレンジ分解能やサイドローブ特性等の仕様に基づき各レーダーで独自に設計するため、レーダー間の送信波形の相関は必ずしも高くない。この場合、被干渉レーダーの参照信号によるパルス圧縮では干渉信号のピークが積み上がらず、干渉信号と所望信号の電力差が生じにくいため干渉検出が困難になる可能性がある。以上に対し、干渉パルスの参照信号を用いパルス圧縮することで干渉レンジに適切に干渉電力を集中することができる。すなわち、干渉信号と無干渉信号の電力差が大きくなりやすく精度の良い干渉検出が可能になる。

干渉検出は、数式 2. 1-3 の検出条件に基づき干渉混入を判定し、干渉が存在する場合には、干渉パルス長情報を用いて干渉レンジ番号 $m_t=[m_s, \dots, m_e]$ を推定する。

干渉検出したレンジに対して干渉低減処理を適用する。具体的には、数式 2. 1-3 のとおり、干渉レンジデータの振幅を雑音電力 N_{power} へ抑圧することで干渉を低減する。

$$x_{NaN}[n][m] = \begin{cases} \sqrt{N_{power}} e^{j\varphi_{nm}}, & (m_s \leq m \leq m_e) \\ x_{bp}[n][m], & (else) \end{cases} \quad \text{数式 2. 1-3}$$

φ_{nm} は位相成分であり、一様分布からランダムに生成する。

なお、本処理は、水平・垂直偏波に対して共通に実施される。すなわち、水平・垂直偏波それぞれで干渉検出し、どちらかの偏波のみで干渉が検出された場合でも、両偏波の該当データを無効値化する。

他チャネル干渉対策

他チャネルの気象レーダーからの干渉において、広帯域受信機を用いた干渉検出と無効値化による干渉除去方式について示す。

ア 広帯域受信機の概要

他チャンネルの気象レーダー間干渉時の周波数スペクトル配置の概略図を図 2. 1-11 に示す。

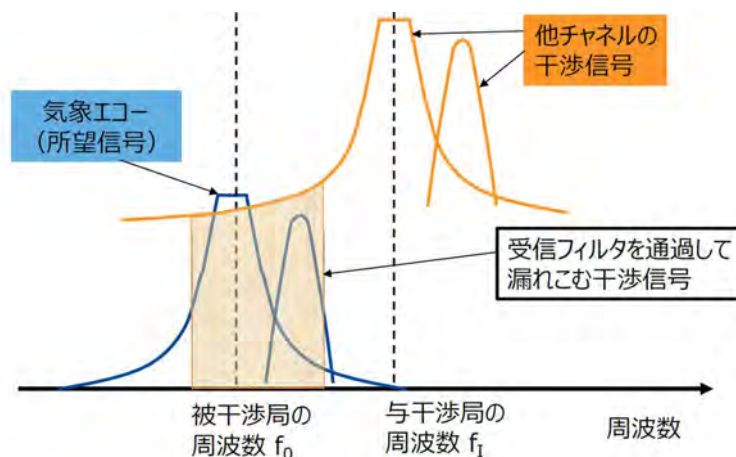


図 2. 1-11 他チャンネルの気象レーダー間干渉時の周波数スペクトル配置

図 2. 1-11 に示すように与干渉局から放射される干渉信号のスペクトルの一部は被干渉局の受信帯域に漏れ込み、被干渉局側で受信する気象エコーと重畳されて観測精度に影響を与えることが懸念される。被干渉局で受信する干渉波の時間波形は、受信機内のフィルタにより周波数特性が重畳され、干渉波の信号電力によっては A/D コンバーターの飽和による信号の歪みが発生する。このため、被干渉局の受信信号に含まれる干渉波の波形は干渉局から送信された波形とは大きく異なるものとなる。

一方、他チャンネルでの干渉では対向レーダーの干渉パルス情報として入手する参照信号と被干渉局の受信信号中に含まれる干渉波とは大きく波形が異なるため、同一チャンネル間の干渉時と比較して干渉検出における検出の感度と精度を確保することが難しくなるという問題がある。そこで、干渉検出における感度と精度の向上のために干渉検出の機能に特化した受信機を追加することを検討する。さらに、気象レーダーの割り当て範囲内を網羅できるよう受信機を広帯域に設計することで、将来的には 1 チャンネルだけではなく任意の複数チャンネルからの干渉波を常時検出し必要に応じて干渉除去することも可能となる。ここでは、気象レーダー間の干渉検出の機能に特化し、複数チャンネルの干渉検出も可能とする受信機を広帯域受信機と定義する。気象レーダーの受信機に広帯域受信機を加えたときのシステム概念図を図 2. 1-12 に示す。広帯域受信機では、干渉検出の周波数を与干渉局の周波数に合わせることで干渉検出の感度と精度の確保をはかる。

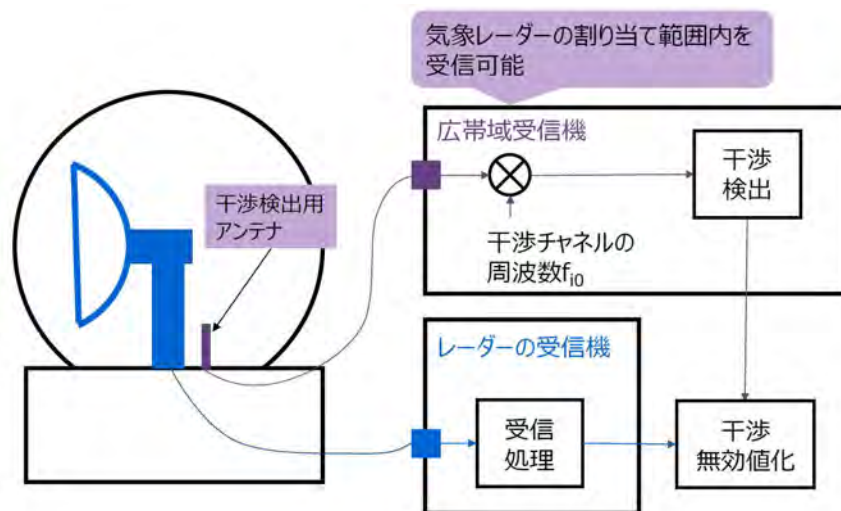


図 2. 1-12 広帯域受信機のシステム概念図

イ 広帯域受信機を用いた干渉検出、干渉除去処理

広帯域受信機を用いた干渉検出、干渉除去処理の概略ブロック図を図 2. 1-13 に示す。

図 2. 1-13 に示す広帯域受信機を用いた手法では、干渉波の中心周波数 f_I で干渉波信号の抽出を行えるよう、気象レーダーの受信機とは別に干渉検出の機能に特化した受信機を追加している。干渉波には短パルス信号と長パルス信号の両方が含まれるが、対向レーダーの長パルス信号の中心周波数を通過帯域として信号を取り出し対向レーダーの参照信号でパルス圧縮を行うことで検出感度を高くし、高精度に干渉箇所を特定することが可能となる。また、干渉波中に含まれる長パルス信号の干渉位置を特定し、パルス信号の長さ、長パルスと短パルス信号の間隔等の情報も対向レーダー情報から得ることで長パルスと短パルスの干渉波を完全に取り除くことができる。

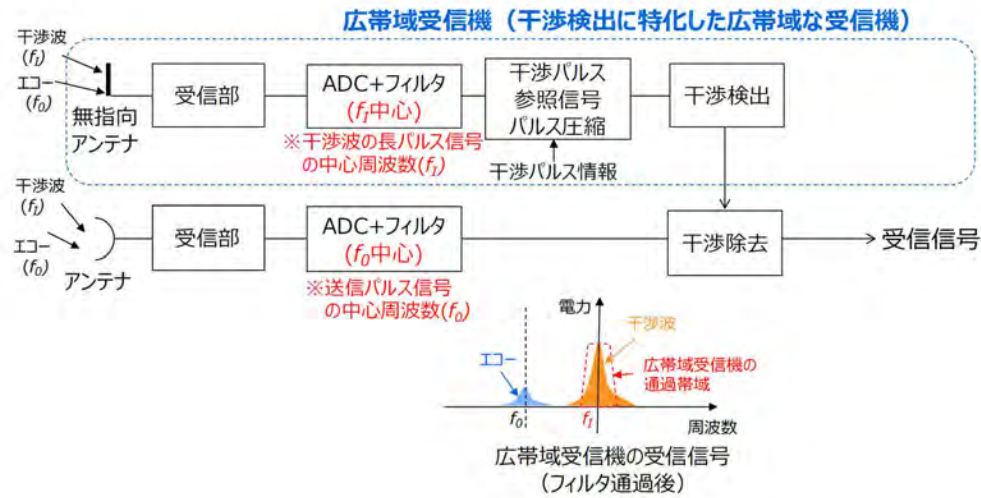


図 2. 1-13 広帯域受信機を用いた干渉検出、干渉除去

広帯域受信機で干渉検出したレンジに対して干渉除去処理を適用する。具体的には、数式 2. 1-4 のとおり、干渉レンジデータの振幅を雑音電力 N_{power} へ抑圧することで干渉を低減する。 m_s と m_e は、それぞれ干渉の始まるレンジ番号と干渉の終了するレンジ番号である。

$$x_{NaN}[n][m] = \begin{cases} \sqrt{N_{power}} e^{j\varphi_{nm}}, & (m_s \leq m \leq m_e) \\ x_{bp}[n][m], & (else) \end{cases} \quad \text{数式 2. 1-4}$$

φ_{nm} は位相成分であり、一様分布からランダムに生成する。

以降で本干渉除去処理を無効値化と呼び、広帯域受信機を使った干渉検出と無効値化による干渉除去処理をまとめて広帯域受信機による干渉除去と呼ぶことにする。なお、無効値化は、偏波情報の劣化をできるだけ防ぐために水平・垂直偏波に対して共通に実施する。広帯域受信機では、水平・垂直偏波のどちらかの偏波で干渉検出を行い、両偏波の該当データを無効値化する。

干渉が複数のチャンネルで生じている場合、ADC からの出力に対して干渉波の中心周波数で周波数変換を行いフィルタでの不要信号の抑圧を行う処理系統を複数用意しておくことで、複数の干渉波を同時に検出することも可能となる。

2. 1. 2 共用条件

送信ヌル形成技術では、単純ヌルシフト及び位相最適化制御による干渉低減対策を適用することで、20 dB以上の干渉低減が可能である。低仰角の観測を行う送信ファンビームでは干渉低減量達成のため単純ヌルシフトによる干渉低減手法が適当であり、高仰角の観測を行うファンビームでは観測への影響を最小限にとどめるため位相最適化制御による干渉低減手法が適当である。

受信ヌル形成技術では、10.5dBの干渉低減が可能である。干渉低減量は送信ヌル制御の方が優れているものの、低仰角観測性能は受信ヌル制御の方が劣化を抑えられる。

対向レーダー情報を利用する干渉低減方式は、同一周波数チャンネル干渉対策として有効であり、特に二重偏波パラメータにおいて効果が大きい。但し、同一チャンネルの干渉においてはI/S=0 dB付近すなわち気象エコーと干渉波の受信レベルが近い場合、対向レーダー情報を用いても干渉を検出できないことがあり観測誤差が発生する。以上を踏まえると、本方式は現行方式に対して精度改善を見込めることから搭載を推奨される方式ではあるが、場合によっては干渉影響を完全に除去できないため、同一チャンネルについては許容干渉基準の緩和は適当でないとする。

他チャンネルの気象レーダー間干渉において、広帯域受信機を用いた干渉検出、干渉除去を行うことで、I/N 0dB~35dBのサイドメイン（メインーサイド）干渉を許容できる。ただし、広帯域受信機の干渉除去を速度幅の観測にも適用する場合には、速度幅の算出式の選択に留意する必要がある。

2. 2 同一周波数帯の他の無線システムとの共用条件

同一周波数帯での他の無線システムとして、沿岸監視用レーダーと衛星放送受信設備へ悪影響を起さず、利用可能となる条件を検討する。

2. 2. 1 沿岸監視用レーダー

2. 2. 1. 1 沿岸監視用レーダーの概要

沿岸監視レーダーは、海上交通管制や港湾・漁港管理、不審船舶等の監視の役割を担っている。使用周波数帯は 9740 MHz 帯であり、海面方向に電波を照射し、陸に向けては電波を出さないようなブランキング機能と干渉除去機能を有している。2018 年時点では、国・地方公共団体を始め、電力・エネルギー関係、漁業関係等の 85 局が運用されている。そのうち、81 局がマグネトロン型、4 局が固体素子型レーダーであり、現状ではマグネトロン型レーダーが主流となっている。沿岸監視レーダー設備の主な諸元を表 2. 2 2-1 にまとめる。

表 2. 2 2-1 沿岸監視レーダーの主要諸元

	マグネトロン A	マグネトロン B	固体素子 A	固体素子 B
周波数	9,740 MHz ±30 MHz	9,740 MHz ±12 MHz	9,740 MHz ±15 MHz	9,740 MHz ±4 MHz
送信電力	25 kW	25 kW	200 W	200 W
占有帯域幅	40 MHz	40 MHz	47.5 MHz	54.5 MHz
パルス送信方法	0.12 μs/ 2760 Hz 0.22 μs/ 1500 Hz 0.38 μs/ 1000 Hz 0.68 μs/ 1000 Hz 1.2 μs/ 600 Hz	0.1 μs/ 1900 Hz 0.3 μs/ 1900 Hz 0.6 μs/ 1100 Hz 1.2 μs/ 570 Hz	(P0N) 0.15 μs~1.2 μs (Q0N) 7.5 μs~18.3 μs	(P0N) 0.16 μs~0.3 μs (Q0N) 2.8 μs~18.3 μs
アンテナ利得	33 dBi	34 dBi	36 dBi	34 dBi
アンテナ回転数	24 rpm	22 rpm	24 rpm	22 rpm

沿岸監視レーダーの特徴として、気象レーダーに比べレンジ分解能が高く帯域が広い。すなわち、干渉が他帯域に漏れこみやすい傾向がある。また、アンテナは船舶レーダーのように横長であり、仰角方向のビームは広角で、方位方向のビームの指向性が高い。アンテナは高速回転しており、X 帯気象レーダーの 8~10 倍程度の速度で回転している。

2. 2. 1. 2 干渉シミュレーション

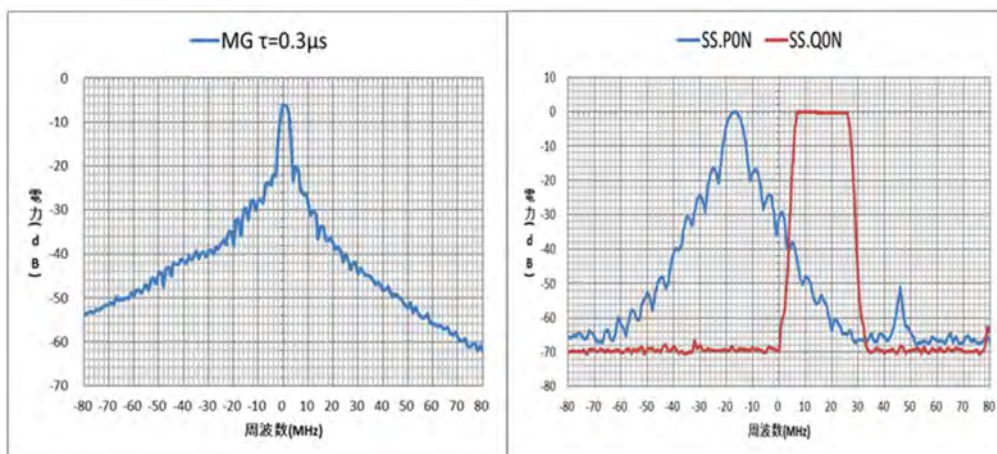
沿岸監視レーダー諸元

表 2. 2-2 に沿岸監視レーダーの諸元を示す。沿岸監視レーダーには、マグネトロン型と固体素子型の 2 つのタイプが存在する。図 2. 2 2-2. 2-1 にそれぞれの送信スペクトルを示す。

沿岸監視レーダーの特徴として、気象レーダーに比べレンジ分解能が高く帯域が広いことがあげられる。そのため干渉が他帯域に漏れこみやすい傾向がある。また、アンテナは船舶レーダーのように横長であり、仰角方向のビームは広角で、方位方向のビームの指向性が高い。

表 2. 2-2 沿岸監視レーダー諸元

項目	諸元	
	マグネトロン型	固体素子型
設置位置	指定位置による	
観測偏波	水平偏波	
送信電力	25 kW	200 W
送信給電損失	1 dB (代表値)	
アンテナ利得	35.3 dBi	
サイドローブ減衰	-34 dB	
アンテナビーム幅	水平 : 0.41 度	垂直 : 16.3 度
送信パルス幅	0.3 μ s / 0.6 μ s *1	P0N: 0.16 μ s Q0N: 18.3 μ s
送信スペクトル	図 2. 2 2-2. 2-	
周波数	9740 MHz \pm 12.175 MHz	P0N: 9725 MHz \pm 4 MHz Q0N: 9755 MHz \pm 4 MHz
占有周波数帯幅	40 MHz	54.5 MHz



(1) マグネトロン型*1

(2) 固体素子型

*1 パルス幅はスペクトルが広い0.3 μ s で評価

図 2. 2 2-2. 2-1 沿岸監視レーダーの送信スペクトル

沿岸監視レーダー干渉が降水エコー精度に与える影響評価

沿岸監視レーダー干渉が気象レーダーへ影響を与える干渉条件を明らかにするために、干渉の時間信号擬似的に生成した降水エコーを用いるシミュレーションを実施した。評価では、図 2. 22-2 に示すシミュレーションから、沿岸監視レーダー干渉を 2 dB 刻みで増加させながら降水エコー真値に与える誤差を計算する。シミュレーションでは、現行の気象レーダーで用いられている、隣接レーダーの干渉軽減（共用）方式で干渉を除去している。

なお、図 2. 22-3 のとおり、本検討では LNA (Low Noise Amplifier) 入力端を干渉電力 I と規定する。降水エコーの生成諸元を表 2. 22-3 にまとめる。

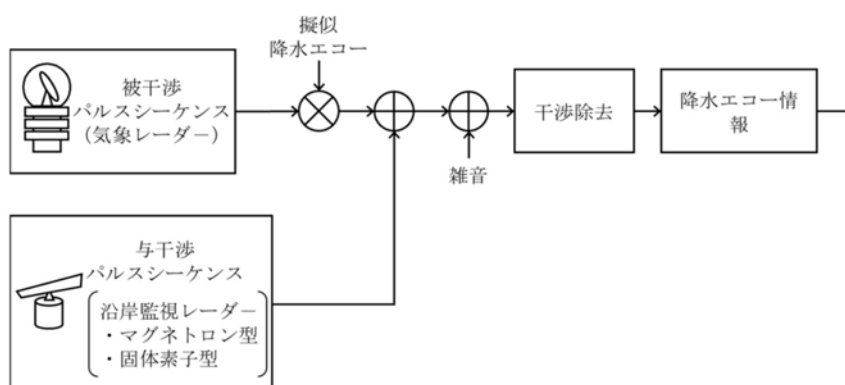


図 2. 22-2 シミュレーション概要

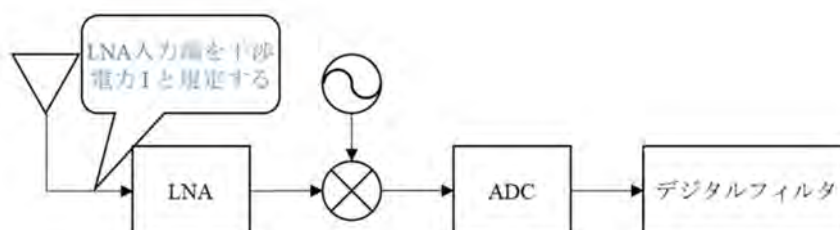


図 2. 22-3 干渉電力 I の規定点

表 2. 22-3 降水エコー生成諸元

平均 S/N	20 dB
平均速度	4 m/s
速度幅	2 m/s
反射因子差	3 dB
偏波間位相差	-60 deg.
偏波間相関	0.99999

表 2. 2-2 に示す、沿岸監視レーダーの占有周波数帯幅は 40 MHz 以上である。一方、気象レーダーの受信帯域は 1.2MHz 程度である。したがって、たとえ中心周波数が一致していても、干渉信号の一部しか受信デジタルフィルタを通過しない。図 2. 2-4 及び図 2. 2-5 に LNA 入力端の干渉波形と気象レーダーの受信デジタルフィルタ通過後の干渉波形を示す。各図は、気象レーダーの中心周波数がマグネトロン型と固体素子型の長パルス信号の中心周波数にそれぞれ一致する場合の特性を示している。青は LNA 入力端での信号波形、オレンジが受信デジタルフィルタ通過後の波形、左がマグネトロン型、右が固体素子型の長パルス波形である。本検討では、ADC が I/N=80 dB で飽和すると仮定している。

図 2. 2-4 及び図 2. 2-5 のマグネトロン型の波形に着目すると、受信デジタルフィルタ通過前後で干渉波形のパルス幅はやや拡幅するものの、パルス幅は $1\mu s$ 程度である。一方、固体素子型の波形に着目すると、ADC 飽和の有無で様相が異なる。図 2. 2-4 の ADC 飽和がない場合の固体素子型の波形を見ると、受信デジタルフィルタ通過後、パルス幅が $18.3\mu s$ から $1\mu s$ に減少している。これは、受信デジタルフィルタの通過帯域と一致する周波数成分だけがフィルタを通過し、それ以外の成分が抑圧されるからである。図 2. 2-5 の固体素子型の波形では、ADC が飽和することで波形が不連続に歪み、通過帯域外の信号成分が上昇している。

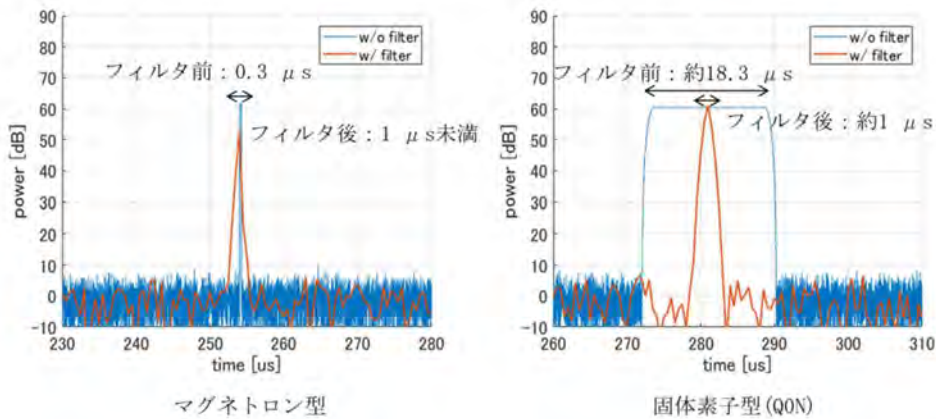


図 2. 2-4 沿岸監視レーダー干渉波形例 (ADC 飽和前)

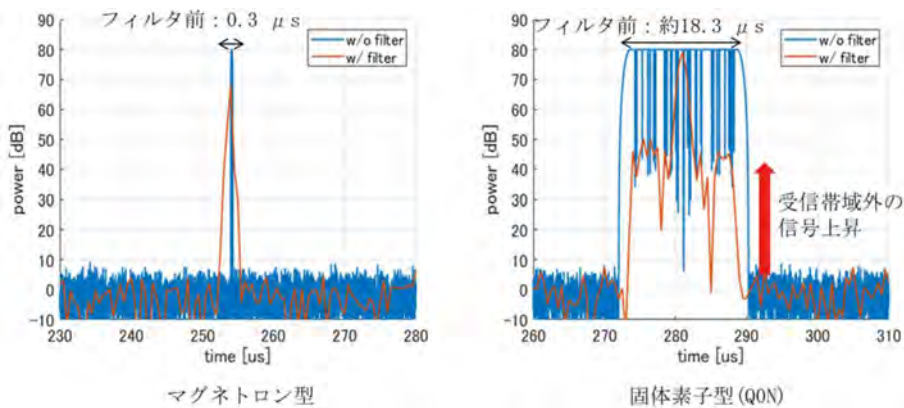


図 2. 2-5 沿岸監視レーダー干渉波形例 (ADC 飽和後)

図 2. 2. 2-6 に降水エコー推定精度を示す。横軸は I/S、縦軸は降水エコー真値に対する RMSE (Root Mean Squared Error) をそれぞれ示している。紫色線がマグネトロン型干渉を受けた場合の推定精度、赤色が固体素子型干渉を受けた場合の推定精度である。これは気象レーダーの中心周波数はマグネトロン型と固体素子型の長パルス信号の中心周波数にそれぞれ一致する場合の特性である。また、ADC は $I/N=80$ dB で飽和すると仮定しており、 $S/N=20$ dB の本条件では $I/S=60$ dB で ADC は飽和している。青線は干渉がない場合の特性であり、 I/S によらずほぼ一定値となる。

図 2. 2. 2-6 (1)~(3) の単偏波特性 (電力、速度、速度幅) の特性に着目すると、固体素子型干渉の $I/S=60$ dB を除き、干渉がない特性と干渉低減処理適用後の特性が同等であり、干渉除去処理で適切に干渉を除去できていることが確認できる。一方で、図 2. 2. 2-6 (4)~(6) の二重偏波特性 (反射因子差、偏波間位相差、偏波間相関係数) では、 $0 \text{ dB} < I/S < 42 \text{ dB}$ の範囲でマグネトロン型と固体素子型のそれぞれで精度劣化が生じている。これは、干渉と降水エコー電力の差が小さく干渉検出が難

しいためである。二重偏波特性は干渉の影響を受けやすく、単偏波特性では精度劣化に繋がらなかった弱い干渉見逃しが、特性劣化を引き起こしたと考えられる。なお、図 2. 22. 2-6 (4)~(6)では、マグネトロン型と固体素子型のピーク特性の I/S が約 10 dB 異なっていることが分かる。これは受信デジタルフィルタ通過後の I/S が異なるためである。検討では、横軸である I/S の I を LNA の入力端の干渉電力で規定しているが、図 2. 2-4 の干渉波形のとおり、受信デジタルフィルタ通過後のマグネトロン型干渉のピーク電力は約 10 dB 低下する。したがって、受信デジタルフィルタ通過後の I/S が固体素子型に比べ 10 dB 低くなり、干渉除去処理が動作する I/S が 10 dB 遅れるのである。

単偏波特性並びに二重偏波特性の両方で、ADC が飽和した場合固体素子型干渉の推定精度が大きく劣化していることがわかる。ここで、ADC が飽和する程干渉が大きく I/S が大きいにも関わらず、固体素子型干渉の特性が劣化する理由について考察する。

気象レーダーの干渉除去処理ではパルス圧縮前後で異なる干渉除去処理が行われる。パルス圧縮前の干渉低減方式では、隣接パルスとの電力差と隣接レンジとの電力差の両方が急激に変化する場合に干渉判定し、パルス圧縮後の干渉低減では、隣接パルスとの電力差のみから干渉判定する。ADC が飽和する固体素子型干渉では、レンジ方向の帯域外の信号成分が上昇するため、パルス圧縮前の干渉除去処理は効果が薄い。また、干渉をパルス圧縮しても参照信号との相関が低いため急峻に信号を積み上げることはできず、干渉検出閾値未満のデータが増加し推定精度の劣化を引き起こしていると考えられる。これに対し、マグネトロン型干渉は ADC が飽和しても、パルス幅は $1\mu\text{s}$ 程度であるため、パルス圧縮前の干渉除去処理により干渉を除去できていると推測される。

マグネトロン型と固体素子型干渉の特性劣化量の最大値を比較すると、ADC が飽和しない場合にはこれらの劣化量はほぼ同等であることが判明した。これは、沿岸監視レーダーをマグネトロン型から固体素子型に変更しても干渉による影響悪化は少ないことを意味している。一方で、ADC が飽和する場合には固体素子型の特性劣化が大きくなり問題であることが明らかになった。

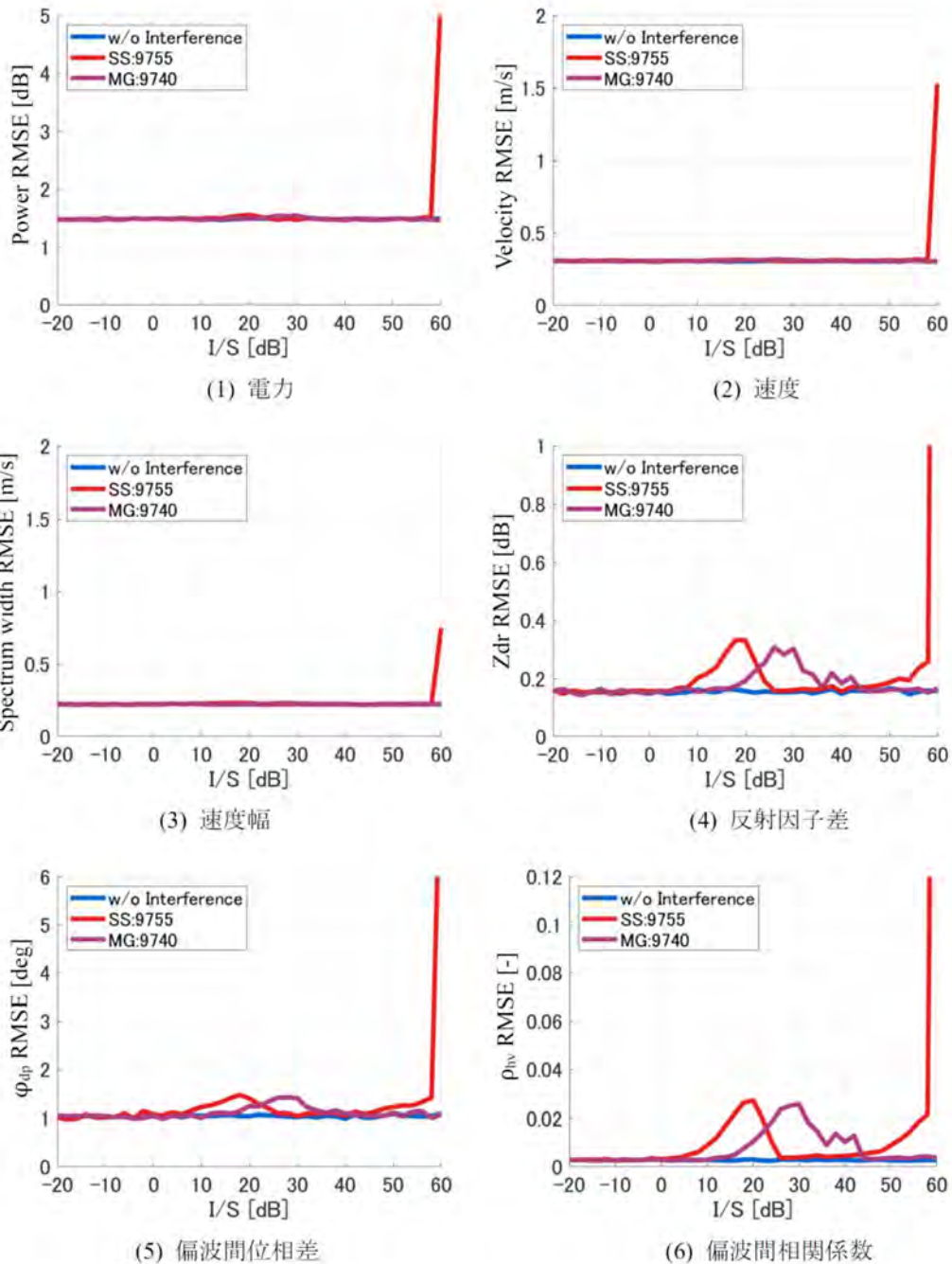


図 2. 2. 2. 2-6 降水エコー推定精度

2. 2. 1. 3 沿岸監視レーダーから気象レーダーへの干渉計算

以上の検討を踏まえ、今後の整備計画まで含めた表 2. 2-4 に示す沿岸監視レーダー70台と、X帯気象レーダー42台（以降XMPレーダー）を対象に、沿岸監視レーダーから気象レーダーへの干渉電力を計算し、干渉が生ずる可能性のあるレーダーを整理する。なお、対象とするX帯気象レーダーは、国交省XMPレーダー39台、都下水アメッシュ2

台及び防災科研千葉の1台の、合計42台である。表 2. 2-5 に被干渉となる XMP レーダー諸元を示す。

表 2. 2-4 検討対象の沿岸監視レーダー

整備状況	マグネトロン型	固体素子型
整備済	19台	—
整備中	7台	1台
整備計画	—	43台
合計	26台	44台

表 2. 2-5 XMP レーダー諸元

項目	諸元
設置位置	設置位置による (42 サイト)
アンテナ利得	42 dBi
サイドローブ減衰	-35 dB
アンテナビーム幅	水平、垂直とも1度
受信給電損失	2 dB (代表値)
周波数	既割当周波数
最小受信感度	-110 dBm
干渉判定レベル I/N	0 dB

ア メインビームの指向性考慮

導波管型スロットアンテナを用いた与干渉レーダーである沿岸監視レーダーのメインビームは、図 2. 2-7に示すような垂直方向に広いファンビームを形成するが、被干渉レーダー方向へのビームの中心からのオフセット角度に相当する空中線利得低下を考慮する。同様に被干渉レーダーである XMP レーダーのメインビームも与干渉レーダー方向に向いた際にはビームの中心からのオフセット角度に相当する空中線利得低下を考慮する。アンテナビーム対向パターンとメインビームオフセット考慮について表 2. 2-6に示す。

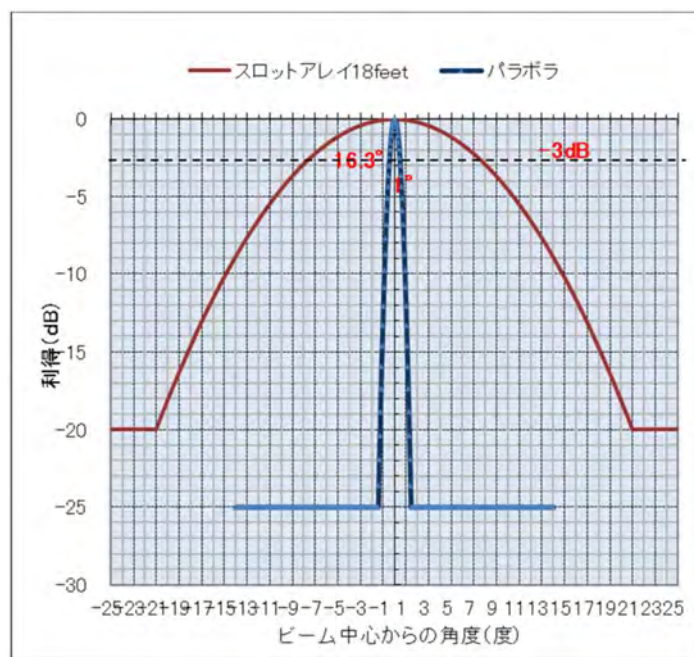


図 2. 2-7 アンテナ仰角ビームパターン近似

表 2. 2-6 アンテナビーム対向パターンとビームオフセット利得考慮について

アンテナビーム対向パターン (与干渉 - 被干渉)			
Main - Main	Main - Side	Side - Main	Side - Side
与干渉・被干渉 両方でビームオフセット利得を考慮	与干渉側のみビームオフセット利得を考慮	被干渉局側のみビームオフセット利得を考慮	サイドローベレベルで計算

イ 干渉計算結果 (与干渉がマグネトロン型のサイトからの干渉)

被干渉側は受信変調モードとして PON と QON があり、干渉レベルの高い組み合わせで評価した。計算結果を表 2. 2. 2-7 に示す。同表には、整備計画を含めた計 26 台のマグネトロン型沿岸監視レーダーの干渉計算結果のうち、Main-Main 干渉で I/N が 0 dB 以上の結果をまとめている。

表 2. 2. 2. 2-7 干渉計算結果 (与干渉：マグネトロン型)

干渉番号	離隔距離 km	離調減衰量 (dB)	I/N (dB)			
			Main - Main	Main - Side	Side - Main	Side - Side
Case. 25.36	140.7	-39.3	55.0	26.8	21.0	-7.2
Case. 24.34	80.5	-37.1	40.8	5.9	8.4	-26.5
Case. 24.36	78.4	-39.3	36.0	4.6	3.6	-27.8
Case. 24.35	77.0	-46.9	30.1	-4.0	-3.3	-36.4
Case. 11.32	187.72	-26.3	21.0	-16.8	-16.0	-50.7
Case. 25.35	138.9	-46.9	19.0	-17.9	-17.6	-51.9
Case. 21.28	180.1	-34.6	9.3	-18.9	-24.7	-52.9
Case. 20.39	96.4	-41.9	7.0	-14.9	-28.5	-48.9
Case. 07.39	80.43	-41.9	6.5	-18.0	-28.9	-51.9
Case. 22.39	101.2	-41.9	3.2	-16.0	-32.4	-50.0

備考：Main - Main 干渉で I/N 0 dB 以上を掲載。赤字は I/N 0 dB 以上

ウ 干渉計算結果 (与干渉が固体素子型のサイトからの干渉)

与干渉と被干渉で変調方式がそれぞれ PON と QON があり、送受合わせて 4 つの組合せの中、干渉レベルが最大の組合せで評価した。計算結果を表 2. 2-8 に示す。また、同表には、整備計画を含めた計 44 台の固体素子型沿岸監視レーダーの干渉計算結果のうち、Main-Main 干渉で I/N が 0 dB 以上の結果をまとめている。

表 2. 2-8 干渉計算結果 (与干渉：固体素子型)

干渉番号	離隔距離 km	離調減衰量 (dB)	I/N (dB)			
			Main - Main	Main - Side	Side - Main	Side - Side
Case. 53.32	14.4	-0.1	76.6	66.6	42.6	32.6
Case. 53.26	56.8	-0.2	71.5	36.6	37.5	2.6
Case. 29.02	71.5	-26.4	60.4	25.6	26.4	-8.4
Case. 28.09	95.6	-26.4	57.3	22.8	23.3	-11.2
Case. 43.34	42.8	-18.3	45.7	10.8	11.7	-23.2
Case. 53.28	115.3	-0.2	45.6	10.8	11.6	-23.4
Case. 39.13	25.5	-52.6	43.9	9.0	9.9	-25.0
Case. 52.24	25.2	-0.3	43.8	8.9	9.8	-25.1
Case. 28.08	70.6	-62.7	24.4	-10.6	-9.6	-44.6
Case. 54.34	34.3	-18.3	19.2	-8.1	-13.9	-41.2
Case. 43.35	33.7	-64.8	15.9	-5.8	-18.1	-39.8
Case. 46.35	95.8	-64.8	14.2	-15.7	-19.8	-49.7
Case. 49.34	119.2	-18.3	14.0	-20.9	-20.0	-54.9
Case. 46.34	105.7	-18.3	9.2	-25.8	-24.8	-59.8
Case. 54.33	7.7	-67.2	4.7	-25.2	-29.1	-59.0
Case. 54.30	158.6	-4.2	0.8	-33.7	-33.2	-67.7
Case. 53.27	38.8	-67.2	0.5	-9.5	-33.4	-43.4
Case. 49.36	165.6	-26.4	0.4	-34.6	-33.6	-68.6

備考：Main - Main 干渉で I/N 0 dB 以上を掲載。赤字は I/N 0 dB 以上

干渉抑圧方法

9.7 GHz 帯を周波数共用する気象レーダーと沿岸監視レーダーでは、気象レーダー側の ADC が飽和するような強い沿岸監視レーダー干渉を受ける場合、気象レーダーの観測精度の劣化が許容値を超えることが分かっている。その対策としてレーダー反射因子差を用いる新たな干渉抑圧方式を検討した。

図 2. 2-8 に現行の干渉抑圧方式の概念図を示す。まず現行方式では、受信ヒット毎の電力をモニタし、20 dB 以上の大きな電力変動が合った場合に干渉が発生していると判断する。干渉が発生したと判断された場合、隣接ヒット若しくは隣接レンジの無干渉データの振幅で干渉信号を置き換えて干渉を除去する。この現行の干渉抑圧処理では、水平・垂直偏波で独立して干渉抑圧処理を実施している。

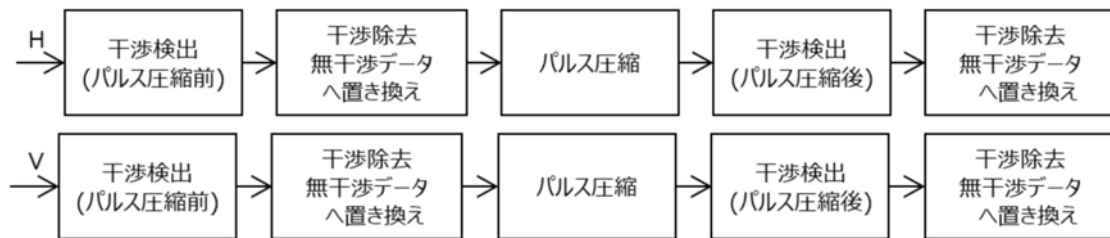


図 2. 2-8 干渉除去の概念図(現行方式)

図 2. 2-9 にレーダー反射因子差を用いる干渉抑圧方式の概念図を示す。沿岸監視レーダーは水平偏波で運用されているので、気象レーダー側で沿岸監視レーダー干渉の反射因子差が増大することが予想される。この特徴を活用し新方式では、現行方式に加え、反射因子差の急激な変化を検知することで沿岸監視レーダー干渉の有無を判断し、干渉を抑圧する。また、干渉の垂直偏波への漏れ込みを考慮し、水平・垂直偏波の少なくともどちらかで干渉を検出したら、水平・垂直両方に現行の干渉抑圧処理を実施する。

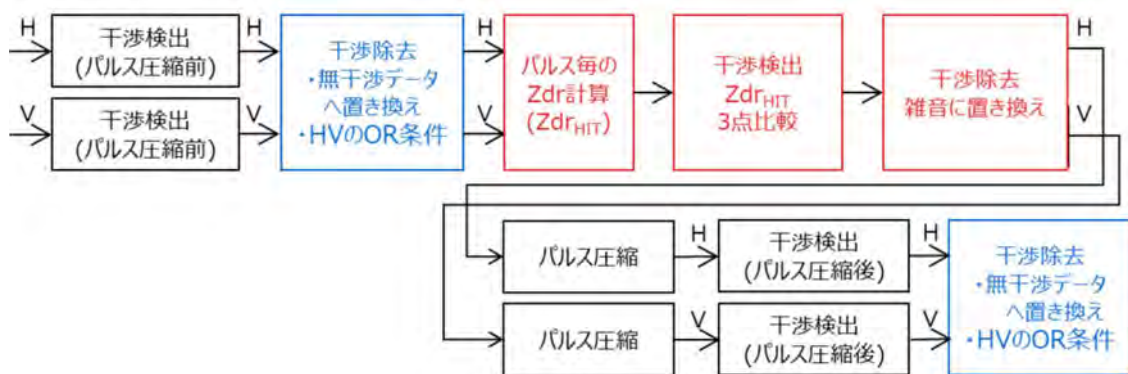


図 2. 2-9 レーダー反射因子差を用いる干渉除去の概念図(新方式)

2. 2. 1. 4 屋外試験

干渉シミュレーションとそれに基づく周波数共用基準の妥当性を確認するために、気象レーダーと沿岸監視レーダー実機を用いて屋外実験を行った。

2. 2. 1. 5 試験環境

図 2. 22. 2-10 に試験環境を示す。地図に示すとおり、沿岸監視レーダーに対し距離 4 km、方位 187.19 deg、仰角 0.0 deg に気象レーダーを設置した。なお、気象レーダーの北側は陸地であるという点と、気象レーダーの北側後ろに構造物がある点を加味し、真北から右回りに 0 deg から 90 deg 及び 270 deg から 360 deg の範囲はブランキングした。

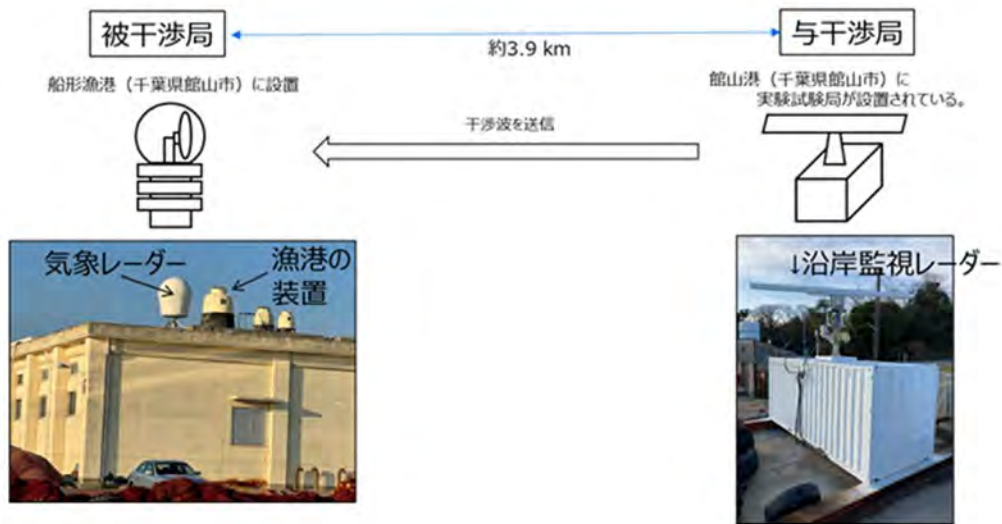


図 2. 22. 2-10 試験環境

以上の立地条件で試験を行う場合の表 2. 2-9 と表 2. 2-10 の諸元に基づき計算した I/N を表 2. 2-11 にまとめる。表 2. 2-11 のとおり、メインーメイン干渉で受信する場合に ADC が飽和する。

表 2. 2-9 固体素子型のレーダー諸元

項目	諸元
送信電力	200 W
アンテナ利得	35.3 dBi
サイドローブ減衰	-34 dB
アンテナビーム幅	水平 0.5 deg.、垂直 20 deg.
送信給電損失	1 dB

表 2. 2-10 マグネトロン型のレーダー諸元

項目	諸元
送信電力	200 W
アンテナ利得	38 dBi
サイドローブ減衰	-20 dB
アンテナビーム幅	水平、垂直 2 deg.
送信給電損失	1 dB
最小受信感度	-110 dBm

表 2. 2-11 I/N

メイン-メイン	110.2 dB
メイン(沿岸)-サイド(気象)	90.2 dB
サイド(沿岸)-メイン(気象)	76.2 dB
サイド-サイド	56.2 dB

2. 2. 1. 6 晴天試験

試験では、干渉データの解析を容易にする目的で、図 2. 2-2. 211の概要に示すように沿岸監視レーダーのメインビームを気象レーダー方向に固定し気象レーダーを回転させながらデータを収集した。沿岸監視レーダーには方位を電子的に調整する機能がないため、手調整により沿岸監視レーダーのメインビームを気象レーダー方向に向けるよう調整を行った。方位調整では、晴天時に図 2. 2-12(a)のように沿岸監視レーダーの送信状態でアンテナを微小に変化させ、気象レーダー正面に設置したホーンアンテナとスペクトラム・アナライザーでその電力を観測し(同図(b))、電力が最大となる方向で沿岸監視レーダーのアンテナを固定した。

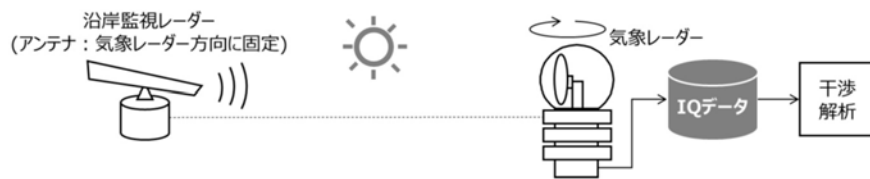


図 2. 2-2. 211 晴天試験概要



図 2. 2-12 方位調整風景

以上の晴天試験で取得した干渉の IQ データについて、固体素子型のパルス条件 4 (長パルス幅 $18.3 \mu\text{s}$ 、チャープ幅 22 MHz 、PRF 1280 Hz) の干渉波形を確認し、干渉 シミュレーションの波形と矛盾がないかを確認した。図 2. 2-13 に ADC が飽和しない場合(左)とする場合(右)の干渉波形を示す。

まず ADC が飽和しない場合のシミュレーション (上段) に着目すると、干渉が気象レーダー側のフィルタを通過することで、 $I/N > 10 \text{ dB}$ 以上のパルス幅が $4.5 \mu\text{s}$ に狭まり、実際の $18.3 \mu\text{s}$ の約 $1/4$ となっている。これは、気象レーダーの帯域が 1.2 MHz と狭いのに対して、沿岸監視レーダーの帯域は 22 MHz と広く、一部の信号のみフィルタを通過するためである。次に下段の実干渉を確認すると、 $I/N 60 \text{ dB}$ の細長い干渉が生じている。これが直達干渉と考えられ、 $I/N > 10 \text{ dB}$ の幅は $4.6 \mu\text{s}$ であり、シミュレーションと矛盾のない波形となっている。一方で、直達干渉から $30 \mu\text{s}$ 程度遅れた時間で電力が 40 dB 弱低下した干渉が発生している。これはマルチパス干渉と考えられ、シミュレーションでは考慮していなかった干渉であり、シミュレーションとの差異の原因となる。

次に、右側の ADC が飽和する場合のシミュレーション波形に着目すると、干渉パルスの真ん中だけでなく、パルス端の電力が上昇している。これは、クリップ処理により波形が歪み気象レーダー帯域から外れていた帯域の信号が受信帯域に漏れ込むためである。下の実干渉について、 $280 \mu\text{s} \sim 300 \mu\text{s}$ の干渉に着目すると、シミュレーションと同様に干渉パルスの端の電力上昇が見られる。また I/N が上昇している時間からパルス幅は $20 \mu\text{s}$ 弱であり送信パルス幅との矛盾も少ない。以上から、ADC 飽和領域の波形についてもシミュレーションと整合性の高い結果を得た。一方で、ADC 飽和条件においても

マルチパスの発生を確認した。

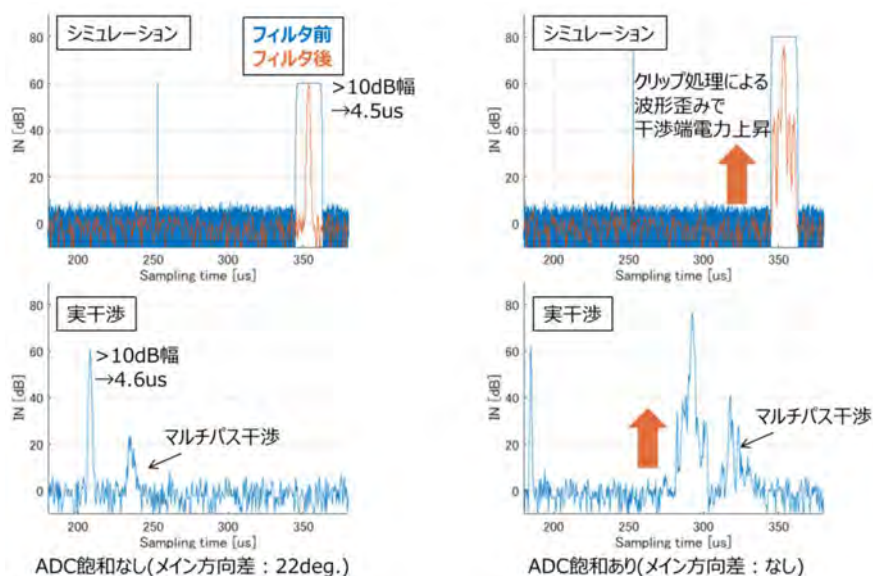


図 2. 2-13 干渉波形

図 2. 2-2. 2-14 及び図 2. 2-2. 2-15 に干渉抑圧方式を適用した後の PPI (電力) を示す。図 2. 2-2. 2-14 と図 2. 2-2. 2-15 の違いは干渉のパルス条件である。図 2. 2-2. 2-14 は長パルス幅が $18.3\mu\text{s}$ で固体素子条件の中でパルス幅が最長の条件、図 2. 2-2. 2-15 は PRF が 4100 Hz で最も高い条件である。まず図 2. 2-2. 2-14 に着目すると、現行方式でほとんどの干渉を除去できている。一方で、沿岸監視レーダー方向の ADC が飽和する干渉は残留している。これは、ADC が飽和することで図 2. 2-13 のように干渉波形が時間 (レンジ) 方向に広がり、パルス圧縮前の干渉除去が機能しにくくなるためである。これに対し新方式では、ADC 飽和領域の干渉がより除去されたが、僅かな干渉残留が確認された。次に図 2. 2-2. 2-14 の現行方式を確認すると、図 2. 2-2. 2-15 に比べ沿岸監視レーダー方向の干渉が減少した。これは、干渉のパルス幅が $18.3\mu\text{s}$ から $2.8\mu\text{s}$ へ短くなったことで、ADC 飽和が起こっても干渉レンジ幅は狭く、パルス圧縮前の除去処理で除去しやすいためと考えられる。一方で、マルチパスの影響で一部の方向に干渉が残留した。新方式ではほとんどの干渉を除去できているが、マルチパス方向の干渉が僅かに残留した。なお、マルチパス干渉は固体素子型レーダー特有の問題ではなくマグネトロン型レーダーでも同様に発生するものである。現在運用中のマグネトロン型レーダーにおいても干渉を許容しながら問題なく運用されていることを鑑みると、固体素子型のマルチパス干渉を許容することに問題はないと考えられる。

ここまでの晴天時干渉の評価から、実干渉波形とシミュレーション波形の整合性が高

いことが確認できた。また、現行方式に対する新方式の有効性を確認したが、新方式は完全な干渉除去を保証するものでないことを示した。また、図 2. 2-2. 2-14 及び図 2. 2-2. 2-15 のように晴天時にはほぼ全域の干渉が除去されたが、降雨に干渉が重畳する場合には干渉除去はより難しくなる。

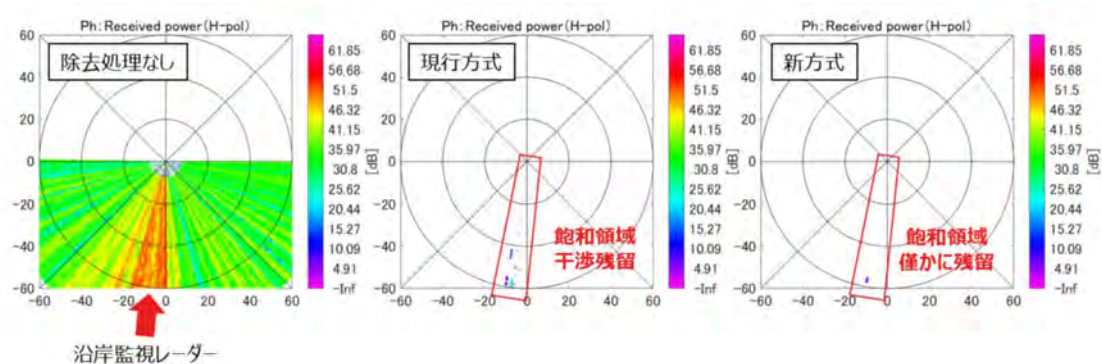


図 2. 2-2. 2-14 干渉除去による PPI (電力、固体素子型パルス条件 4)

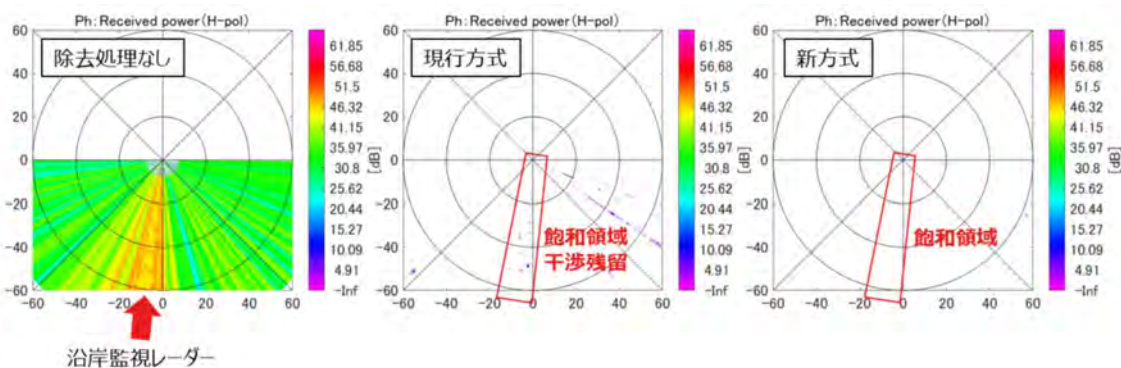


図 2. 2-2. 2-15 干渉除去による PPI (電力、固体素子型パルス条件 7)

2. 2. 1. 7 降雨試験

降雨時の干渉除去性能を評価するために、図 2. 2-16 の降雨試験で収集したデータを解析した。この試験では、沿岸監視レーダーの送信を ON/OFF させながら気象レーダーで降水エコーを観測し、干渉がある場合とない場合の PPI を比較することで観測への干渉影響を評価した。図 2. 2-16 に降雨試験の概要を示す。

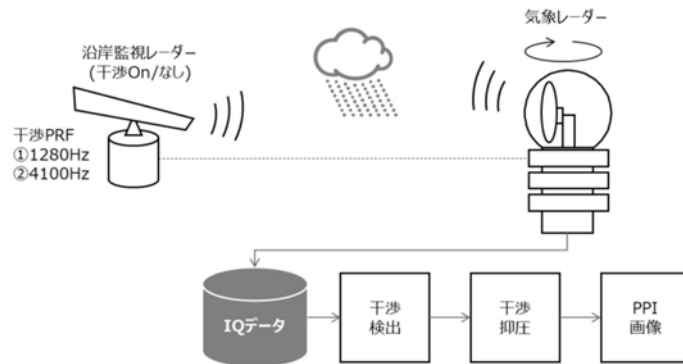


図 2. 2-16 降雨試験概要

ア ADC 飽和干渉の影響評価(気象レーダー仰角 : 1.4 deg.)

図 2. 2-17~図 2. 2-19に単偏波のPPIを示す。左上が干渉除去をしない場合、右上が干渉を停波し干渉がない場合、左下と右下が現行方式と新方式の観測結果である。なお本結果は、長パルス幅が $18.3\mu s$ 条件の干渉を気象レーダー側の仰角を 1.4 deg. として観測した場合の特性を示す。各図において、右上の干渉なしと左下、右下を比較すると、現行方式と新方式のどちらの方式でも干渉なしと遜色ない観測ができている。

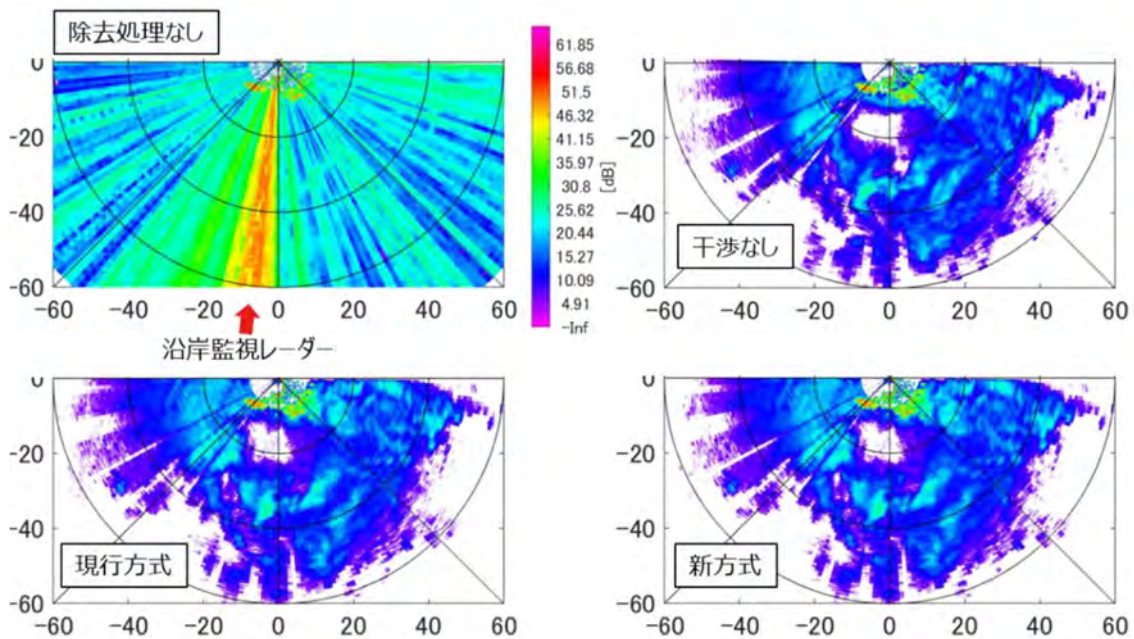


図 2. 2-17 干渉除去によるPPI
(電力、固体素子型パルス条件4、仰角1.4deg.)

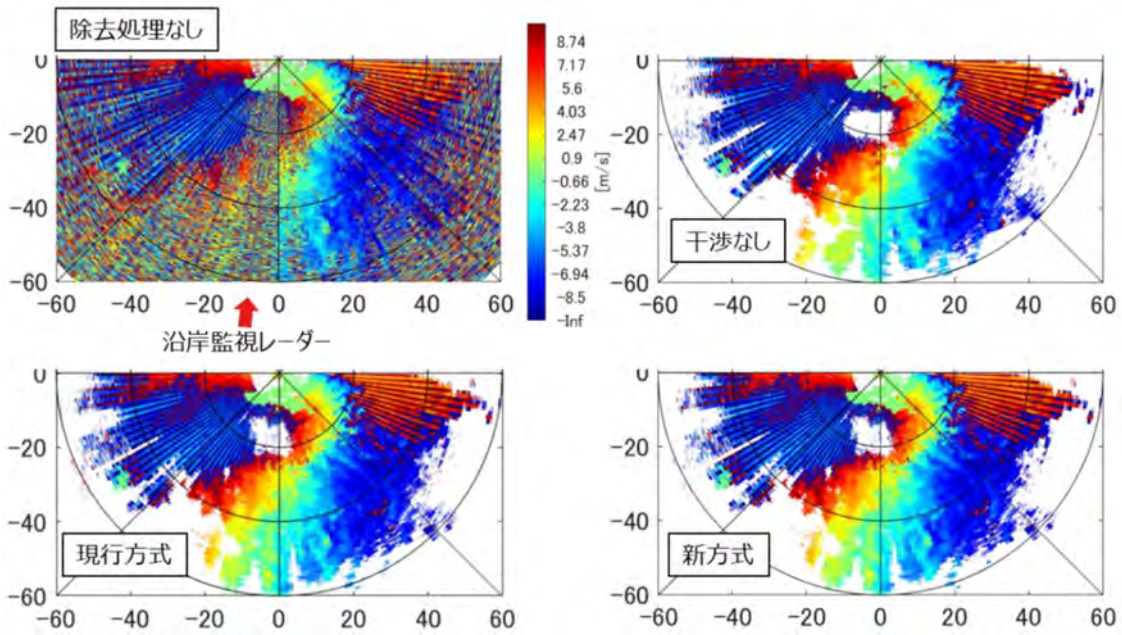


図 2. 2-18 干渉除去による PPI
(速度、固体素子型パルス条件 4、仰角 1.4deg.)

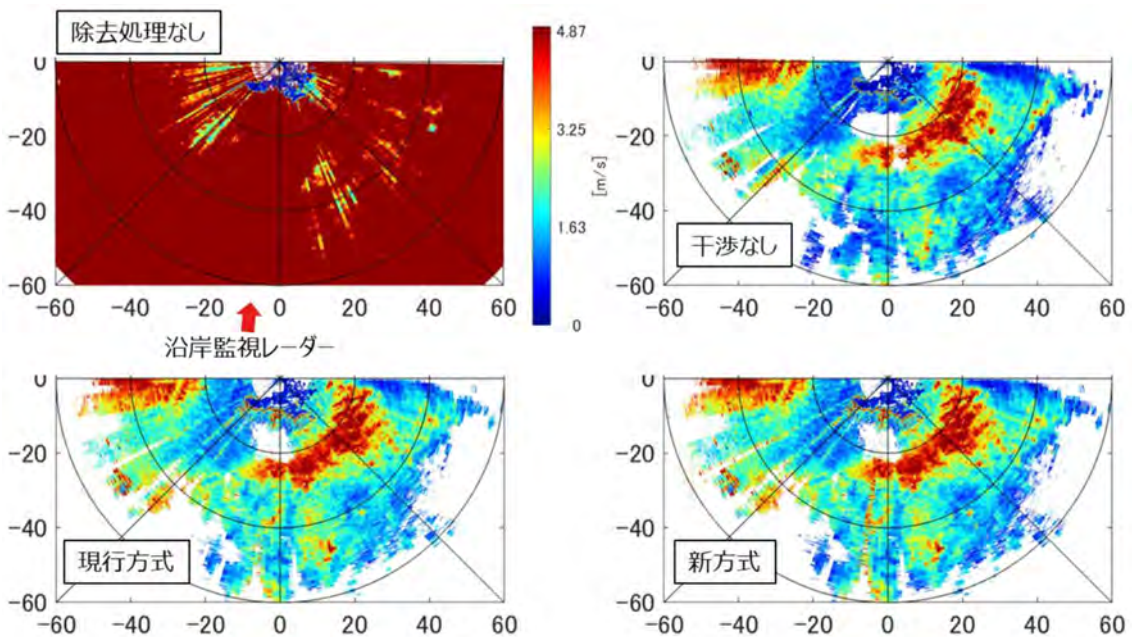


図 2. 2-19 干渉除去による PPI
(速度幅、固体素子型パルス条件 4、仰角 1.4deg.)

図 2. 2-20～図 2. 2-22 に二重偏波特性の PPI を示す。ADC 飽和の影響を確認するために黒枠で囲んだ A の領域に着目すると、現行方式の偏波間相関係数（図

2. 2-20) とレーダー反射因子差 (図 2. 2-21) と干渉なしの観測結果に差が生じている。具体的には、干渉なしでは領域 A の偏波間相関係数は概ね 0.91 の範囲で推移しているが、現行方式では相関が 0.8 (濃い青) に低下する領域が拡大している。同じ領域について新方式の偏波間相関係数を確認すると、新方式でも干渉なしと結果に違いは生じるものの現行方式に比べ干渉なしとの差は減少している。レーダー反射因子差 (図 2. 2-21) については、領域 A のレンジ 20 km から 40 km で干渉なしの観測結果に対して現行方式で 2 dB 以上過大推定する結果が散見される。沿岸監視レーダーは水平偏波を用いるため、干渉残留によりレーダー反射因子差が増加するのは妥当な結果である。これに対して新方式では、レーダー反射因子差の観測劣化を緩和し、干渉なしに近い観測を実現している。最後に偏波間位相差 (図 2. 2-22) の領域 A について、干渉なしと現行方式、新方式を見比べると、視覚的に確認できる差はほぼない。

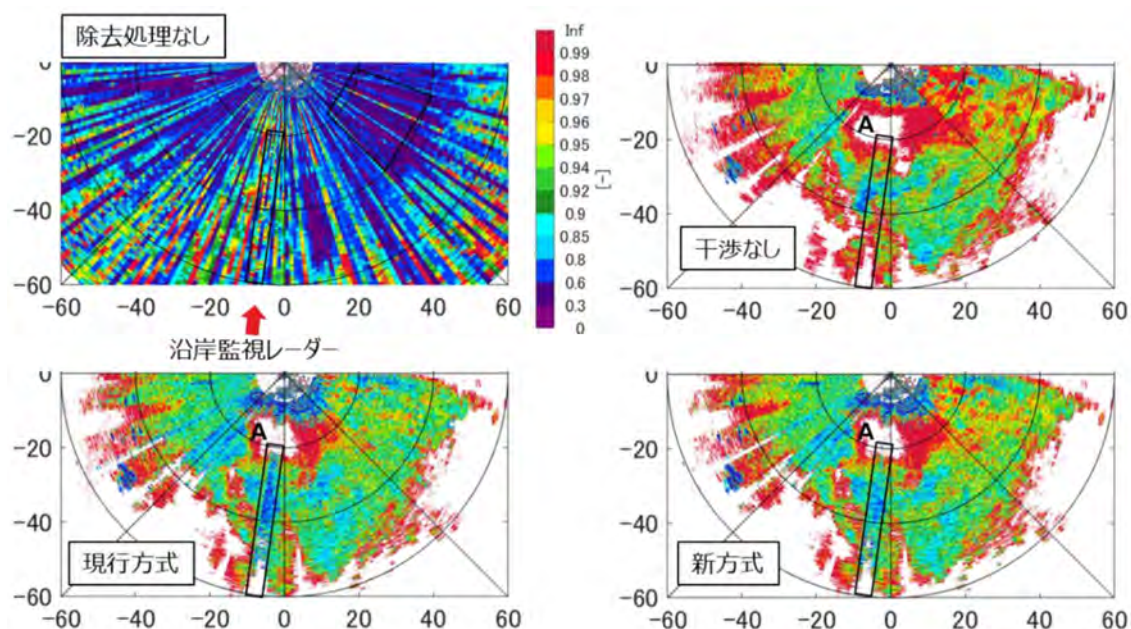


図 2. 2-20 干渉除去による PPI
(偏波間相関係数、固体素子型パルス条件 4、仰角 1.4 deg.)

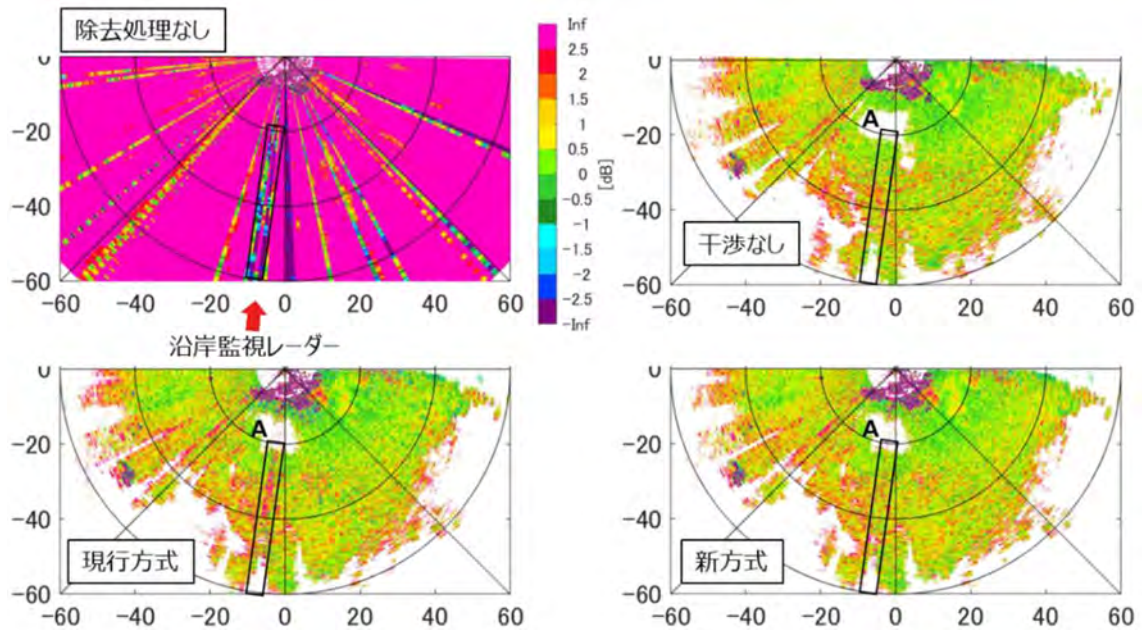


図 2. 2-21 干渉除去による PPI
(レーダー反射因子差、固体素子型パルス条件 4、仰角 1.4 deg.)

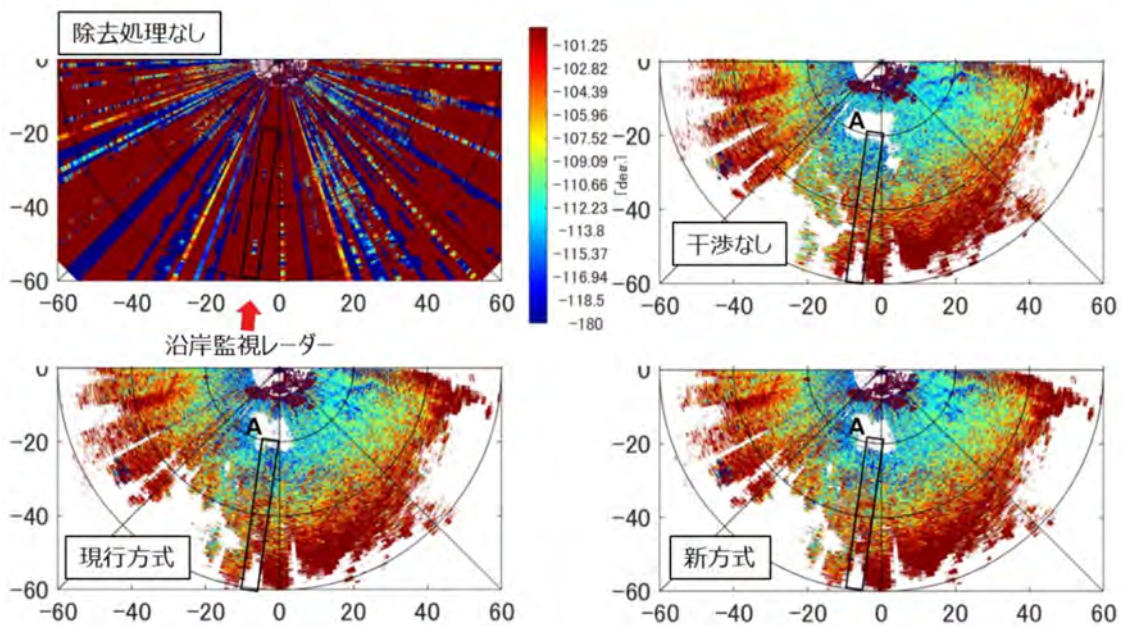


図 2. 2-22 干渉除去による PPI
(偏波間位相差、固体素子型パルス条件 4、仰角 1.4 deg.)

以上の結果の妥当性を確認するために、観測性能の劣化具合を干渉シミュレーションと比較する。図 2. 2-23 に PPI 取得時と同干渉パルス条件における干渉シミュレ

ーションの RMSE を示す。赤が干渉なし、黄色線が現行方式、オリーブ色が新方式の特性である。まず、偏波間相関係数について ADC 飽和領域のシミュレーション（図 2. 2-23 (a) の I/S 60dB）に着目すると、干渉なしに対し現行方式で誤差が急増し 0.1 を超える誤差が発生しているが、新方式の劣化は少ない。この傾向は既に示した観測結果（図 2. 2-21）でも同様で、ADC 飽和干渉により現行方式では観測劣化が大きかったが、新方式で劣化の緩和が見られた。なお、干渉シミュレーションに比べ新方式の観測誤差が増大して見えるのは、試験時の ADC 飽和領域の干渉電力が大きく、波形歪みが大きいためと考えられる。次にレーダー反射因子差に着目すると、干渉シミュレーションでは ADC 飽和領域で 1 dB を超える誤差が発生するのに対し、新方式で誤差改善が見られ観測結果（図 2. 2-22）との整合性が高い。最後に偏波間位相差の干渉シミュレーションを確認すると、ADC 飽和領域の誤差は 4 deg. 程度であり、ADC 非飽和領域に比べ飽和領域で誤差が明確に増加しては見えるが、観測上では明確な干渉筋は確認できない。以上については、図 2. 2-23 の干渉なしの特性から分かるように偏波間位相差は観測地点により 20 deg. 程度の変動があるので、ADC 飽和による劣化が観測値自体の変動に埋もれ、視覚的に誤差が見えにくくなっていると考えられる。以上の評価から、ADC 飽和領域の観測性能劣化についてはシミュレーションと矛盾しないことを確認した。

領域 A を除く ADC 非飽和領域については、偏波間相関係数以外の観測では干渉なしと干渉除去後の結果にほぼ差は見られなかった。偏波間相関係数については、方位 90~135 deg. で観測差が生じているが、干渉なしの特性自体の変化が大きく性能を評価しにくいので、面的な特性が安定していた別事例で ADC 非飽和領域の干渉の影響を評価する。

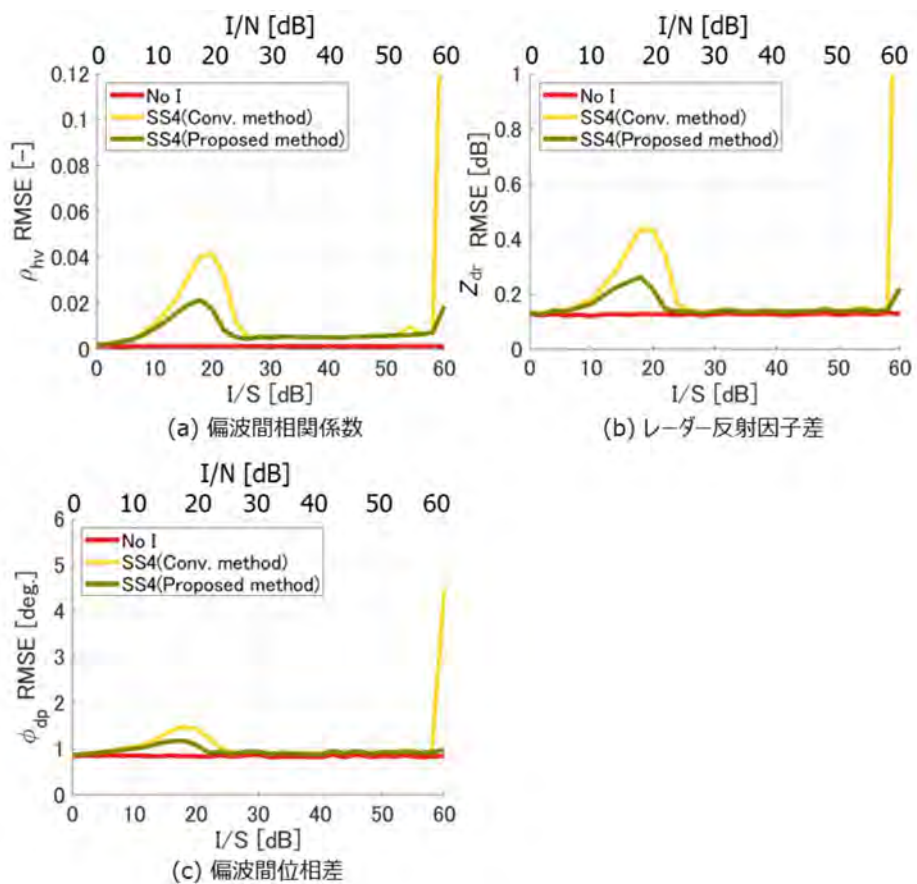


図 2. 2-23 同干渉条件におけるシミュレーション（現行方式と新方式）

イ ADC 非飽和干渉の影響評価（気象レーダー仰角：3.8 deg.）

ADC 非飽和領域について、気象レーダーの仰角 3.8 deg. で観測した場合の特性で評価する。図 2. 2-24～図 2. 2-26 に単偏波特性の PPI を示す。本結果も、長パルス幅が 18.3 μ s 条件の干渉を観測した結果である。各図において、右上の干渉なしと左下、右下を比較すると、現行方式と新方式のどちらの方式でも干渉なしと遜色ない観測ができています。

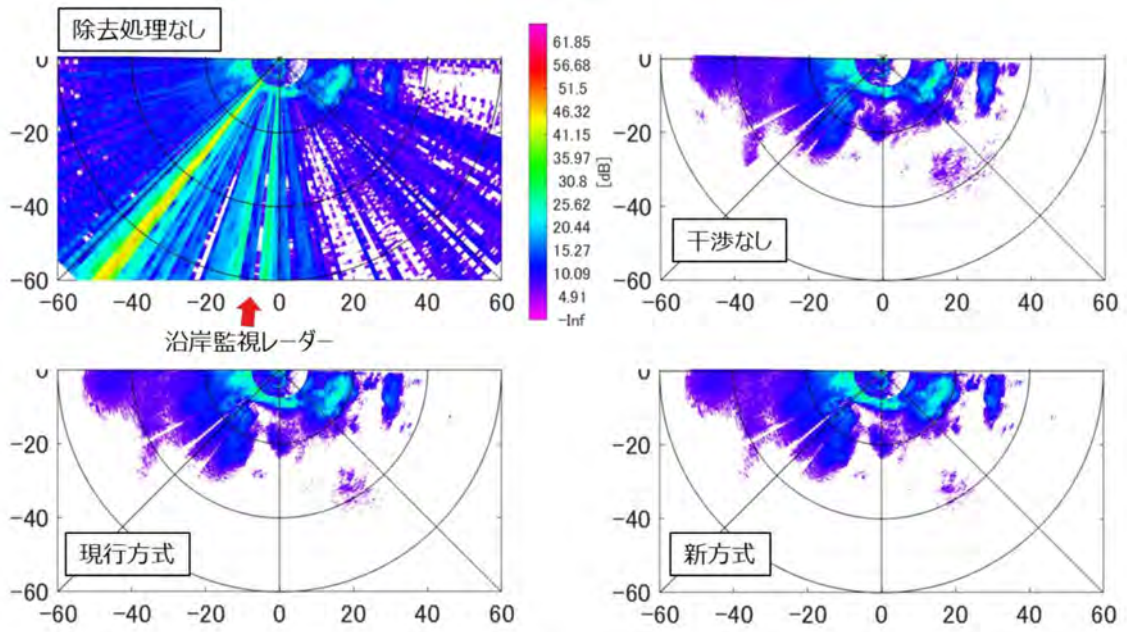


図 2. 2-24 干渉除去による PPI
(電力、固体素子型パルス条件 4、仰角 3.8deg.)

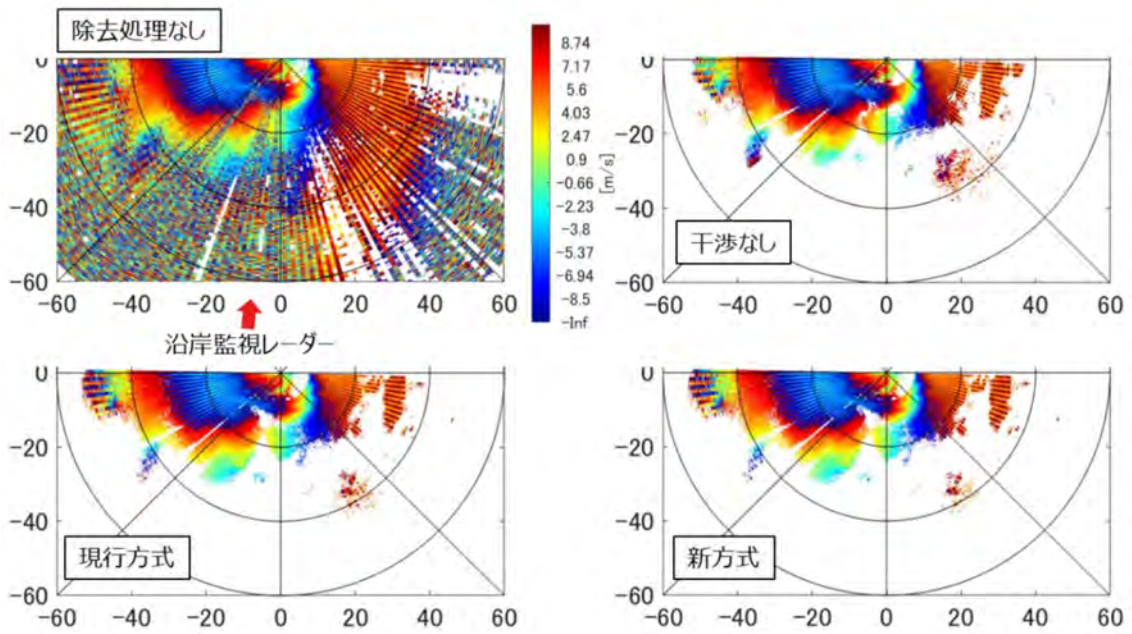


図 2. 2-25 干渉除去による PPI
(速度、固体素子型パルス条件 4、仰角 3.8deg.)

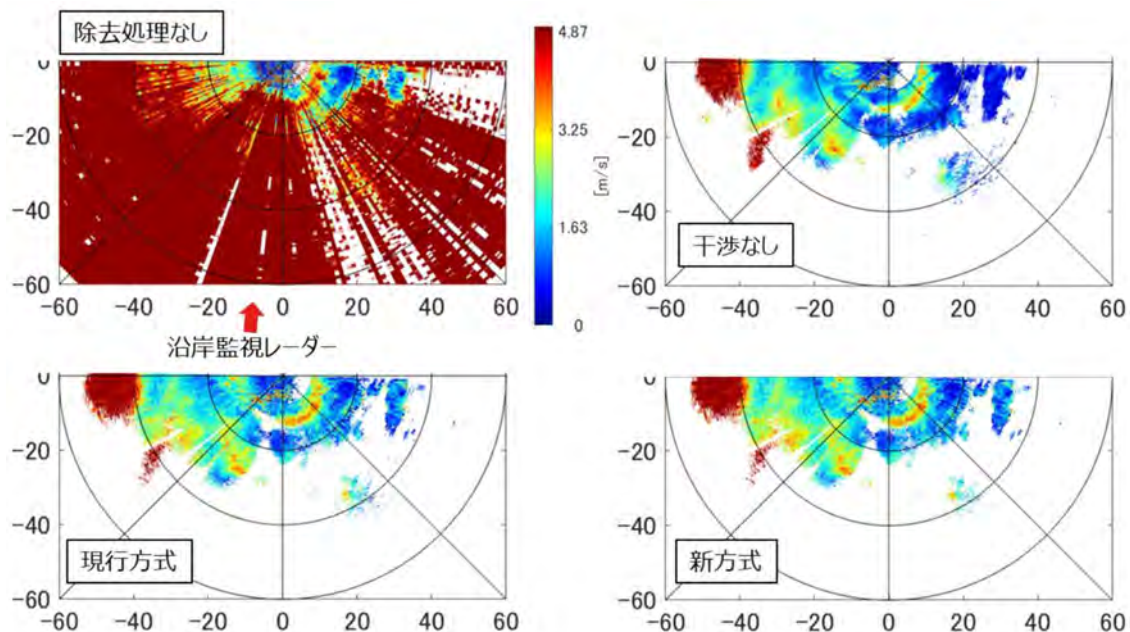


図 2. 2-26 干渉除去による PPI
(速度幅、固体素子型パルス条件 4、仰角 3.8deg.)

ADC 非飽和領域について、結果の妥当性を調べるために PPI から I/S を概算し性能劣化について干渉シミュレーションと比較する。なお、PPI はパルス圧縮やセクタ平均等の処理を適用した後の結果が表示されているが、干渉シミュレーションではそれらの処理前の任意ヒットと降水エコーの電力差で横軸を定義している。したがって、単純に干渉有無の PPI の電力差から干渉シミュレーションで定義する I/S を計算できないため、ヒット毎の電力と PPI 電力の差から干渉シミュレーション定義の I/S を推定する。図 2. 2-27 に干渉除去をしない場合の電力 PPI と、方位 135 deg.、180 deg.、225 deg. のヒット毎の S/N ならびに平均 S/N を示す。同図の方位 135 deg. の干渉除去処理なしの PPI から、レンジ 10 km~40 km の平均 I/N は約 10 dB と考えられる。次に同方位・同レンジ範囲のヒット毎の電力を確認すると、各ヒットの I/N は約 32dB であり、PPI 上で推定される平均 I/N との差は 22 dB である。同様の方法で方位 180 deg. について確認すると、PPI 上での平均 I/N は約 15 dB、各ヒットの I/N は 42 dB であることからそれらの差は 27 dB である。また方位 225 deg. については、PPI 上での平均 I/N が約 15 dB、各ヒットの I/N が 37 dB であることからそれらの差は 22 dB である。以上の結果を踏まえ、PPI で表示される平均的な I/N に 25 dB を加算することでヒット毎の I/N ならびに I/S を推定することにした。以上の方法で I/N を概算した干渉電力と干渉なしの電力差 (I/S) を図 2. 2-28 に示す。

なお、上記の I/S 計算では、I/N の近似による誤差だけでなく、干渉なしの降水エコー観測時間が干渉を受けた時間と違うことによる誤差が発生することに注意されたい。

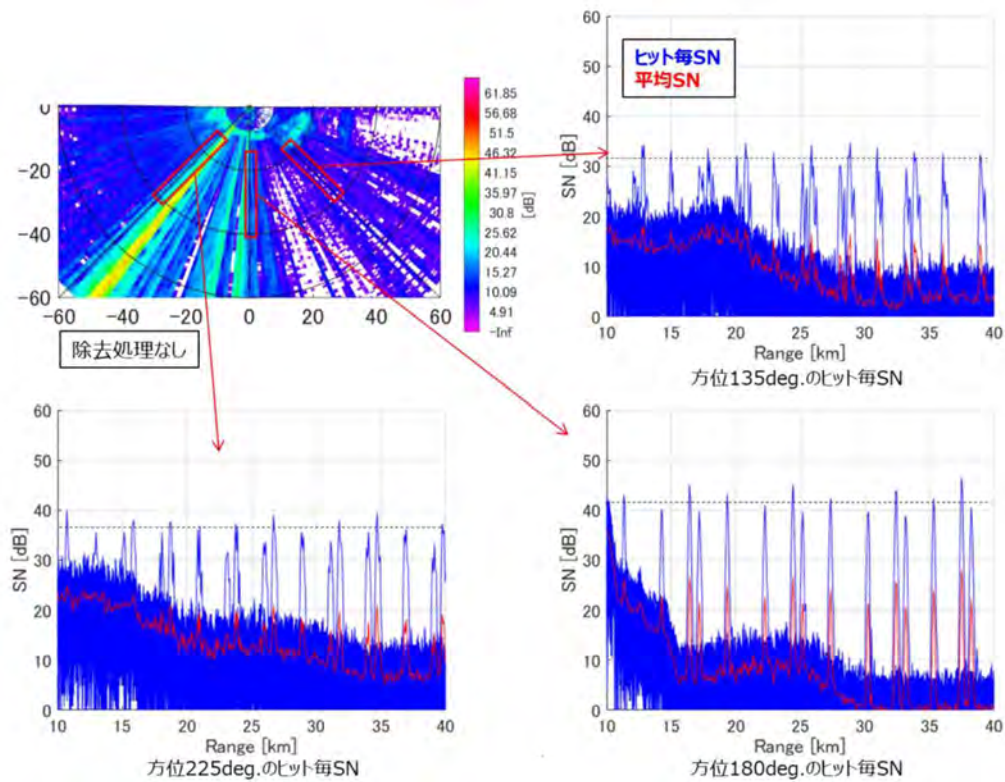


図 2. 2-27 干渉除去をしない場合の電力 PPI と方位 100 deg. と 113 deg. の S/N

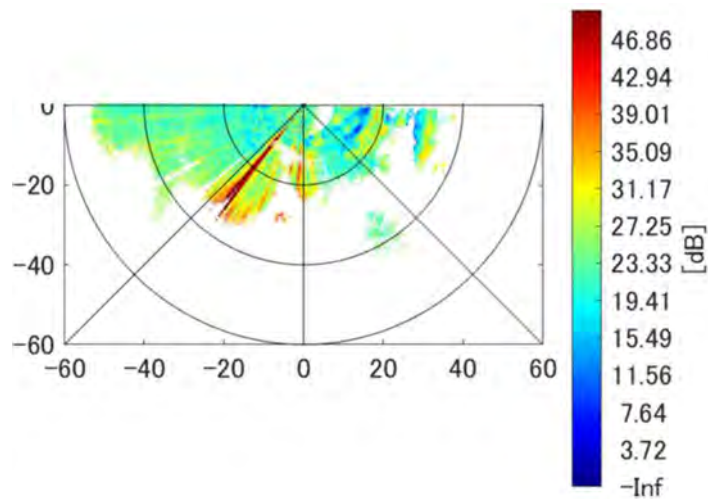


図 2. 2-28 ヒット毎の推定 I/S (パルス条件 4)

図 2. 2-29～図 2. 2-31 に二重偏波特性の PPI を示す。まず、図 2. 2-29 の偏波間位相差に着目すると、黒枠で囲んだ方位 250deg.、レンジ 10 km～30 km 付近で干渉なしに対して現行方式の観測結果が劣化している。ここで 図 2. 2-28

を確認すると、この領域の I/S は 18 dB~22 dB と読み取れる。この I/S を 図 2. 2-23 の干渉シミュレーションに当てはめると、ちょうど現行方式で観測誤差が増大する I/S と一致していることが分かる。また、同領域の新方式の特性を確認すると、誤差は生じるものの、現行に比べるとより干渉なしと近い観測結果となっており、干渉の影響を緩和できている。干渉シミュレーションにおいても着目領域の I/S で新方式は性能改善しており、観測結果と整合性が高い。次に、レーダー反射因子差と偏波間位相差について干渉なしと現行方式ならびに新方式を比較すると差はほぼない。これは、干渉シミュレーションのとおり、ADC 非飽和領域での誤差そのものが小さく、PPI の解像度では優位な差を確認することが困難なためと考えられる。

これまでの二重偏波特性の評価から、観測で発生する誤差と干渉シミュレーションに矛盾はなく、現行方式に対する新方式の有効性を確認できた。一方で、新方式を用いる場合でも ADC 飽和の影響を完全に除去できるわけではないことを示し、ADC 飽和は許容できない問題であることを試験データからも確認した。

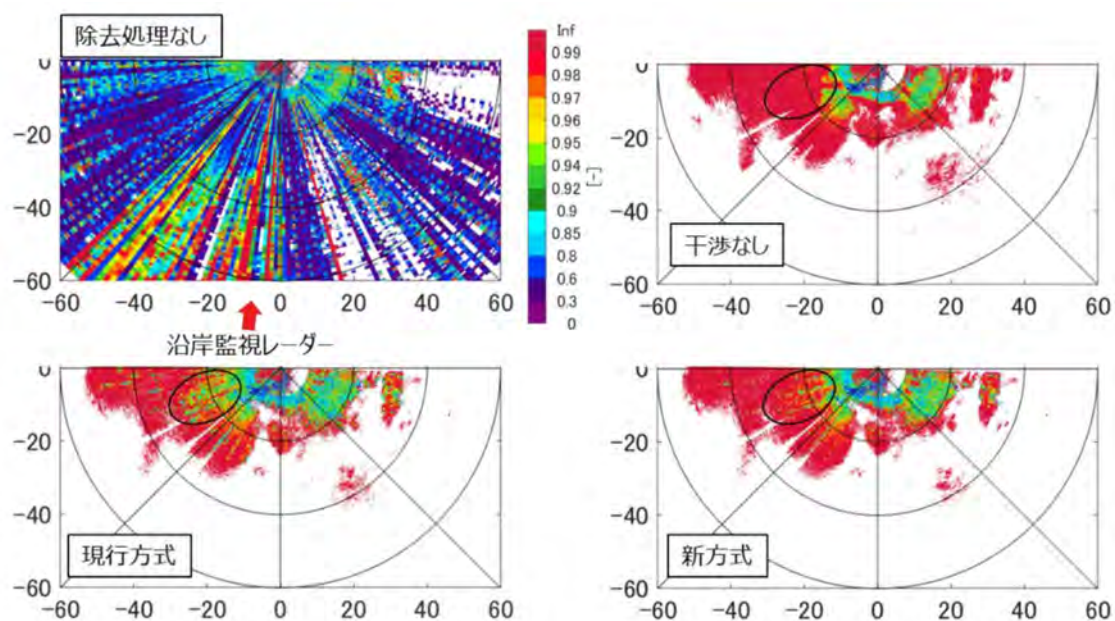


図 2. 2-29 干渉除去による PPI
(偏波間相関係数、固体素子型パルス条件 4、仰角 3.8 deg.)

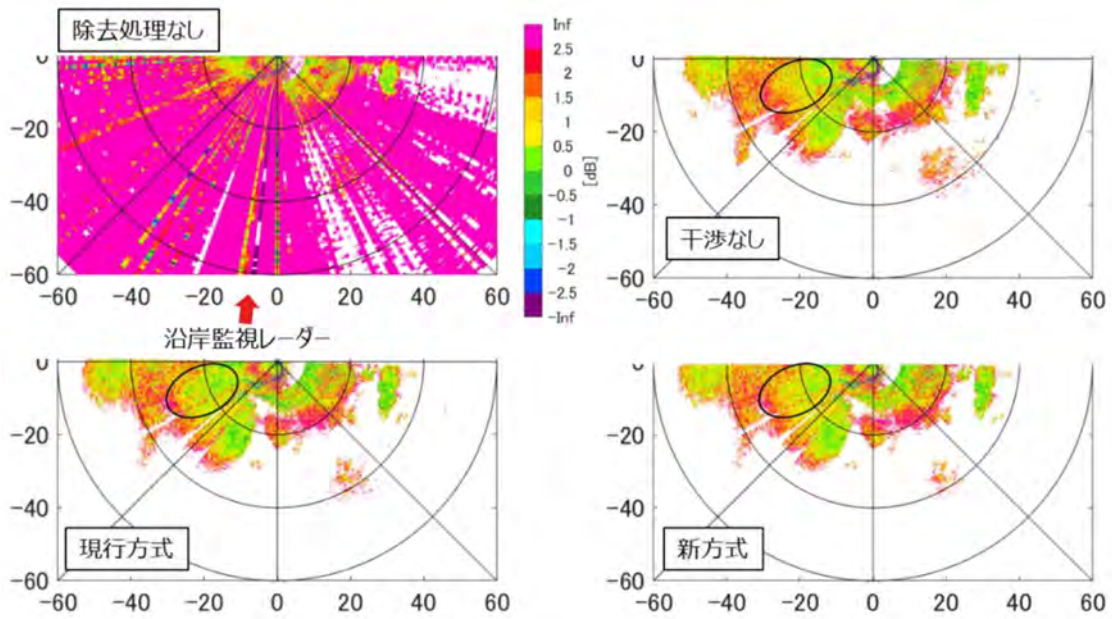


図 2. 2-30 干渉除去による PPI
 (レーダー反射因子差、固体素子型パルス条件 4、仰角 3.8 deg.)

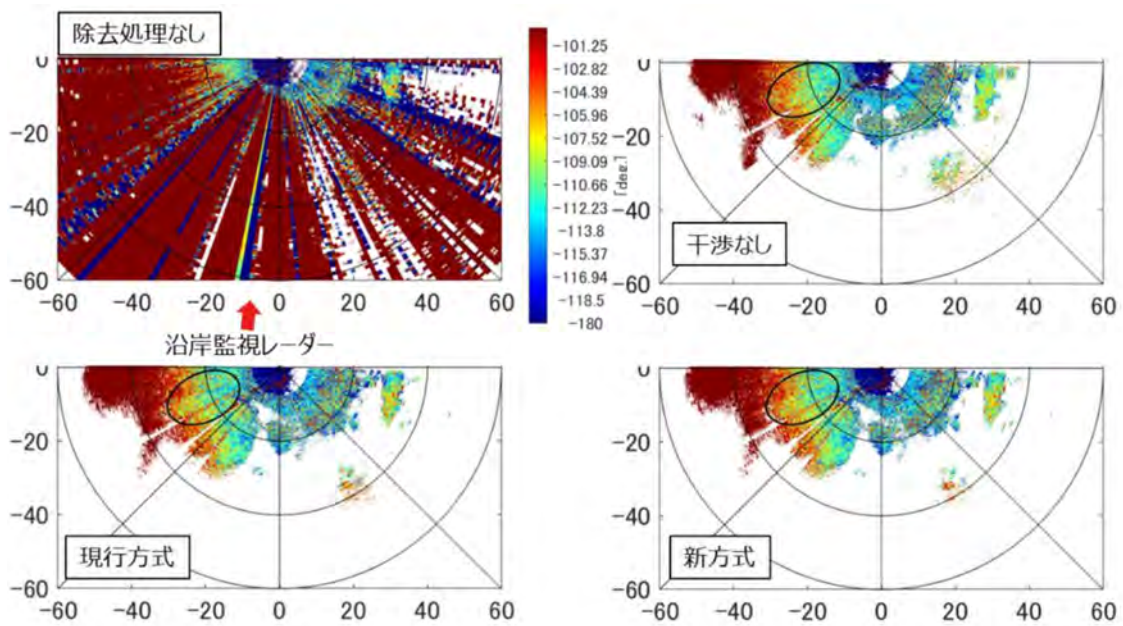


図 2. 2-31 干渉除去による PPI
 (偏波間位相差、固体素子型パルス条件 4、仰角 3.8 deg.)

ウ 固体素子型のパルス条件による影響評価

マグネトロン型の沿岸監視レーダーに対し誤差を悪化させる可能性がある固体素子型のパルス条件が存在する。具体的には、マグネトロン型レーダーの PRF (最高 2760Hz) に対し高い PRF (4100Hz) の条件が問題となっている。ここでは、本当に干渉の PRF により観測精度が悪化するのかを試験で確認する。試験では、表 2. 2-12 の 2 つのパルス条件について評価する。なお、表 2. 2-12 の条件 4 はこれまでの降雨評価で用いた条件である。

表 2. 2-12 試験の干渉パルス条件

条件	パルス幅 (P0N/Q0N)	チャープ幅	PRF
4	0.16/18.3 μ s	22 MHz	1280 Hz
7	0.16/2.8 μ s	22 MHz	4100 Hz

図 2. 2-32 に、表 2. 2-12 の干渉パルスが重畳した場合の電力の PPI を示す。左が条件 4 の現行の干渉除去有無での電力、真ん中が条件 7 の現行の干渉除去有無での電力、右上は干渉がない場合の電力である。この特性から、右上の干渉なしの電力と、下の条件 4 と 7 の差はほとんどなく、PRF 条件に関わらず現行方式で干渉なしと遜色ない観測を実現している。

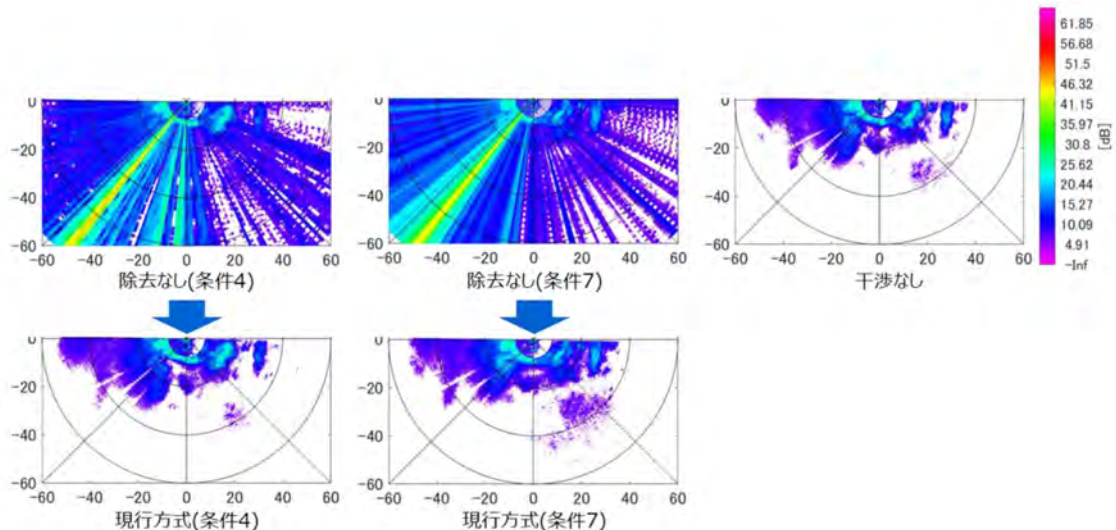


図 2. 2-32 干渉除去による PPI
(電力、固体素子型パルス条件 4 と 7、仰角 3.8 deg.)

図 2. 2-33 に現行の干渉除去有無での偏波間相関係数の PPI を示す。図 2. 2

ー 3 3 から、パルス条件 7 において、広範囲に観測精度が劣化していることが分かる。結果の妥当性を確認するため、条件 7 についても既述の近似で I/S を推定する(図 2. 2-34)。また図 2. 2-35 にパルス条件 4 と 7 の干渉シミュレーション結果を示す。

図 2. 2-33 の領域 A に着目すると、条件 7 では I/S が 20dB~33dB である。これを図 2. 2-35 の干渉シミュレーションの黄緑線の I/S と照らし合わせると、誤差が大きい I/S と一致している。また、領域 A で所々筋状に相関が改善している地点については、I/S が 33 dB と大きく干渉除去が機能する地点と考えられる。また、図 2. 2-28 より条件 4 については領域 A の I/S が約 20 dB~25 dB と読み取れ、レンジ 20km 以遠については干渉除去が機能する領域で精度改善が見られる。次に、領域 B では、条件 7 の I/S から精度改善が予想される方位 (I/S が高い方位) が 1 deg. 程度ずれて見える。この原因としては、干渉なしと干渉時の降水エコー自体のずれや I/N 近似の微妙なずれが影響していると考えられる。最後に領域 C については、条件 7 では I/S が 15 dB~40 dB 程度にダイナミックに変動していて、PPI でも I/S が高く干渉除去が効果的な領域の誤差は少なく、そうでない領域の誤差は大きくなっている。領域 C について条件 4 に着目すると、図 2. 2-28 の I/S 20 dB 周辺 (薄い緑) で誤差が大きくなっており、干渉シミュレーションと大きな矛盾はない。更に、領域 A について、条件 4 と条件 7 の双方で誤差の増大が予想されるレンジ 20km 付近を見ると、干渉なし比べ条件 7 では誤差が 0.1 (シアン) 未満に相関が低下する領域が広いが、条件 4 については相関の低下は最悪 0.05 (黄緑か緑) 程度で、劣化量が小さい。この傾向も干渉シミュレーションに一致するものであり、パルス条件による精度影響についても干渉シミュレーションと矛盾が少ないことを確認できた。

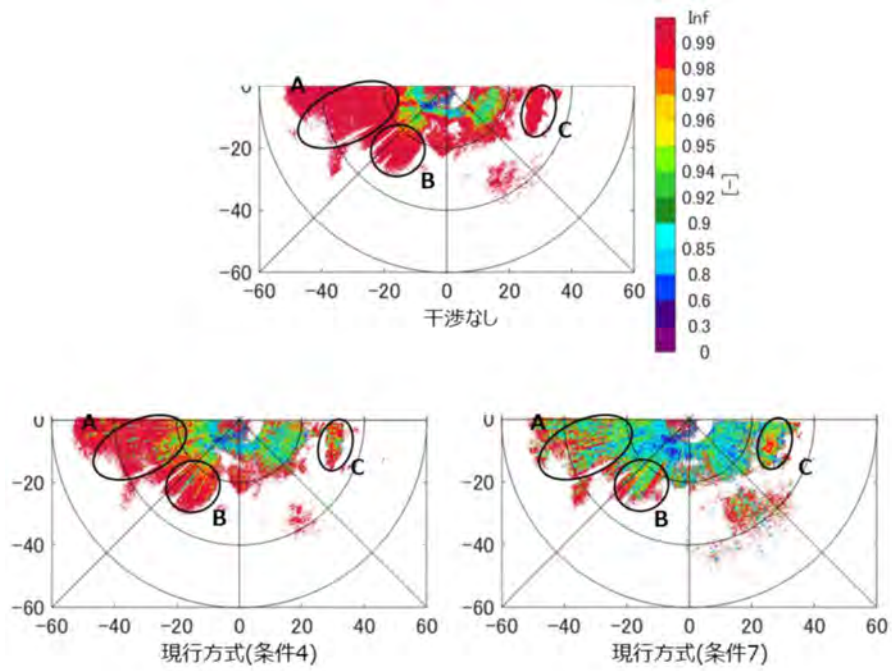


図 2. 2-33 干渉除去による PPI
(偏波間相関係数、固体素子型パルス条件 4 と 7、仰角 3.8 deg.)

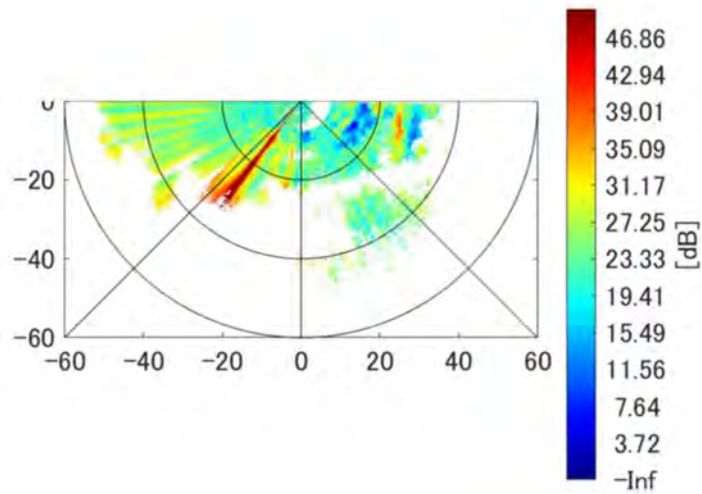


図 2. 2-34 ヒット毎の推定 I/S (パルス条件 7)

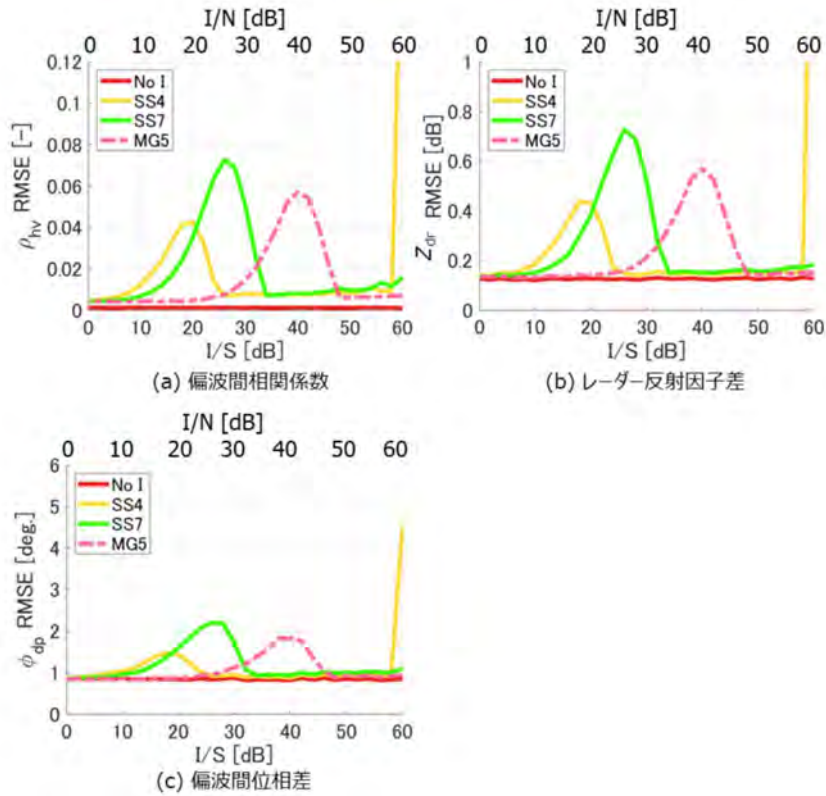


図 2. 2-35 干渉シミュレーション (パルス条件 4 と 7)

図 2. 2-36 と図 2. 2-37 に現行の干渉除去有無でのレーダー反射因子差と偏波間位相差の PPI を示す。各図から、領域 B、C での干渉なしに対する干渉除去後の特性差はほぼ見えないが、領域 A については条件 7 で干渉筋が見える。PPI の解像度から明確な誤差は見えにくいですが、一部では条件 7 のように PRF が高い条件において二重偏波特性の観測精度劣化が確認された。

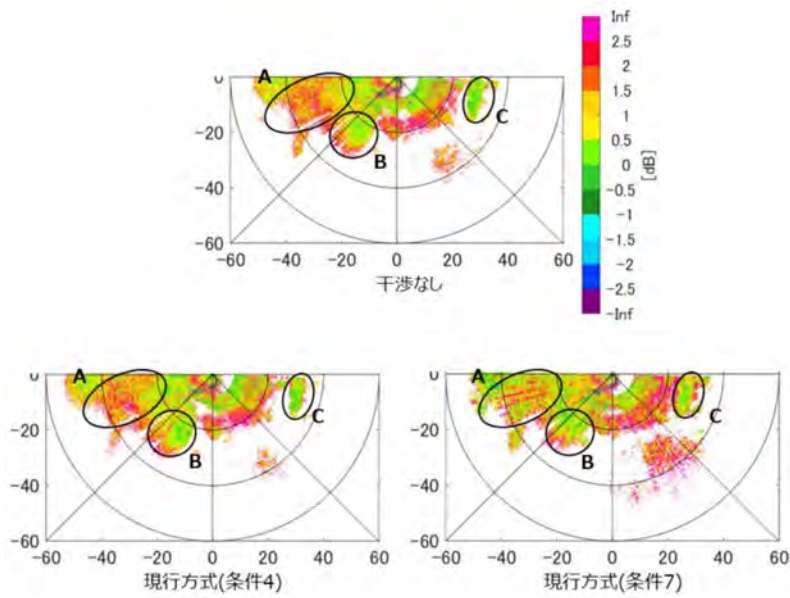


図 2. 2-36 干渉除去による PPI
 (レーダー反射因子差、固体素子型パルス条件 4 と 7、仰角 3.8 deg.)

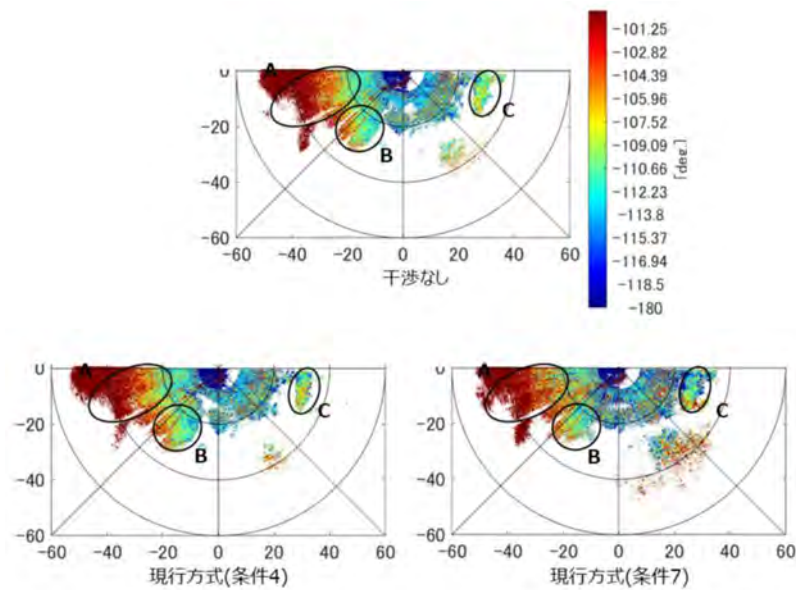


図 2. 2-37 干渉除去による PPI
 (偏波間位相差、固体素子型パルス条件 4 と 7、仰角 3.8 deg.)

2. 2. 2 共用条件

周波数共用基準 (案) として以下の提案とする。

メイン-メイン干渉については干渉を許容し、メイン-サイド、サイド-メイン、サイド-サイド干渉については I/N 0 dB 未満とする。また、固体素子型の沿岸監視レー

ダーについては、気象レーダーの ADC の飽和をしないこととする。周波数共用基準(案)を表 2. 2-13にまとめる。

表 2. 2-13 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 0 dB 未満	I/N 0 dB 未満	I/N 0 dB 未満

但し、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。

$$I \text{ Loss}_f < 80 N$$

I は干渉電力、 Loss_f は周波数による離調減衰量、 N は気象レーダーの受信帯域から求められる雑音電力である。

今回の周波数共用基準(案)については、メイン-サイド干渉ならびにサイド-メイン干渉については、漁業協同組合等の沿岸監視レーダーからの干渉の一部でも許容していることが明らかになった場合、メイン-サイド干渉、サイド-メイン干渉の条件の緩和が考えられる。

2. 3 衛星放送受信設備

X 帯気象レーダーの使用する周波数帯は、BS/CS 受信設備における中間周波数 (IF) への周波数変換過程で局発周波数に対して BS/CS 放送の周波数帯のイメージ周波数となっており、IF 周波数帯において気象レーダー信号と BS/CS 受信信号が重複するため BS/CS 放送の受信に影響を与える可能性がある。なお、本報告で用いるイメージ妨害抑圧比は、ARIB 規格等を参照しない限り、反射鏡込みイメージ妨害抑圧比を指す。(注)

注：正源、田島、花土他：BS/CS 受信アンテナのイメージ妨害抑圧比の測定，信学技報，AP2019-30，SAT2019-12，2019. 7.

2. 3. 1 衛星放送への障害の概要

X 帯気象レーダーから BS/CS 受信設備への干渉メカニズムを説明するために、まず BS コンバーターの構成を図 2. 3-1 BS コンバーターの構成図 2. 3-1 に、図 2. 3-1 BS コンバーターの構成 CS コンバーターの構成を図 2. 3-2 に示す。

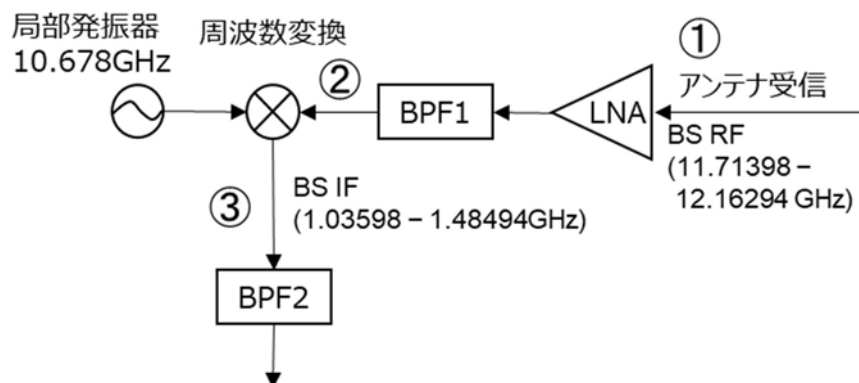


図 2. 3-1 BS コンバーターの構成

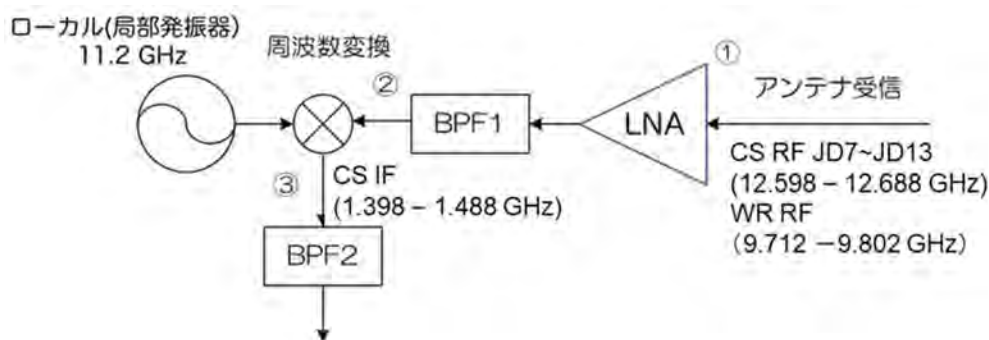


図 2. 3-2 CS コンバーターの構成

気象レーダー近傍で気象レーダーのメインビームが BS/CS 受信設備を照射し、BS/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た信号が入力される場合、気象レーダー送信波が BS/CS 受信設備への混信となり、画像破綻が発生することになる。9.4GHz 帯が BS 放送に、9.7GHz 帯が CS 放送に影響する可能性がある。この干渉のメカニズムを BS 放送を例にとり図 2. 3-3 に示す。

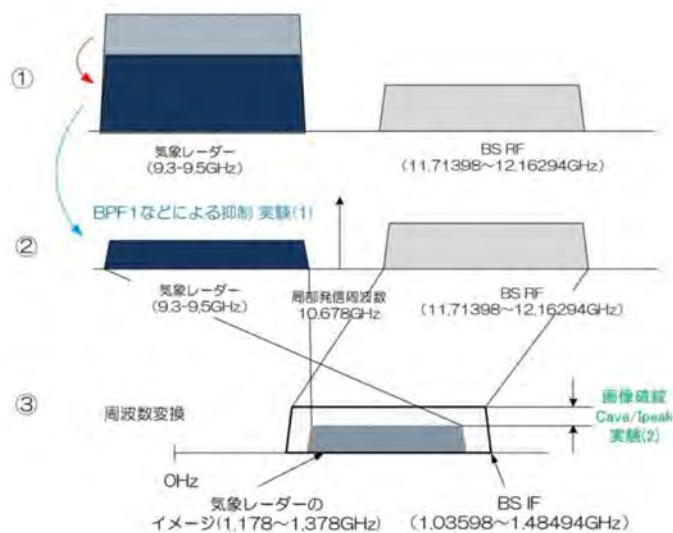


図 2. 3-3 X 帯気象レーダーから BS 受信への干渉メカニズム

2. 3. 2 屋外試験

X 帯気象レーダー (9.7GHz 帯) が CS 放送に与える干渉の影響について屋外試験を行った。屋外試験は和歌山県田辺市江川漁港 (図 2. 3-4) にて実施し、試験に用いた汎用二重偏波気象レーダーの関連主要性能を表 2. 3-1 に示す。



図 2. 3-4 屋外試験実施場所

表 2. 3-1 汎用二重偏波気象レーダーの関連主要性能

項目	性能	備考
中心周波数	9,795 MHz	
送信電力	48.7 dBm (74.1W)	18.7 dBW
アンテナ利得	33.2 dBi	
EIRP	81.9 dBm	51.9 dBW
3 dB ビーム幅	2.7 度	垂直・水平

屋外試験では、9795MHz を含む 2 チャンネル（水平偏波、垂直偏波）を干渉確認チャンネルとした（表 2. 3-2 参照）。また、気象レーダーのビームがホーンに直接入射する配置で干渉実験を実施した（図 2. 3-5 参照）。

表 2. 3-2 高度狭帯域衛星デジタル放送（124/128 度 CS デジタル放送）

チャンネル名	Ch番号	衛星/中継器	IFセンター	イメージlow	イメージhigh	Pol.
TBSニュースバード	572	JCSAT-3A JD7	1398MHz	9788.5MHz	9811.5MHz	V
GAORA SPORTS	602	JCSAT-3A JD8	1413MHz	9773.5MHz	9800.5MHz	H



図 2. 3-5 屋外試験風景

2. 3. 3 高性能レーダーと CS 放送の遮断離隔距離

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は次のように算出される。タイプ A (国交省 X-MP 相当) の EIRP : 97dBm、タイプ B (東京アメッシュ相当) の EIRP : 104dBm を想定実力値とし、CS 放送との遮断離隔距離の理論値を以下の計算式で計算した。

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

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

pfd_{lr} : レーダー許容値

所要 $\frac{C_{ave}}{l_{peak}}$: 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]

l_{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 pfd_{lr} 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 (dB)

干渉諸元等を表 2. 3-3 に示す。

表 2. 3-3 干渉諸元等

項目	諸元等	備考
124/128 CS信号	DVB-S2	
124/128 CS pfd (dBW/m ²)	-108	東京晴天時
所要Cave/lpeak (dB)	-1.7	気象レーダー実験より*2
マージン (dB)	0	遮断確認のためマージン無
イメージ妨害抑圧比 (dB) *1	93.5	気象レーダー実験より*3
アンテナ識別度 (dB)	15	気象レーダー実験より (最悪条件(通常は20dB程度))
レーダーpfd Ir (dBW/m ²)	2.2	遮断確認干渉波pfd

*1 : イメージ妨害抑圧比の ARIB 規格値は 31 dB

*2 正源、田島、花土他 : 気象レーダー波による BS/CS 受信機の画像破綻 C/I の測定, 信学総大, B-3-4, 2020. 3.

3 正源、田島、花土他 : BS/CS 受信アンテナのイメージ妨害抑圧比の測定, 信学技報, AP2019-30, SAT2019-12, 2019. 7.

計算された、CS 放送との遮断離隔距離の理論値を以下に示す。

タイプ A (国交省 X-MP 相当) 490 m

タイプ B (東京アメッシュ相当) 1097 m

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。

2. 3. 4 CS 放送受信設備との共用条件

CS 放送事業者と設置を希望する者が CS 放送受信設備への影響について運用調整を行い、合意が行われていることを条件とする。CS 放送受信設備に対し妨害を与えるような混信が認められた場合は、設置を希望する者が CS 放送事業者と調整の上、個別に対応するものとする。

今後、総務省において、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)」(http://www.soumu.go.jp/main_content/000372122.pdf) 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。

2. 4 9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件

2. 4. 1 一般的条件

2. 4. 1. 1 適用範囲

この技術的条件は、9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーであって、送信機の終段増幅器に固体素子を用いるものに対して適用する。

2. 4. 1. 2 周波数帯

高性能型気象レーダーの周波数帯は、9,702.5~9,797.75MHz の範囲（割当周波数 9,705~9,795MHz）とする。

2. 4. 2 送信装置の条件

2. 4. 2. 1 変調方式および電波の型式

変調方式はパルス変調とすることが適当である。電波の型式は、PON 又は QON、もしくはその両方とすることが適当である。

2. 4. 2. 2 搬送波の周波数

電波の型式が PON の搬送波の周波数は、電波の型式が QON の搬送波の周波数より 2.5MHz 高い周波数とすることが適当である。ただし、これらは同時に送信しないこと。

2. 4. 2. 3 周波数の許容偏差

周波数の許容偏差は、恒温槽付水晶発振器や温度補償水晶発振器が高い周波数精度を確保できることから、百万分率で 100 とすることが適当である。

2. 4. 2. 4 占有周波数帯幅の許容値

フェーズドアレイレーダーの場合、各ユニットの振幅・位相のばらつきによるその影響が出やすく、パルス波形や OBW 等がひずむことが知られている。パルス圧縮が必要な QON については、狭帯域検討を行い 2.5MHz に収めた。PON については、その影響が出やすく、現在運用中の気象レーダーの実測結果も踏まえ、3MHz とすることが適当である。

2. 4. 2. 5 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。

2. 4. 2. 6 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（以下、「二重偏波」という）、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 PON、QON とともに尖頭電力で表示することとする。

2. 4. 2. 7 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。

2. 4. 2. 8 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。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。

2. 4. 3 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。

- ・ 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。

2. 4. 4 スプリアス発射又は不要発射の強度

2. 4. 4. 1 帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値

基本周波数の平均電力より、40dB低い値とすることが適当である。

無線測位業務を行う無線局の送信設備の帯域外領域とスプリアス領域の境界の周波数は、ITU-R 勧告 SM.1541-5 Annex 8の条件に適合することとし、図 2.4-1のとおりとする。

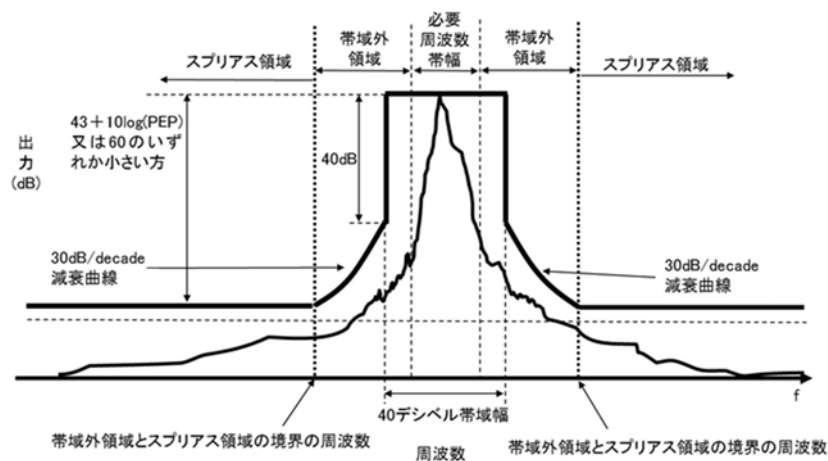


図 2. 4-1 帯域外領域とスプリアス領域の境界の周波数

2. 4. 4. 2 スプリアス発射領域における不要発射の強度の許容値

基本周波数の尖頭電力より、60dB 低い値とすることが適当である。なお、参照周波数帯幅及び帯域外領域とスプリアス発射領域の境界の周波数は、ITU-R 勧告 SM.1541-5 Annex 8 の条件に適合することが適当である。

2. 4. 5 空中線

2. 4. 5. 1 空中線利得

空中線利得については、EIRP、空中線電力での規定を満足すればよいので、規定しない。

2. 4. 5. 2 空中線ビーム幅

空中線のビーム幅は、水平方向のビーム幅を 1.2 度以下とする。

2. 4. 5. 3 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。

2. 4. 5. 4 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。

2. 4. 6 電波防護指針

9.7GHz 帯高性能型気象レーダーについては、当該レーダーを設置する段階において、その諸元が電波防護指針と適合できるか確認するものである（電波防護指針については、参考資料 1 参照）。

電波防護対策としては、電波防護指針に基づき、設置環境に応じてそれぞれが離隔距離を算出し、離隔距離以内に立ち入れないような対策（ビルの屋上に人が立ち入るときは電源が切れる、など）を施したり、空中線が停止した際は、電波の送信も停止させる機能を装備したりするなどの対策を行う必要がある。

X 帯高性能型気象レーダーの以下の諸元に基づき、電波防護指針の適合性を確認する。ひとつの参考値を表 2. 4. 4-1 に示す。

表 2. 4 4 - 1 離隔距離と計算条件

離隔距離	計算条件
15.3m	空中線は回転する EIRP : 110dBm デューティ比 : 10% 直接波+ビル等の反射

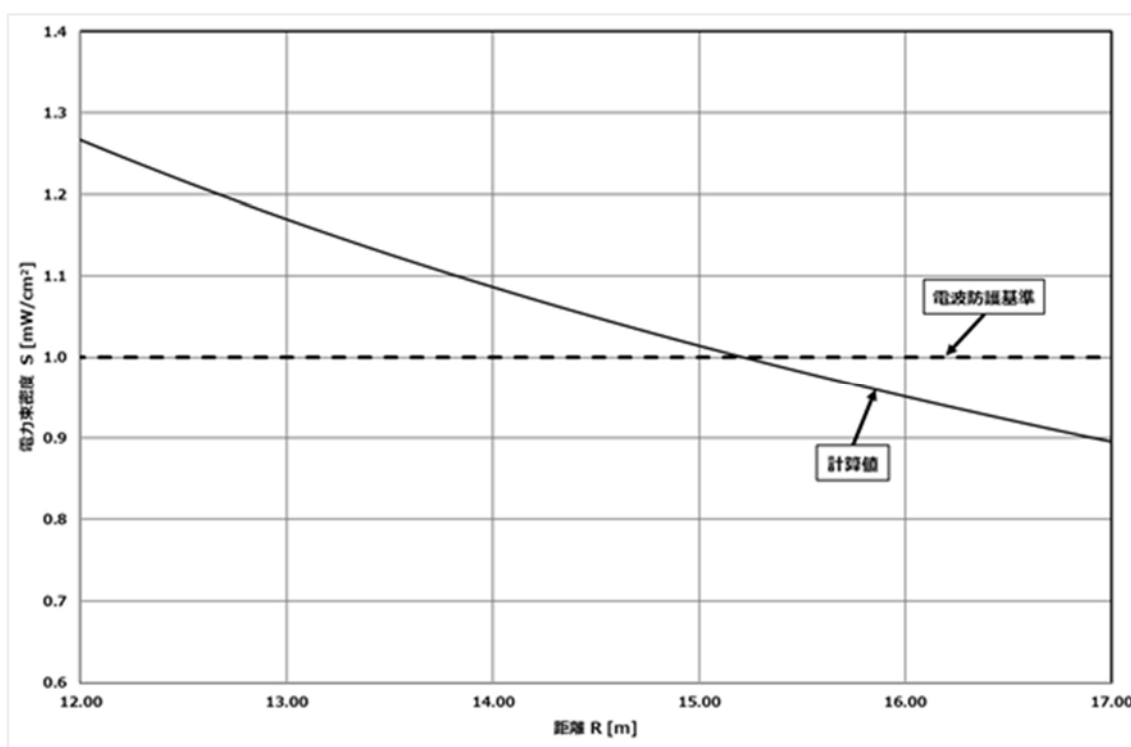


図 2. 4 4 - 2 X 帯高性能型気象レーダーの電波防護指針と適合性 (例)

この例の場合、離隔距離を 15.3m 程度確保することにより、電波防護指針に適合できることを確認した。ビルの屋上等に設置する際には、人の立ち入りに応じて送信を停止させる、アンテナの回転を停止した状態で送信できないようにする等の対策を行う必要がある。

2. 4. 7 受信装置

2. 4. 7. 1 等価雑音帯域幅および雑音指数
雑音指数は規定しない。

2. 4. 7. 2 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。

2. 4. 7. 3 副次的に発する電波等の限度
現行無線設備規則第 24 条の規定のとおり、X 帯高性能気象レーダーについても、受信機から副次的に発する電波の限度は、 4nW 以下とする。

2. 4. 8 測定法

本節では、9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件のうち、測定法に関する項目について定める。

2. 4. 8. 1 周波数の測定（特性周波数）
電波の型式が PON の場合 -3dBpp 、QON の場合 -10dBpp となる周波数の平均とする。

2. 4. 8. 2 占有周波数帯幅の測定
占有周波数帯幅（以下、OBW）の測定において、周波数オフセットした PON と QON を同時にスペクトラム・アナライザーにて測定すると分解能帯域幅（RBW）の設定値によって PON と QON のピークレベル差が変化するため、RBW の設定値を規定する必要がある。この解決方法として、周波数オフセットした PON と QON を個別にスペクトラム・アナライザーにて測定する（測定例については参考資料 2 参照）。

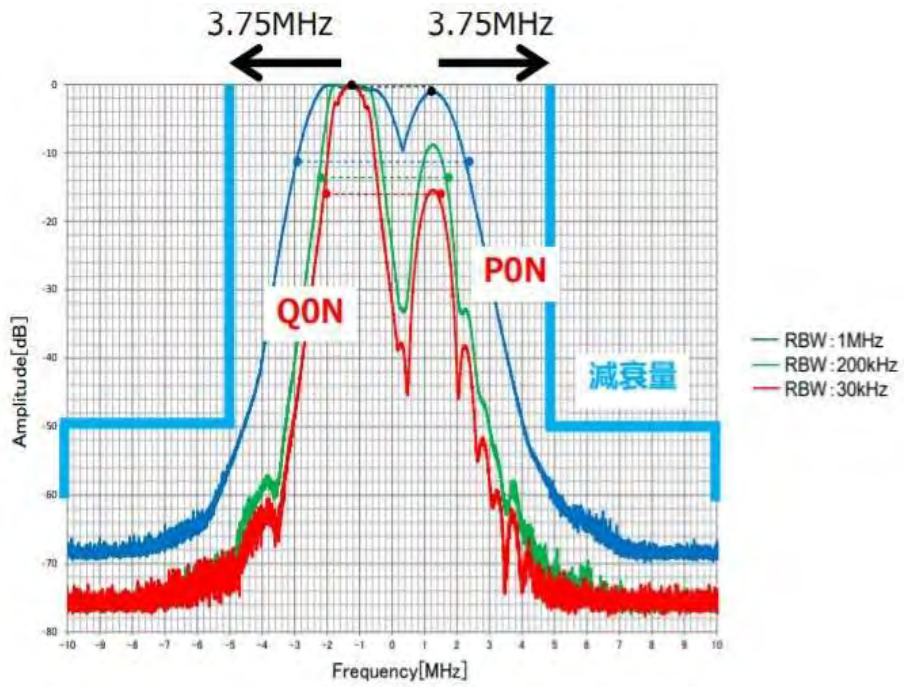


図 2. 4 4 - 3 周波数オフセットについて

表 の条件で測定を行うと、OBW、送信周波数及び搬送波の変調波スペクトルが同時に測定できる。

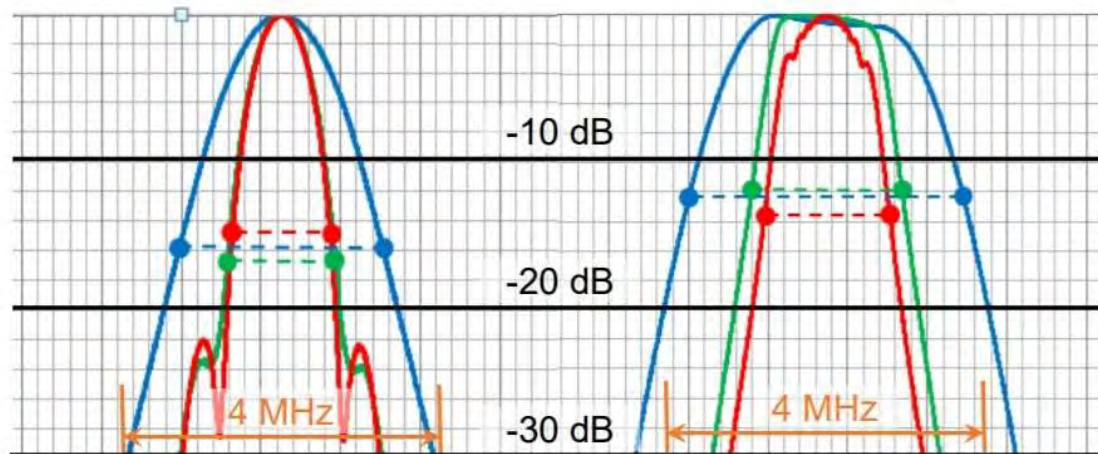
表 2. 44-2 測定条件

	測定条件	数値例	
		PON	QON
掃引周波数幅	OBW、送信周波数、及び搬送波の変調スペクトルの許容範囲が同時に測定できる幅	30 MHz	
分解能帯域幅 (RBW)	OBW 許容値の 1%以上	30 kHz	
ビデオ帯域幅 (VBW)	RBW と同程度	30 kHz	
データ点数	1000 点以上	1501 点以上	
掃引モード	繰り返し掃引	繰り返し掃引	
掃引時間	PRF の逆数とデータ点数の積以上	10 秒	
信号対雑音比 (S/N)	50 dB 以上	70 dB 以上	
検波モード	ポジティブピーク	ポジティブピーク	
表示モード	マックスホールド	マックスホールド	
特性周波数 (参考)	ピークから一定割合電力低下した周波数の平均	-3 dBpp となる周波数の平均	-10 dBpp となる周波数の平均

測定条件の根拠は、以下のとおりである。

(1) 掃引周波数幅

- OBW 計算をするためには、適切な幅で掃引しなければならない。OBW は、掃引周波数幅内の電力総和に対して 99%の電力が集中する周波数幅で規定される。つまり、掃引周波数の幅が狭すぎる場合には、OBW が過小評価される。
- 国内規定には根拠の記述がないため、ITU - R 勧告 SM. 443-4 を引用する。掃引周波数幅が過剰に広い場合、多量の雑音が計算過程に混入して精度低下要因となる。そのため、少なくとも最大振幅に対して 0.5% (または-26dB) のスペクトル成分が十分に含まれる幅とする (図)。
- OBW の端点は概ね-15~-10dB となる。OBW の 2 倍程度幅を取れば、スペクトルの接点は-30dB を下回るが、OBW だけでなく、送信周波数や減衰量など全体を一度に測定するには、掃引周波数幅を 30MHz とすることが適当である。



*ITU-R 勧告 SM. 443-4 “Bandwidth measurement at monitoring stations”

図 2. 4 4 - 4 OBW の測定方法の根拠

(2) RBW

OBW は探知性能に直結するため、許容値付近で運用することが望ましい。また、2桁程度の測定精度が必要であるため、RBW は OBW の 1%程度とする。ただし、実際のスペクトラム・アナライザは離散的な RBW しか設定できないため、RBW は OBW の 1%以上とする。

PON をスペクトラム・アナライザで測定すると、PRF 毎に分布する線スペクトルとして観測されるため、観測点毎にスペクトルを 1 本以上入れる必要があることから、RBW は PRF 以上とする必要がある。PRF として 50Hz~20kHz が想定されているが、RBW を 1%とした場合は概ね要件を満たす。

(3) データ点数

データ点数は、掃引周波数幅を RBW で除した値が下限値となる。掃引周波数が 30MHz、RBW を OBW の 1% ($30\text{MHz} \times 1\% = 0.030\text{MHz}$) とすると、下限値は $30/0.030 = 1000$ 点となる。

(4) 掃引モード

スペクトルの測定においては、レーダーと非同期で測定するために、1 回の掃引だけでは、スペクトルのエンベロープが形成されないため、ある程度の繰り返しが必要である。ITU-R 勧告 SM. 443-4 では、400 回以上の掃引が必要であると言われている。

(5) 掃引時間

各データ点の測定時間は最低でも、送受信 1 周期以上が必要である。PRF の逆数が送信周期であり、各点の測定時間の最低値となるため、掃引時間は PRF の逆数とデータ点

数の積以上とする。

(6) 信号対雑音比

OBW の測定には、最低でも 26dB のダイナミックレンジが要求されている。許容誤差を 0.02dB とすると、 $(S+N)/S \leq 10^{(0.02/10)}$ より $S/N \geq 216.65 \approx 23.4$ [dB] となるため、測定系には $26\text{dB} + 23.4\text{dB} = 49.4\text{dB}$ 以上のダイナミックレンジが要求される。よって、信号対雑音比は 50dB 以上とする。

2. 4. 8. 3 副次的に発する電波等の限度

空中線接続端子に擬似負荷を接続し、受信装置を連続受信状態として、スペクトラム・アナライザ等を用いて測定すること。

2. 4. 8. 4 フェーズドアレイレーダーにおける測定法

フェーズドアレイレーダーの周波数、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。（3つの測定方式については参考資料3）

2. 4. 9 その他

今後気象は激甚化していき、高性能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 $I/N < 35\text{dB}$ 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。

第3章 9.4GHz 帯汎用型気象レーダーに係る検討

3. 1 検討の背景

3. 1. 1 日本国内における気象レーダーのニーズ

現在実用局として展開、運用されている 5GHz 帯や 9.7GHz 帯の気象レーダーのような、公的な目的で広域監視する目的のレーダーのみでは、特定の地域の交通機関の安全確保や危険回避対策の支援といった特化した要望に応えていくことが難しくなっている。このようなニーズの高まりに対して、現状では 9.4GHz 帯の実験試験局として展開している気象レーダーにおいて、自ら気象レーダーを整備して観測を行い、高速道路や鉄道路線、空港や空路上の付近及び周辺のエリアに対して、実況監視や気象予測にて活用している現実がある。高速道路や鉄道、航空会社などの各交通機関の安全確保や危険回避対策のためには、より局地的で短時間に急変する気象現象の観測が必要だが、5GHz 帯や 9.7GHz 帯の気象レーダーは公的かつ広域の観測を目的とすることから、各交通機関にとって必ずしも適切な観測網とは言えない現状がある。

また、局地的な大雨の発生頻度の増加や、都市化の進展に伴う雨水の流出量の増加に伴い、都市型の浸水被害（内水氾濫）のリスクが高まっており、下水道は都市に降った「内水」の排除という役割を担っている。この下水道の役割を効果的に活用するために、積乱雲の早期検知、降雨量・強度の予測を 9.4GHz 帯気象レーダーを利用し、内水排除の最適制御、かつ浸水エリアを早期かつ正確に予測し、被害縮減効果が実証された例がある。

このような局地的に発生する気象現象を早期検知するうえで、雨雲や雪雲の発生～発達を広域かつ早期に検知が可能な気象レーダーに対するニーズは高まっている。このニーズの高まりに応えていくためには、展開が進んでいる 5GHz 帯や 9.7GHz 帯の公的な気象レーダー（高性能型）だけでなく、ニーズの高い箇所への迅速な設置及び運用が可能な、小型かつ廉価な気象レーダー（汎用型）が必要となる。

3. 1. 2 9.4GHz 帯汎用型気象レーダーの強み

9.4GHz 帯の周波数を利用すると、既設の 9.7GHz 帯高性能型気象レーダーへの干渉影響を危惧する必要がないことから、高性能型気象レーダーでは観測が不十分な場所の観測及び様々な観測が可能となる。

- 同一周波数の場合は、見通しが遮られていても電波は到達する（図 3. 1-1）

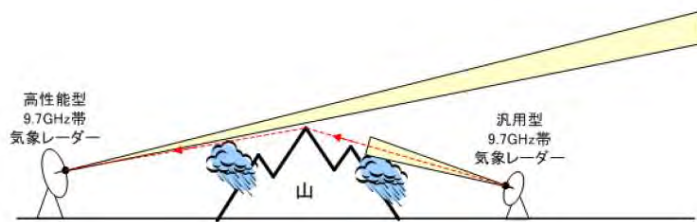


図 3. 1-1 同一周波数の場合は干渉影響有り

- 異なった周波数を利用することにより干渉影響が無くなり、高性能型気象レーダーの死角となる雨雲を捉えることができる。(図 3. 1-2)

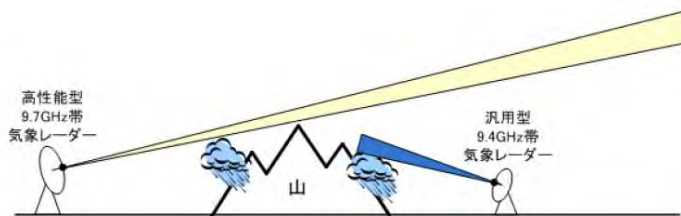


図 3. 1-2 異なった周波数の場合は干渉影響が無く、観測エリアの補完が可能

また、9.4GHz 帯汎用型気象レーダーは、サイズ、重量が小さいことにより設置場所の制約が少なく、車で観測場所に移動しての観測が容易に実現できることから、さまざまな観測用途として利活用できる。

- 火山噴火の際に、アンテナを垂直方向に動かす RHI 走査にて、噴煙高度を観測する。(図 3. 1-3)

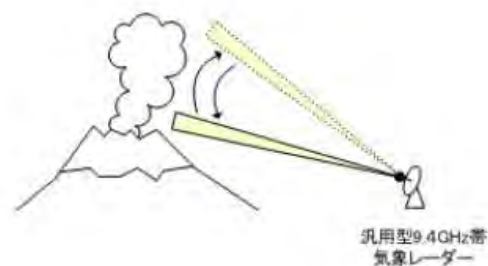


図 3. 1-3 噴煙高度の観測

- 移動観測車に気象レーダーを搭載し、観測したいエリアに移動して高精度な観測を行う。大規模な山火事（灰）の延焼方向を予測する研究が行われている。(図 3. 1-4)

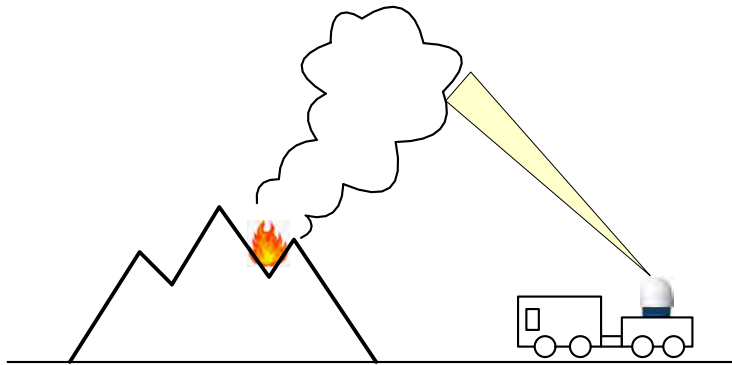


図 3. 1-4 移動観測車による山火事（灰）観測

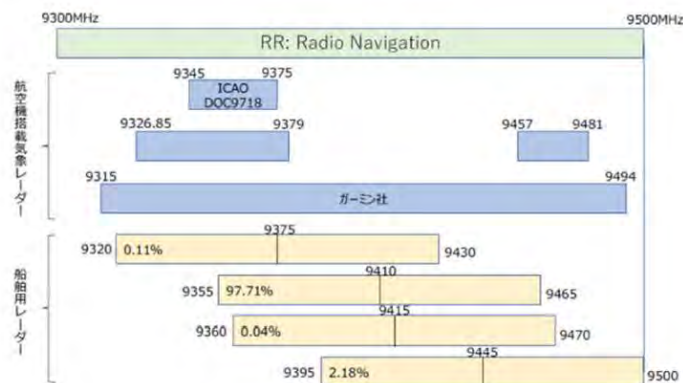
3. 1. 3 9.4GHz 帯汎用型気象レーダーの現状と課題

9.4GHz 帯には、海上無線航行業務、航空無線航行業務、無線標定業務のために使用する周波数が割り当てられており、当該周波数帯についての無線標定業務は、無線航行業務に対して周波数分配上、劣位の条件となっている。（表 3. 1-1）

表 3. 1-1 9.4GHz 帯における業務の優先順位（海外も同様）

優先順位	業務
1 位	無線航行業務（船舶、航空機用）
2 位	地上に設置した気象用レーダー（無線標定業務）
3 位	その他無線標定業務

また、国内における無線航行業務の船舶レーダー、航空機搭載気象レーダーの利用割当帯域は、図 3. 1-5 の通りである。



出所：総務省（令和元年11月末時点）

図 3.1-5 9.4GHz 帯における船舶用・航空機搭載気象レーダーの利用割当帯域（%値は対応する中心周波数のレーダー利用シェアを表す）

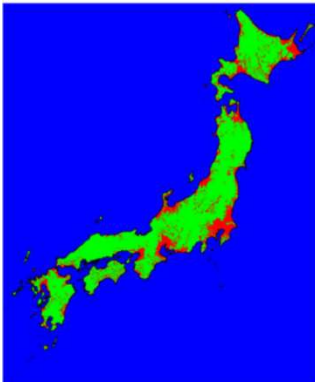
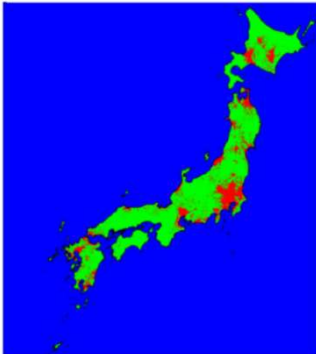
9. 4GHz 帯汎用型気象レーダーを運用するためには、海上無線航行、航空無線航行のレーダーに有害な干渉を与えず、実現可能な周波数共用条件を導き出すことが必要である。

3. 2 検討内容

3. 2. 1 周波数共用条件に関する検討

三菱総合研究所は、平成 30 年度から令和 2 年度まで、周波数ひっ迫対策のための技術試験事務として「動的な周波数割当に向けた無線局間の共用に関する調査検討」を行った。その中で、9. 4GHz 帯汎用型気象レーダーと同一周波数帯を利用している船舶用レーダー、航空機搭載気象レーダー、公共業務用レーダーとの共用条件についても検討を行っており、表 3. 2-1 のとおりの周波数共用条件案を示している。

表 3. 2-1 9. 4GHz 帯汎用型気象レーダーと他のレーダーとの共用条件案

周波数共用方策	船舶レーダー	航空機搭載気象レーダー	公共業務用レーダー
周波数離調	①干渉を避けるためには 40MHz 程度の離調が必要 ②同一周波数であっても干渉除去機能により運行上支障が出ることは少ない	①受信機のフィルタ特性より、中心周波数より 2. 3MHz 以上周波数離調する	①公共業務用レーダーの方向へのレーダー照射を行わず、かつ 10MHz 程度周波数離調する（公共業務用レーダーの運用周波数は公表されない）
離隔距離	（サイドローブ間の干渉） 赤の塗りつぶし：干渉エリア 	同一周波数 ・メインローブ間：820km ・メインローブ-サイドローブ間：540km ・サイドローブ-メインローブ間：530km ・サイドローブ間：470km 隣接周波数（±2. 3MHz 以上離調） ・メインローブ間：82km ・メインローブ-サイドローブ間：5km ・サイドローブ-メインローブ間：4km ・サイドローブ間：0. 21km	（サイドローブ-メインローブ間の干渉） 赤の塗りつぶし：干渉エリア 

周波数共用方策	船舶レーダー	航空機搭載気象レーダー	公共業務用レーダー
対応方策	①干渉が起こらない離隔距離をとる ②離隔距離が取れない場合は40MHz程度周波数を離調する ③離隔距離が取れない場合は周波数利用率の低い周波数帯で運用する	①航空機搭載気象レーダーの中心周波数より2.3MHz以上周波数離調する ②サイドローブ(気象) - メインローブ間の干渉が発生する場合は停波する	①公共業務用レーダーの運用周波数より10MHz以上送信周波数を離調し、必要な離隔距離を取る ②公共業務用レーダーの方向へのメインローブを向けない

表3. 2-1に示す通り、9.4GHz帯汎用型気象レーダーが、航空機搭載気象レーダー、公共業務用レーダーと周波数共用し継続的な観測を可能とするためには、キャリアセンス機能を持たせ、停波するのではなく、周波数を変更する必要がある。

古野電気株式会社は、キャリアセンス機能と周波数変更機能が、9.4GHz帯汎用型気象レーダーに実装可能であるか、設置の可能性のある場所にて検討を行った。

・キャリアセンスの概要

キャリアセンスとは、送信を開始する前に他の無線局が送信を開始しようとする無線チャネル(自チャネル)を使用していないか確認し、他無線機が自チャネルを使用中であれば、同一周波数での送信を行わないことで干渉を回避する仕組みである。通信中であれば一定時間後に再度通信を試みる。

3. 2. 2 キャリアセンス機能と周波数変更機能の実現性検討

9. 4GHz 帯の共用システムである船舶用レーダー、航空機用気象レーダーの送信電波が、どのように周波数範囲で利用されているか、9. 4GHz 帯気象レーダーの実機にて観測を行った。

- ① 船舶用レーダーの電波強度が強い沿岸（兵庫県西宮市西宮浜）
- ② 航空機用気象レーダーの電波強度が強い空港周辺（伊丹空港）



図 3. 2-2 電波観測場所

3. 2. 3 船舶用レーダーの電波強度が強い沿岸（兵庫県西宮市西宮浜）

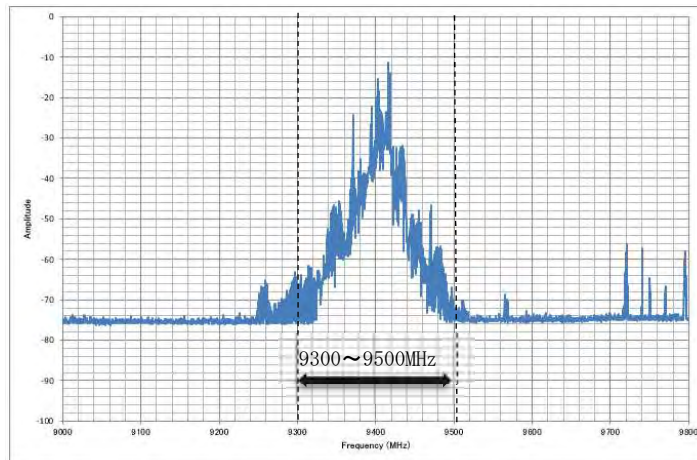


図3. 2-3 西宮浜（高さ約25m）での電波環境（10分間のMaxHOLD）

- 船舶の多い沿岸では、割り当て周波数帯（9.3GHz～9.5GHz）すべてにおいてスペクトルが観測され、使用されていない周波数が無く、電波を検知しない空き時間が無い（日中）状態である。
- 航空機用気象レーダーの電波も混在することにより、使用されていない周波数が無い状態である。
- 沿岸から離れて行くことで、建物の遮蔽減衰により電波強度は小さくなるが、建物は変化するため、遮蔽減衰は考慮しない方がよい。
- したがって、船舶の入出港のある沿岸では、キャリアセンス機能を具備しても使用していない周波数を見つけることができず、9.4GHz 帯汎用型気象レーダーは常時停波状態となる。

3. 2. 4 航空機用気象レーダーの電波強度が強い空港（伊丹空港周辺）

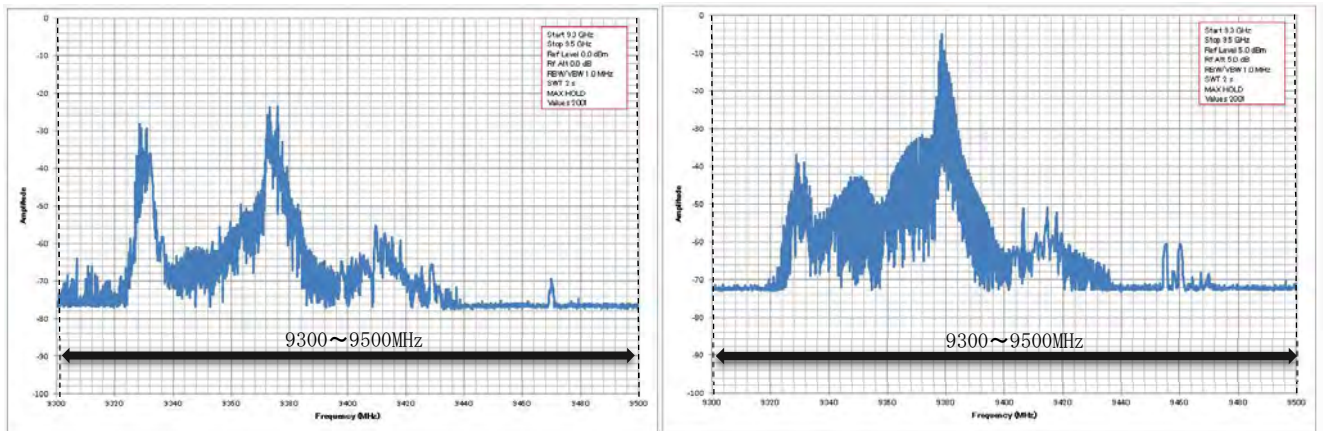


図3. 2-4 伊丹空港隣接駐車場での電波環境（10分間の MaxHOLD）

- 伊丹空港は海上から 12km 程度離れたことと、建物等の遮蔽により、船舶レーダーの電波は航空機気象レーダーの電波より小さくなった。
- 滑走路に待機する航空機も気象レーダーの電波を送信している。
そのため、飛行中の気象レーダーの電波だけを検知することはできなかった。
- 着陸直前の航空機の周波数を着目していると、スペクトルの広がりから電波型式の種類を変更（遠方検知の QON パルスから近傍検知の PON パルス）している可能性がある。
- 本観測場所では、9440MHz～9500Hz 帯の周波数の使用頻度が低い。
但し、9455MHz、9458MHz、9460MHz、9465MHz、9470MHz の周波数が稀に検出される。
したがって、空港周辺では使用頻度の低い周波数帯が存在することから、キャリアセンス機能は有効である。

続いて、航空機用気象レーダーの電波強度が強い空港（伊丹空港周辺）にて、共用システムからの干渉影響を受けないための受信帯域フィルタを取り付けた状態で、電波状況の確認を行った。

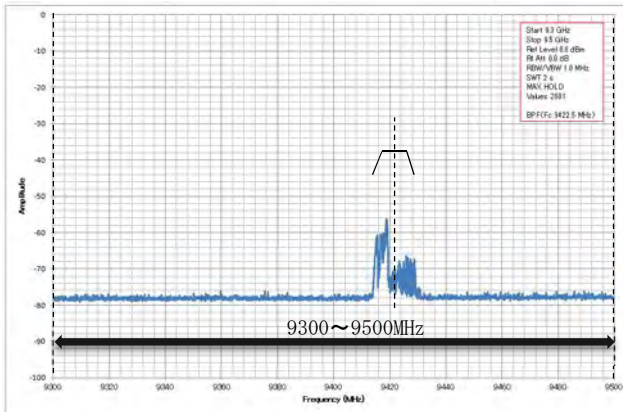


図 3. 2-5

受信帯域フィルタ 9422.5MHz±10MHz

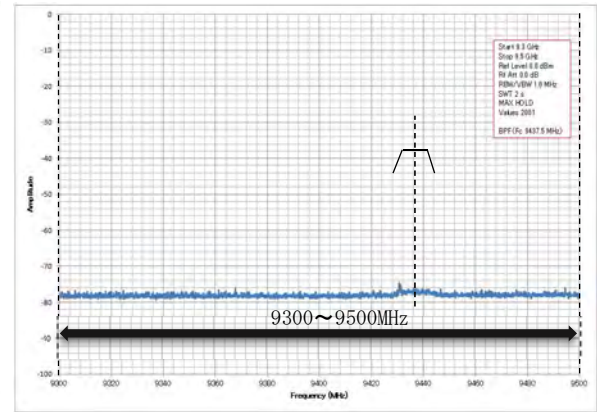


図 3. 2-6

受信帯域フィルタ 9437.5MHz±10MHz

- 気象レーダーは、共用システムからの電波、及び自身のイメージ周波数を除去するために、使用する周波数に応じた受信帯域フィルタを挿入している。
- 9422.5MHz±10MHz の受信帯域フィルタを用いた場合は、船舶用レーダーの電波が混入している。
- 9437.5MHz±10MHz の受信帯域フィルタを用いた場合は、混入する電波の検出は無かった。
- したがって、受信帯域フィルタの効果は確認できたが、受信帯域内のみしか共用システムからの電波を検出できないため、気象レーダー自身で電波環境を観測するのは難しい。

3. 3 検討結果

- 沿岸周辺の日中は、船舶用レーダーからの電波が常時観測される頻度が高く、電波強度が強く、スペクトルの広がりも大きいことから、利用頻度の少ない周波数を見つけることは困難である。
- 空港周辺は航空機用気象レーダーの 9320MHz～9400MHz の電波が観測される。但し、ガーミン社の航空機用気象レーダーの利用周波数 9315MHz～9494MHz を含めると、利用していない周波数は 9300MHz～9315MHz となる。
- キャリアセンス機能を外部機器（測定器）にて実現すると大幅なコストアップになるため、安価な汎用型小型気象レーダーのコンセプトから外れることになる。
- 気象レーダー自身での周波数検出機能を検討したが、受信系に共用システムからの電波、及び自身のイメージ周波数を除去するために、使用する周波数に応じた物理的な受信帯域フィルタを挿入しているため、受信帯域内の周波

数しか検知できず、使用していない周波数の確認ができない。

- 使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るが、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て運用する方法しか無く、現実的でない。
- したがって、キャリアセンス機能および周波数変更機能を 9.4GHz 帯気象レーダーに具備することは、物理的、コスト面、運用面において困難である。

3. 4 結論

9.4GHz 帯汎用型小型気象レーダーに関する以上の検討結果から、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。しかしながら、海外展開に向けた無線機器製造事業用実験、実証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。但し、免許申請の際は十分な与干渉影響を検討することとする。

- 無線機器製造事業用の実験試験局としての想定用途
免許人：気象レーダー製造メーカー
目的：海外向け気象レーダーの総合試験
- 運用時間 30 分/台 程度
- 実証実験用としての想定用途
免許人：気象レーダー製造メーカー、地方自治体
目的：雨・雪・風の調査検討、気象レーダーが関わる実証事業
海外市場要求に関する実験、評価、検証
- 欧州の統一規格に 9 GHz 帯気象レーダーに関する新たな整合規格が加わった。
・ ETSI EN 303 347-3 v2.1.1 (2021-06)
Meteorological Radars;
Harmonised Standard for access to radio spectrum;
Part 3: Meteorological Radar Sensor operating in the frequency band
9 300 MHz to 9 500 MHz (X band)
- 学術研究機関などにおける調査検討用としての想定用途
免許人：大学研究機関、民間気象事業者
目的：雨、雪、風、火山（噴出物）の調査検討

第4章 9GHz 帯気象レーダーの BS/CS 受信設備の干渉軽減に関する調査検討

4. 1 干渉軽減検討の概要

4. 1. 1 調査検討の概要

気象レーダーは、降水分布や風向・風速等の観測に用い、この情報をもとに気象予報や災害情報に役立てられ、国民生活の安全・安心の確保に不可欠なものとなっている。今般、局地的大雨等による気象災害の甚大化を受け、雨雲等の早期検知や予報の信頼度向上のため、より高性能な気象レーダーの導入や自治体等における小型の気象レーダーの配備が求められている。

このため、次世代高機能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、気象レーダー間及び他システム等との周波数共用を行うなど、気象レーダーの技術的条件に関する検討を行う必要があり、令和4年1月、情報通信審議会情報通信技術分科会において「次世代高機能気象レーダー等の導入に関する技術的条件等」の検討を開始したところである。

本検討項目の一つとして、9.4GHz 帯気象レーダー及び9.7GHz 帯気象レーダー（以下「X 帯気象レーダー」という。）の使用する周波数帯が、BS(*1)/CS(*2) 放送受信設備のイメージ周波数帯と重なっており、BS/CS 放送の受信に影響を与える可能性があるという問題があり、これまで総務省の「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（平成30年度から令和3年度）」において、電波暗室での測定・評価や屋外試験により、X 帯気象レーダーが BS/CS 放送受信設備に妨害干渉を与える条件（所要離隔距離）を整理したが、必要となる所要離隔距離が最大で 65,373m であり、BS/CS 放送受信設備を保護するための適切な条件設定に至らなかった。

こうした背景を踏まえ、課題解決の一つの方策として、本調査検討では、X 帯気象レーダーからの干渉を軽減する BS/CS 放送受信設備の実現可能性について技術検討を行うとともに、X 帯気象レーダーと BS/CS 放送受信設備の適切な共用条件等の取りまとめを行った。

(*1) BS : Broadcasting Satellites、東経 110 度衛星

(*2) CS : Communication Satellites、東経 124 度及び 128 度衛星

4. 1. 2 調査検討の背景

X 帯気象レーダーの使用する周波数帯は、BS/CS 放送受信設備における中間周波数 (IF) への周波数変換過程で局発周波数に対して BS/CS 放送の周波数帯のイメージ周波数となっており、IF 周波数帯において気象レーダー信号と BS/CS 放送受信信号が重複するため、BS/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た信号が入力される場合、気象レーダー送信波が BS/CS 受信設備への混信となり、BS/CS

放送の受信に影響を与える可能性がある。

2018年度はBS/CS放送受信設備へのX帯気象レーダー送信波の影響について、放送関係者と気象レーダー関係者で協力し電波暗室にて測定及び評価が行われた(*3)。2019年度は、屋外試験により9.7GHz帯気象レーダーがCS放送受信設備に妨害干渉を与える条件(所要離隔距離)を整理された(*4)。2020年度は9.4GHz帯のMP-PAWRがBS放送受信設備に妨害干渉を与える条件(所要離隔距離)を整理するための検討が行われた(*5)。2021年度は9.4GHz帯MP-PAWRがBS放送受信設備に与える干渉の影響について屋外試験を行い、所要離隔距離を整理するための検討が行われた(*6)。

2022年度は、9.4GHz帯MP-PAWRがBS放送受信設備に与える干渉の改善に関する可能性について、BS放送受信設備対策モデルの検討を実施した。そして、対策したモデルにて屋内測定及び屋外実証を行い、所要離隔距離を整理した。また、市場で普及しているBS放送受信設備についても合わせて試験を行い、所要離隔距離を整理した。なお、本報告で用いるイメージ妨害抑圧比は、ARIB規格等を参照しない限り、反射鏡込みイメージ妨害抑圧比を指す。(*7)

- (*3) 平成30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
- (*4) 令和元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)
- (*5) 令和2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)
- (*6) 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)

(*7) 正源、田島、花土他：BS/CS受信アンテナのイメージ妨害抑圧比の測定，信学技報，AP2019-30，SAT2019-12，2019.7.

4. 1. 3 イメージ妨害の概要

BS放送は11.7GHz～12.2GHz帯、CS放送(東経110度)は12.2GHz～12.75GHz帯の周波数で、右旋円偏波および左旋円偏波の電波を利用しており、CS放送(東経124度)は12.2GHz～12.75GHzで、水平偏波および垂直偏波の電波を利用しているが、住宅内でのケーブルによる伝送を容易にする等のため、受信空中線(パラボラアンテナ等)において受信した電波を、BS放送、CS放送(東経110度)は約1.0GHz～3.2GHz、CS放送(東経124度)は約1.0～1.55GHzの中間周波数帯に変換している。この変換に当たっては、受信した信号にBS放送/CS放送(東経110度)の右旋円偏波は局部発振周波数10.678GHz、左旋円偏波は9.505GHzの信号を混合させたときの差を利用して中間周波数を得ている(例：12.0-10.678=1.322GHz)。CS放送(東経124度)では水平偏波および垂直偏波ともに局部発振周波数11.2GHzの信号を混合させたときの差を利用して中間周波数を得ている(例：12.65-11.2=1.45GHz)。ところが、BS放送受信設備において、この局部発振周波数10.678GHzの信号と9.356GHzの信号が混合された場合にも同じく1.322GHzの周波数が発生する(10.678-9.356=1.322GHz)。後者の

1. 322GHzの周波数はイメージ周波数と呼ばれ、9GHz 帯気象レーダーの近傍に衛星放送の受信空中線があるような場合には、衛星放送の受信画像等に影響が出ることがある。CS放送(東経124度)受信設備の場合も同様である。

4. 1. 4 本調査検討で対象とするイメージ妨害

4. 1. 2 調査検討の背景で述べた通り、本調査検討は、BS放送受信設備を対象とした。BS放送受信設備では、屋外に設置されたBS受信アンテナのフィード部において、BS放送信号(12 GHz帯) からIF信号への周波数変換が行われ、IF信号(L帯) が屋内の受信装置に供給される(図4. 1-1 参照)。この時、気象レーダーのイメージ周波数がBSのIF帯に現れ(図4. 1-2 参照)、その電力が大きい場合に画像破綻が発生することになる。BS放送には右旋円偏波と左旋円偏波のチャンネルがあるが、このうち右旋円偏波にはBS-1からBS-23までのチャンネルがある。気象レーダーに割り当てられている周波数9.3 GHz - 9.5 GHzのイメージがBSのIFに現れるのは右旋円偏波のBS-7からBS-19である。

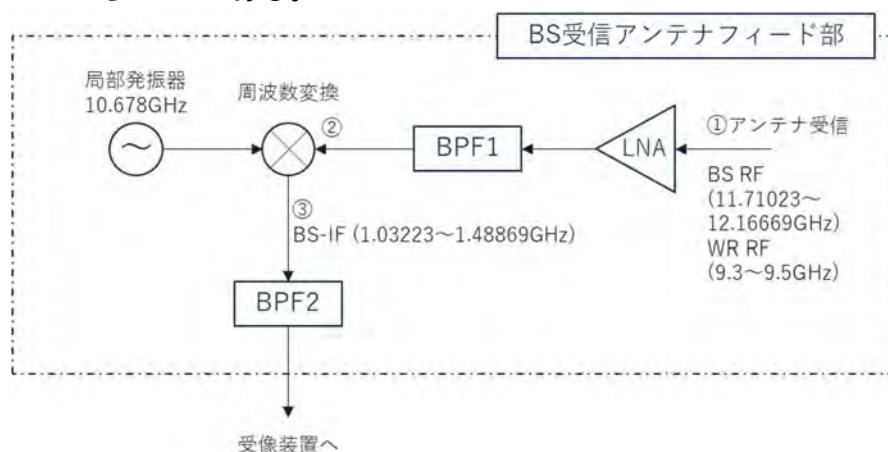


図4. 1-1 BSコンバーターの構成

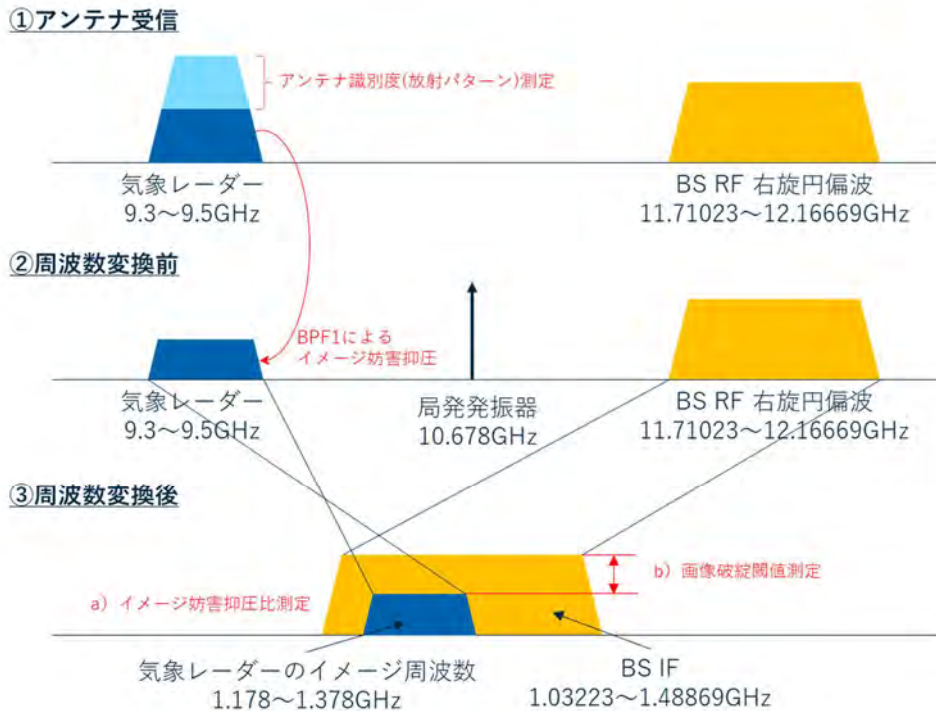


図 4. 1-2 気象レーダーからBS受信への干渉メカニズム

4. 2 調査検討の内容・手法

4. 2. 1 BS/CS放送受信設備対策モデルの検討

X帯気象レーダーからの干渉低減を目的とする、BS/CS放送受信設備の特性改善に関する可能性について、次に示すBS/CS放送受信設備対策モデルの検討を行った。

- 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する
- ② イメージ帯域を阻止するBPF（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する
- ③ 一次放射器の円形導波管の設計変更を行い最適化することでイメージ干渉を回避する

各対策モデルの詳細について、以下に示す。

- ①局発周波数をハイローカル（13.903GHz）による対策モデル ブロック図、設定条件局発周波数をハイローカル（13.903GHz）にすることで、イメージ干渉を回避する。

局発周波数を13.903GHzに選定した理由は、局発周波数13.903GHzと既存のIF周波数にする局発周波数10.678GHzとの差分の周波数にスプリアスが発生し、BS/CS放送のIF周波数帯（1032~3224MHz）に落ち込むと妨害波となり、テレビ受信が不可となる可能性があるため、BS/CS放送のIF周波数以上になるように設定した。

$$(13.903\text{GHz} - 10.678\text{GHz} = 3225\text{MHz})$$

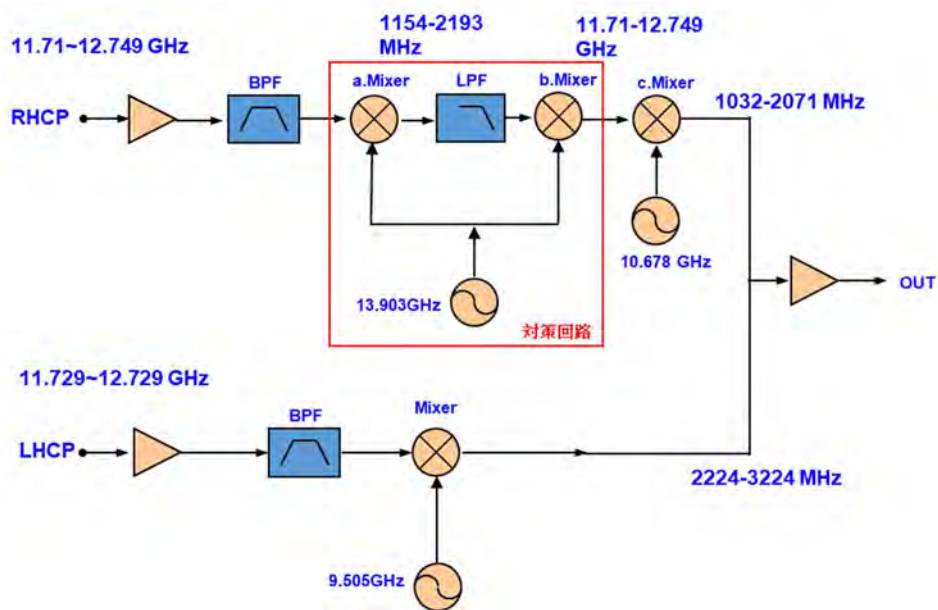


図4. 2-1 ①局発周波数をハイローカル（13.903GHz）による対策モデル

ハイローカルによるイメージ干渉回避の過程

- 1) BS/CS放送信号と9GHz帯レーダー信号がLNBに入力。
- 2) a. MixerによりBS/CS放送信号を1.154~2.193GHz、9GHz帯レーダー信号を4.247~5.297GHzに周波数変換する。
- 3) LPFで9GHz帯レーダー信号の4.247~5.297GHzを阻止する。
- 4) b. MixerによりBS/CS放送信号のみ11.7~12.75GHzに周波数変換する。
- 5) c. MixerによりBS/CS放送信号を通常のBS-IF帯に周波数変換する。
- 6) LHCPと混合してイメージ信号が100dB以上抑圧されたBS-IF信号を出力する。

- ② B P F 追加による対策モデル ブロック図、設定条件
 イメージ帯域を阻止する B P F (バンドパスフィルター) を追加することにより、イメージ妨害抑圧比を100dB以上とし、イメージ干渉を回避する。

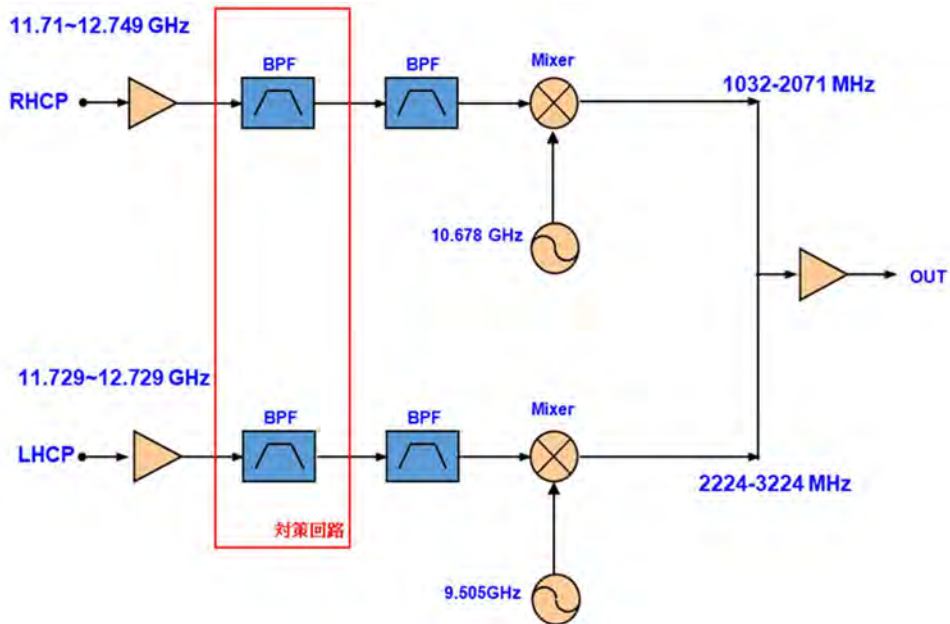


図 4. 2 - 2 ② B P F 追加による対策モデル

③一次放射器の円形導波管の設計変更による対策モデル イメージ図、設定条件
一次放射器の円形導波管の長さや直径を最適化することにより、イメージ妨害
抑圧比を100dB以上とし、イメージ干渉を回避する。

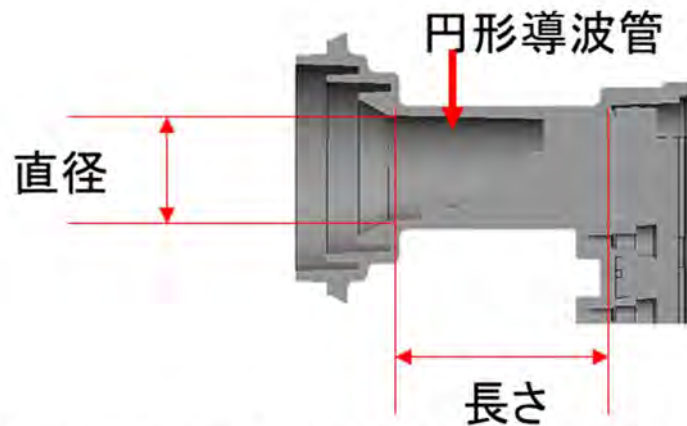


図4. 2-3 ③一次放射器の円形導波管の設計変更による対策モデル

検討した対策モデル①～③の試作結果を、表4. 2-1～表4. 2-3、図4. 2-4～図4. 2-6に示す。

表 4. 2 - 1 ①局発周波数をハイローカル(13.903GHz)による対策モデル試作結果

項目	規格	測定値
受信周波数	11.7~12.75GHz	11.7~12.75GHz
受信偏波	右左旋円偏波	右左旋円偏波
出力周波数	1032~3224MHz	1032~3224MHz
コンバーター利得	48~58dB	49.6~55.9dB
受信帯域内利得偏差	右旋 BS、右旋広帯域 CS 各受信帯域内で 4dB (p-p) 以下 左旋 BS、左旋広帯域 CS 各受信帯域内で 4dB (p-p) 以下	3.6dB
	右旋 BS、広帯域 CS 受信帯域内で 6dB (p-p) 以下 左旋 BS、広帯域 CS 受信帯域内で 6dB (p-p) 以下	4.8dB
受信チャンネル内利得偏差	受信チャンネル帯域内で 1dB (p-p) 以内	0.97dB
出力 VSWR	受信帯域内で 2.5 以下	2.05
局部発振位相雑音	⊖55dBc/Hz 以下 (1kHz オフセット)	-61.1dBc/Hz
	⊖73dBc/Hz 以下 (5kHz オフセット)	-76.0dBc/Hz
	⊖83dBc/Hz 以下 (10kHz オフセット)	-85.4dBc/Hz
雑音指数 (NF)	1.2dB 以下 ※各社の雑音指数のカタログ値は、0.5dB (標準)	1.19dB
イメージ妨害抑圧比	100dB 以上 (8.606~9.656GHz)	131.56dB
	55dB 以上 (15.056~16.106GHz, 6.260~7.310GHz)	57.23dB
局部発振信号漏洩電力	-55dBm 以下	-84.1dBm
相互変調レベル	-70dBm 入力 2 信号において -55dB 以下	-55.39dB
出力インピーダンス	75Ω (F 型コネクタ)	75Ω (F 型コネクタ)
局部発振周波数	13.903GHz (右旋円偏波)	13.903GHz (右旋円偏波)
	10.678GHz (右旋円偏波)	10.678GHz (右旋円偏波)
	9.505GHz (左旋円偏波)	9.505GHz (左旋円偏波)
局部発振周波数安定度	±1.5MHz 以内	-0.2~+1.2MHz
使用温度範囲	⊖30~⊕50°C	⊖30~⊕50°C
電源	DC15V 3.75W 以下	3.47W
外観寸法	150 (H) × 75 (W) × 90 (D) mm 以下	約 140 × 65 × 85 mm
質量 (重量)	約 0.4 kg	約 0.34kg

※規格値は、ARIB STD B-63 同じ値とした。

※イメージ妨害抑圧比の値については調査検討の目標値。



図4. 2-4 ①局発周波数をハイローカル（13.903GHz）による対策モデル 試作品

表4. 2-2 ②BPF追加による対策モデル 試作結果

項目	規格	測定値
受信周波数	11.7~12.75GHz	11.7~12.75GHz
受信偏波	右左旋円偏波	右左旋円偏波
出力周波数	1032~3224MHz	1032~3224MHz
コンバーター利得	48~58dB	49.3~52.9dB
受信帯域内利得偏差	右旋BS、右旋広帯域CS各受信帯域内で4dB(p-p)以下 左旋BS、左旋広帯域CS各受信帯域内で4dB(p-p)以下	3.1dB
	右旋BS、広帯域CS受信帯域内で6dB(p-p)以下 左旋BS、広帯域CS受信帯域内で6dB(p-p)以下	4.1dB
受信チャンネル内利得偏差	受信チャンネル帯域内で1dB(p-p)以内	0.63dB
出力VSWR	受信帯域内で2.5以下	2.02
局部発振位相雑音	⊖55dBc/Hz以下(1kHzオフセット)	-63.2dBc/Hz
	⊖73dBc/Hz以下(5kHzオフセット)	-81.8dBc/Hz
	⊖83dBc/Hz以下(10kHzオフセット)	-86.7dBc/Hz
雑音指数(NF)	1.2dB以下 ※各社の雑音指数のカタログ値は、0.5dB(標準)	1.14dB
イメージ妨害抑圧比	100dB以上	118.10dB
局部発振信号漏洩電力	-55dBm以下	-122.7dBm
相互変調レベル	-70dBm入力2信号において-55dB以下	-55.41dB
出力インピーダンス	75Ω(F型コネクタ)	75Ω(F型コネクタ)
局部発振周波数	10.678GHz(右旋円偏波)	10.678GHz(右旋円偏波)
	9.505GHz(左旋円偏波)	9.505GHz(左旋円偏波)
局部発振周波数安定度	±1.5MHz以内	-0.3~+0.3MHz
使用温度範囲	⊖30~⊕50°C	⊖30~⊕50°C
電源	DC15V 3W以下	2.63W
外観寸法	140(H)×65(W)×90(D)mm以下	約130×60×85mm
質量(重量)	約0.3kg以下	約0.24kg

※規格値は、ARIB STD B-63 同じ値とした。

※イメージ妨害抑圧比の値については調査検討の目標値。

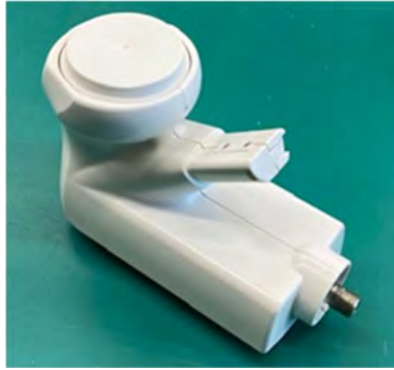


図4. 2-5 ②BPF追加による対策モデル 試作品

表4. 2-3 ③一次放射器の円形導波管の設計変更による対策モデル 試作結果

項目	規格	測定値
受信周波数	11.7~12.75GHz	11.7~12.75GHz
受信偏波	右左旋円偏波	右左旋円偏波
出力周波数	1032~3224MHz	1032~3224MHz
コンバーター利得	48~58dB	50.8~55.8dB
受信帯域内利得偏差	右旋BS、右旋広帯域CS各受信帯域内で4dB(p-p)以下 左旋BS、左旋広帯域CS各受信帯域内で4dB(p-p)以下	3.9dB
	右旋BS、広帯域CS受信帯域内で6dB(p-p)以下 左旋BS、広帯域CS受信帯域内で6dB(p-p)以下	4.9dB
受信チャンネル内利得偏差	受信チャンネル帯域内で1dB(p-p)以内	0.71dB
出力VSWR	受信帯域内で2.5以下	1.81
局部発振位相雑音	⊖55dBc/Hz以下(1kHzオフセット)	-68.9dBc/Hz
	⊖73dBc/Hz以下(5kHzオフセット)	-83.4dBc/Hz
	⊖83dBc/Hz以下(10kHzオフセット)	-90.9dBc/Hz
雑音指数(NF)	1.2dB以下 ※各社の雑音指数のカタログ値は、0.5dB(標準)	0.93dB
イメージ妨害抑圧比	100dB以上	95.50dB
局部発振信号漏洩電力	-55dBm以下	-116.5dBm
相互変調レベル	-70dBm入力2信号において-55dB以下	-55.12dB
出力インピーダンス	75Ω(F型コネクタ)	75Ω(F型コネクタ)
局部発振周波数	10.678GHz(右旋円偏波)	10.678GHz(右旋円偏波)
	9.505GHz(左旋円偏波)	9.505GHz(左旋円偏波)
局部発振周波数安定度	±1.5MHz以内	-0.4~+0.4MHz
使用温度範囲	⊖30~⊕50℃	⊖30~⊕50℃
電源	DC15V 3W以下	2.67W
外観寸法	140(H)×65(W)×90(D)mm以下	約110×60×85mm
質量(重量)	約0.3kg以下	約0.19kg

※規格値は、ARIB STD B-63 同じ値とした。

※イメージ妨害抑圧比の値については調査検討の目標値。

調査検討の結果、一次放射器の円形導波管の設計変更による対策モデルは、目標値を達成することが出来なかった。



図4. 2-6 ③一次放射器の円形導波管の設計変更による対策モデル 試作品

4. 2. 2 実証実験の流れ

屋内（電波暗室）でのBS受信アンテナの特性測定、埼玉大学での屋外実証実験を行い、MP-PAWRとBS受信設備との共用条件（所要離隔距離）の整理を行った。評価の流れを図4. 2-7に示す。

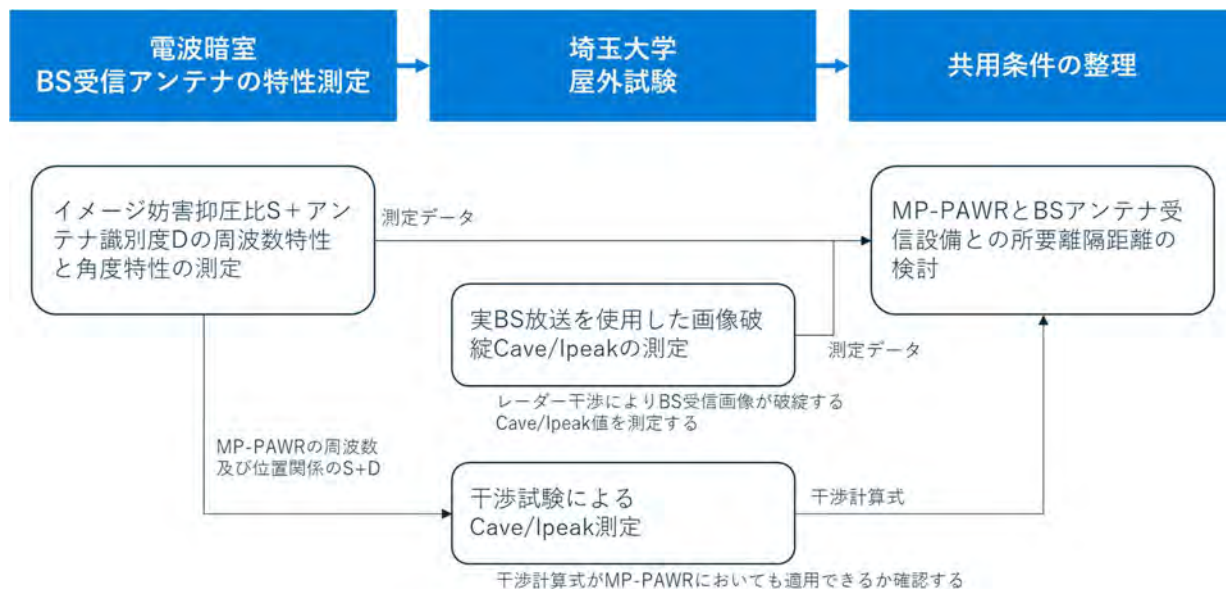


図4. 2-7 評価の流れ

埼玉大学に設置されているMP-PAWRの周波数は9,425 MHzであるが、将来の次世代高機能レーダーの稠密配置を考慮し、気象レーダーに割り当てられた周波数帯で評価を行う必要がある。また昨年度までの検討結果により、所要離隔距離はイメージ妨害抑圧比S+アンテナ識別度Dの値に大きく依存し、その値が大きくなれば所要離隔距離は急激に小さくなるのがわかっている。このことから、BS受信設備に影響を与えるBS-1、BS-11、BS-23でのBS受信アンテナのイメージ妨害抑圧比S+アンテナ識別度Dの特性を電波暗室にて測定した。

屋外試験はMP-PAWRが設置されている埼玉大学で行った。ここでの試験はMP-PAWRによる干渉波によりBS受信画像が破綻するCave/Ipeak※値を測定した。また電波暗室で測定したイメージ妨害抑圧比S+アンテナ識別度Dの値とMP-PAWRから放射される電力から計算されるCave/Ipeak計算値と、BS受信設備でのCave/Ipeak実測値の一致性を確認することで、干渉計算式がMP-PAWRにおいても適用できるかを確認した。

これらの測定結果を受け共用条件の整理では、MP-PAWRとBS受信設備との所要離隔距離を算出した。

※ Cave : BS受信信号の平均電力 Ipeak : 気象レーダー信号のピーク電力

4. 3 検討結果

4. 3. 1 屋内測定

4. 3. 1. 1 概要

図4. 3-1に示すとおり電波暗室(マスプロ電気株式会社 電波測定棟)にてイメージ妨害抑圧比 S+アンテナ識別度 D の周波数特性と角度特性を測定(2022年12月~2023年1月)した。測定対象のBS受信アンテナを表4. 3-1に示す。

表4. 3-1 測定対象のBS受信アンテナ

市場流通品 右左旋アンテナ	A社
	B社
	C社
	D社
右旋アンテナ(2014~2016年品)※	E社
試作品	試作品①
	試作品②
	試作品③

※平成30年度本調査検討報告書Appendix B (1) 受信アンテナ込みイメージ妨害抑圧比 Sが最も小さいアンテナ

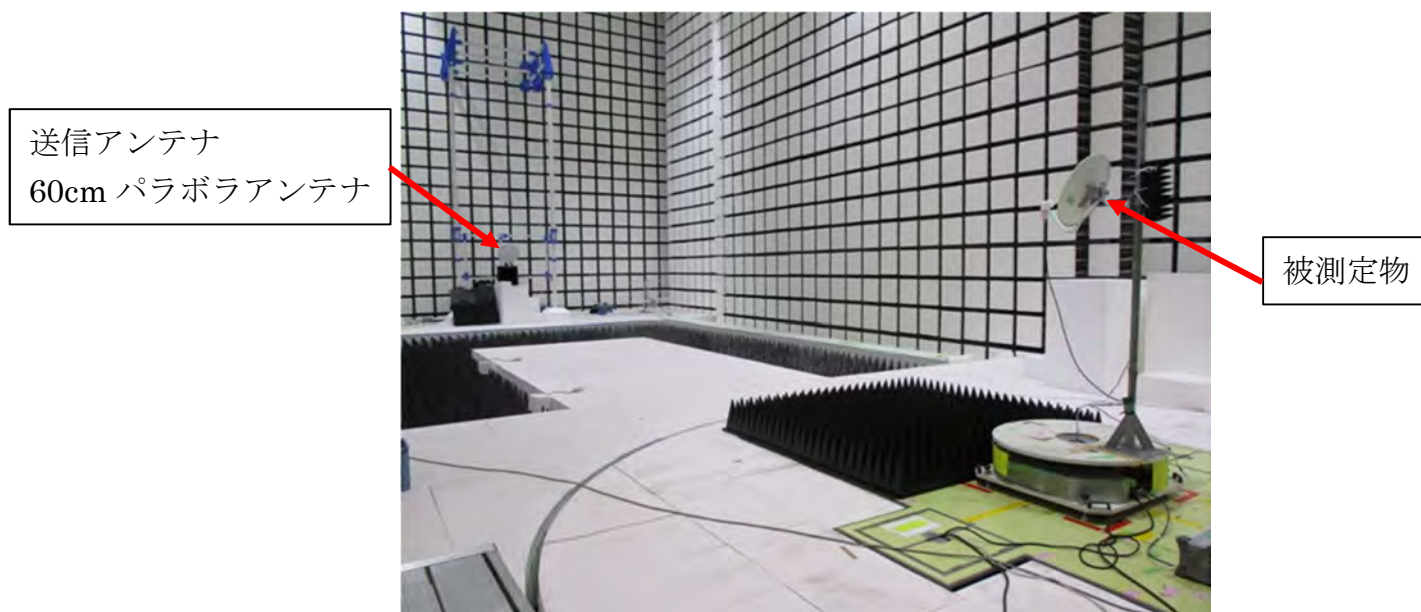


図4. 3-1 電波暗室内 測定写真

4. 3. 1. 2 測定方法

電波暗室において、送信アンテナから 12GHz 帯 (BS) と 9GHz 帯 (イメージ) を送信し、約 20m 離れた地点において、BS 受信アンテナを AZ 方向に回転させながら受信レベルを測定する。12GHz 帯 (BS) と 9GHz 帯 (イメージ) 両受信レベル差から 9GHz 帯 (イメージ) の抑圧比を算出する。

仰角は、ボアサイト (正対)、仰角 29° (稚内)、仰角 38° (東京)、仰角 57° (石垣) の角度を測定した。

測定条件、測定方法を以下に示す。測定系統図を図 4. 3 - 2 に示す。

<測定条件>

○測定周波数：

- ・ BS-1ch 11. 72748GHz、イメージ周波数 9. 62852GHz
- ・ BS-11ch 11. 931GHz、イメージ周波数 9. 425GHz (レーダー一周波数)
- ・ BS-23ch 12. 14944GHz、イメージ周波数 9. 20656GHz

BS 右旋帯域の最小周波数と最大周波数と MP-PAWR 周波数を選定した。

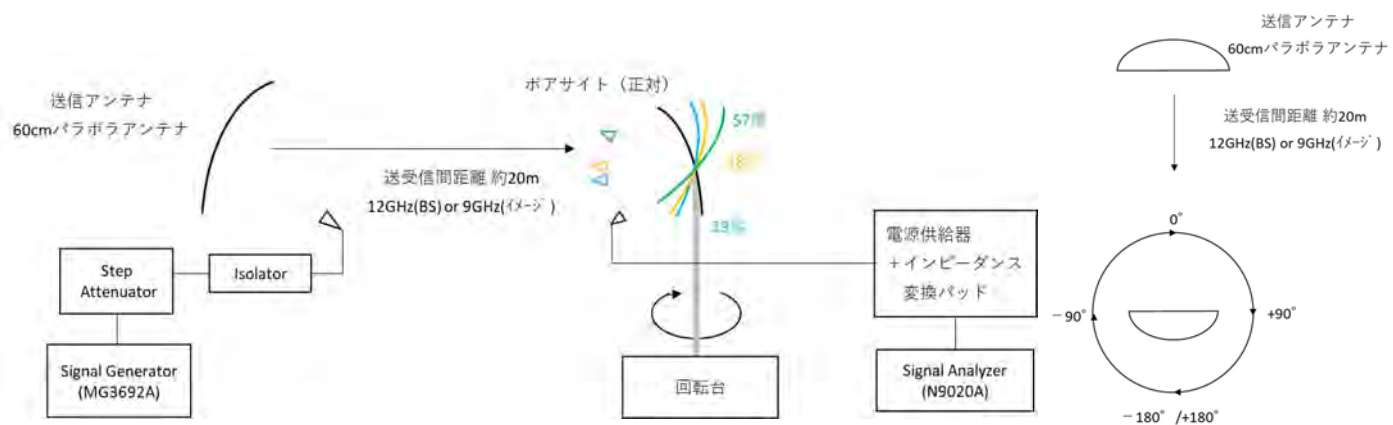
○アンテナ仰角：ボアサイト (正対)、仰角 29° (稚内)、 仰角 38° (東京)、仰角 57° (石垣)

最小仰角と最大仰角、最も受信世帯密集地域である東京を選定した。

○送信偏波：垂直偏波 (60cm パラボラアンテナを使用)

<測定方法>

- ① 被測定物の仰角をボアサイト (正対) にする。
- ② 送信アンテナから 12GHz 帯 (BS) の搬送波を送信し、BS 受信アンテナを AZ 方向に回転させながら、受信レベル P_0 を測定する。
- ③ 12GHz 帯 (BS) の測定周波数を変更し、②を測定する。
- ④ 送信アンテナから 9GHz 帯 (イメージ) の搬送波を送信し、BS 受信アンテナを AZ 方向に回転させながら、受信レベル P を測定する。
- ⑤ 9GHz 帯 (イメージ) の測定周波数を変更し、④を測定する。
- ⑥ イメージ妨害抑圧比を次式によって算出する。 イメージ妨害抑圧比 = $P_0 - P$
- ⑦ 被測定物の仰角を変更し、②~⑥を測定する。



アンテナを横から見た図

アンテナを上から見た図

図 4. 3 - 2 測定系統図

4. 3. 1. 3 測定結果

各測定周波数、仰角ごとの測定結果を図4. 3-3～図4. 3-14に示す。

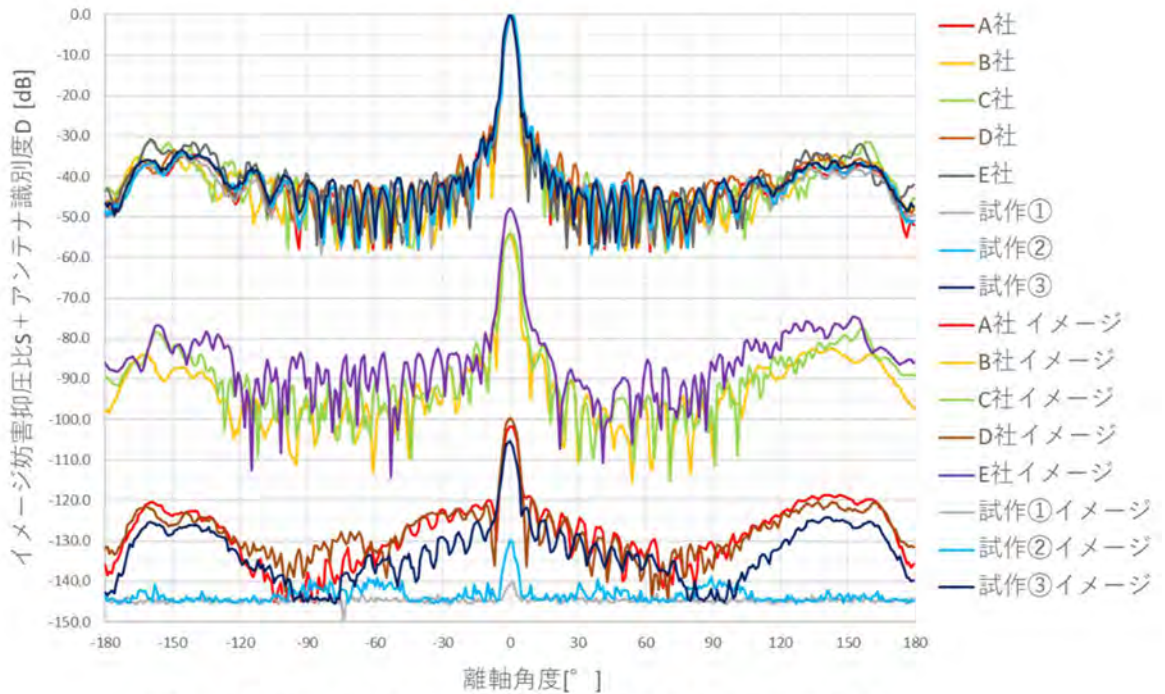


図4. 3-3 仰角ポアサイトの水平面パターン (BS-1ch)

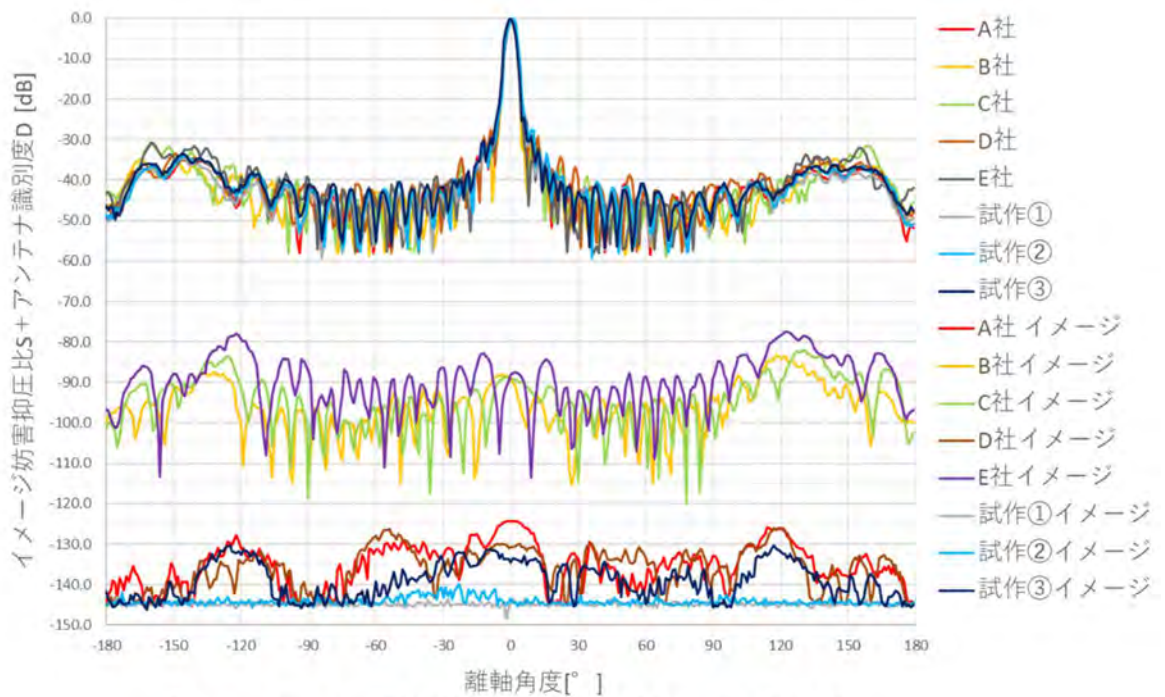


図4. 3-4 仰角 29° の水平面パターン (BS-1ch)

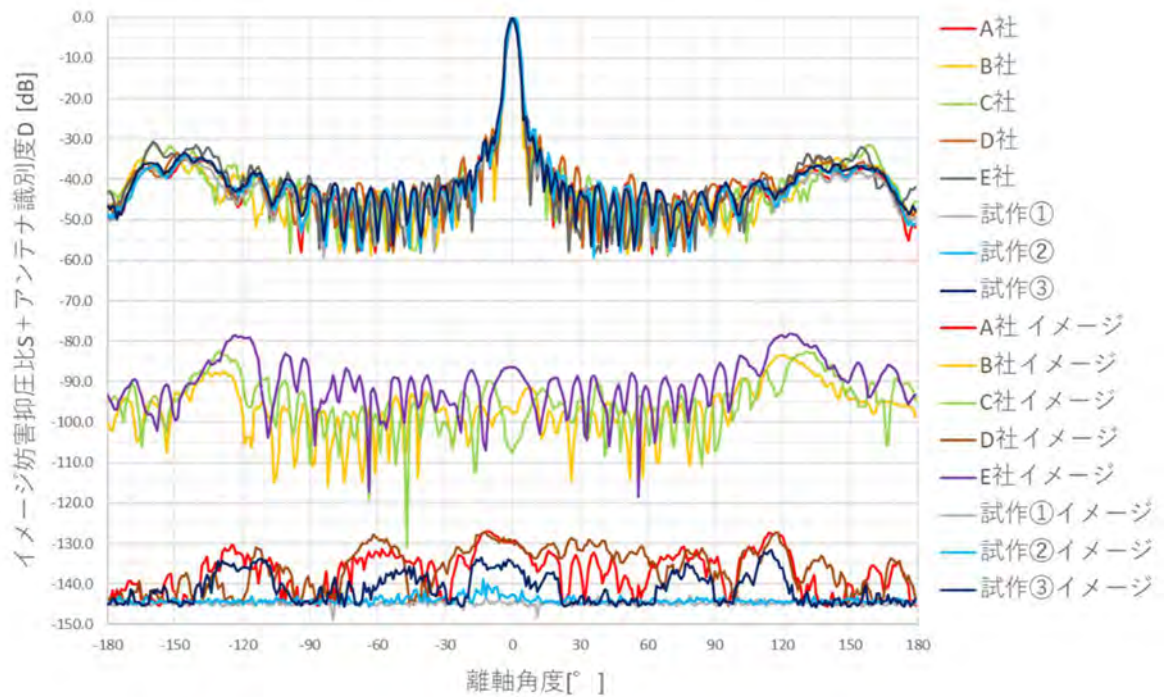


図 4. 3-5 仰角 38° の水平面パターン (BS-1ch)

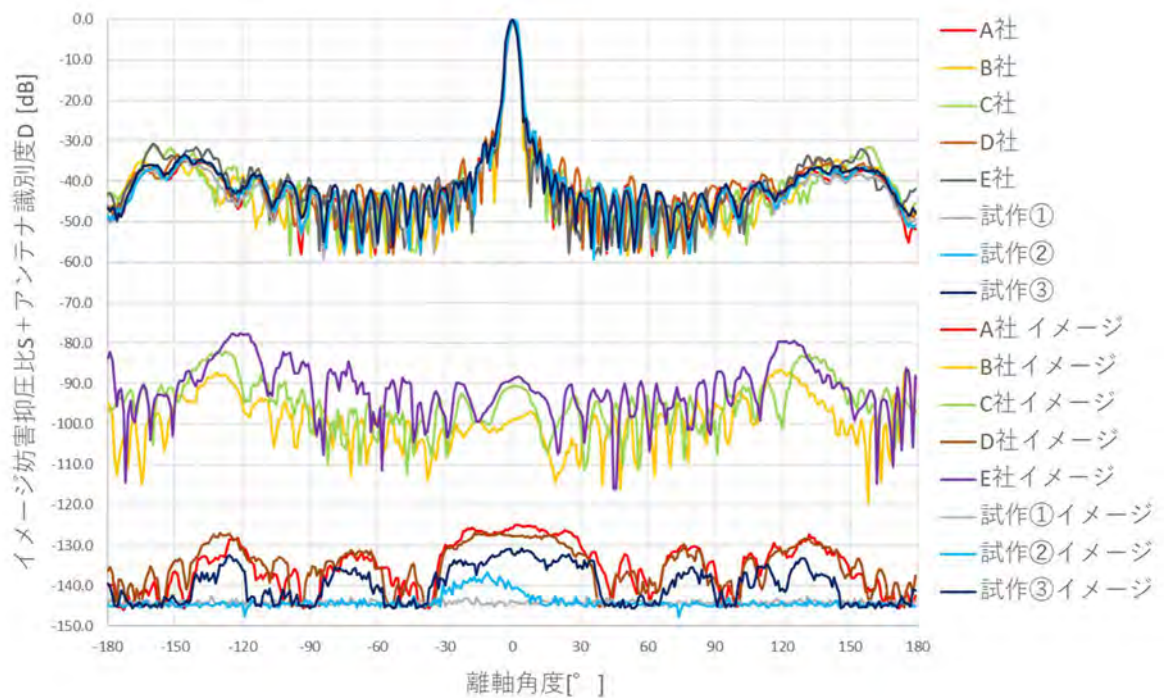


図 4. 3-6 仰角 57° の水平面パターン (BS-1ch)

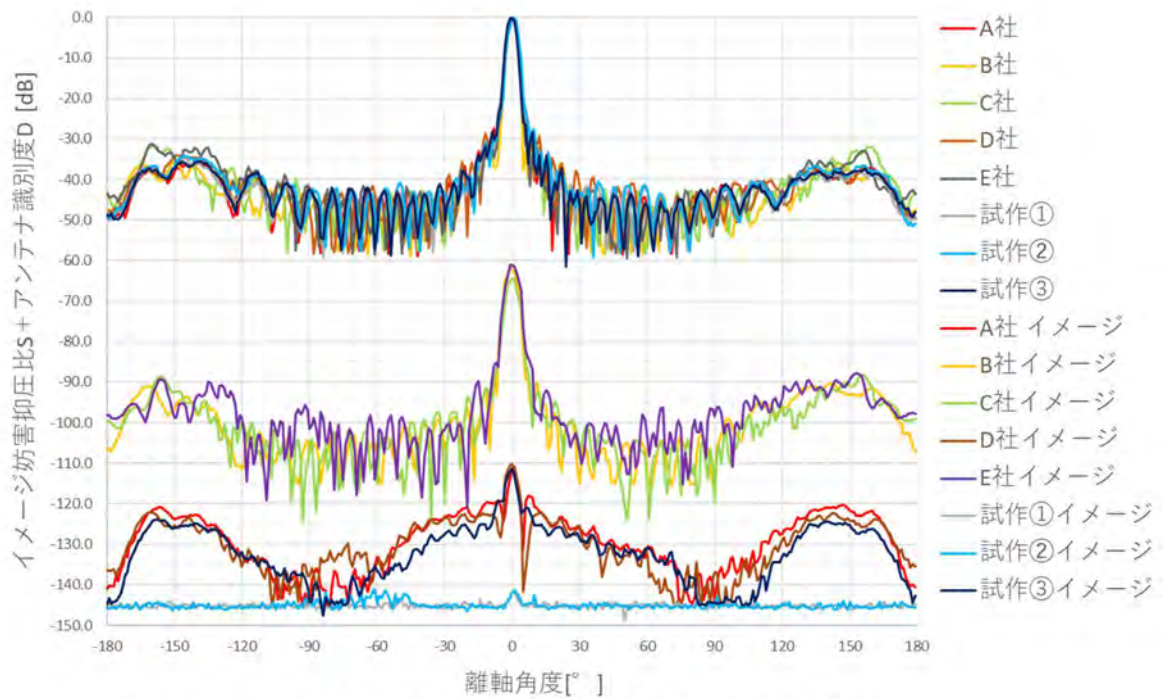


図 4. 3-7 仰角ポアサイトの水平面パターン (BS-11ch)

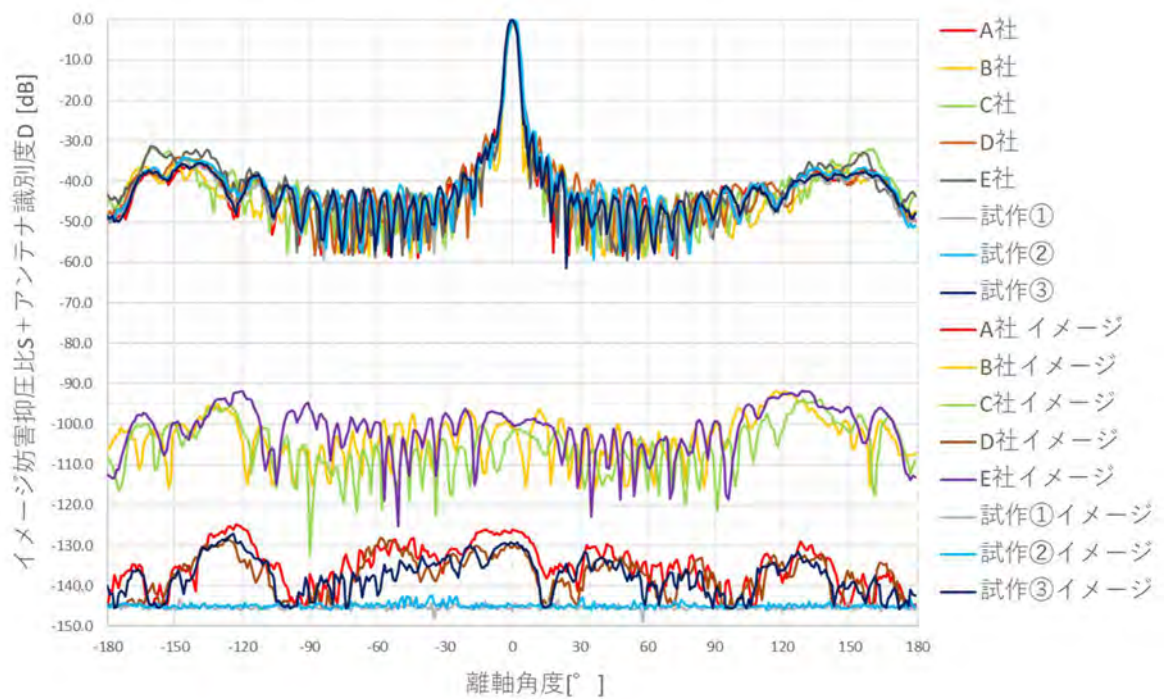


図 4. 3-8 仰角 29° の水平面パターン (BS-11ch)

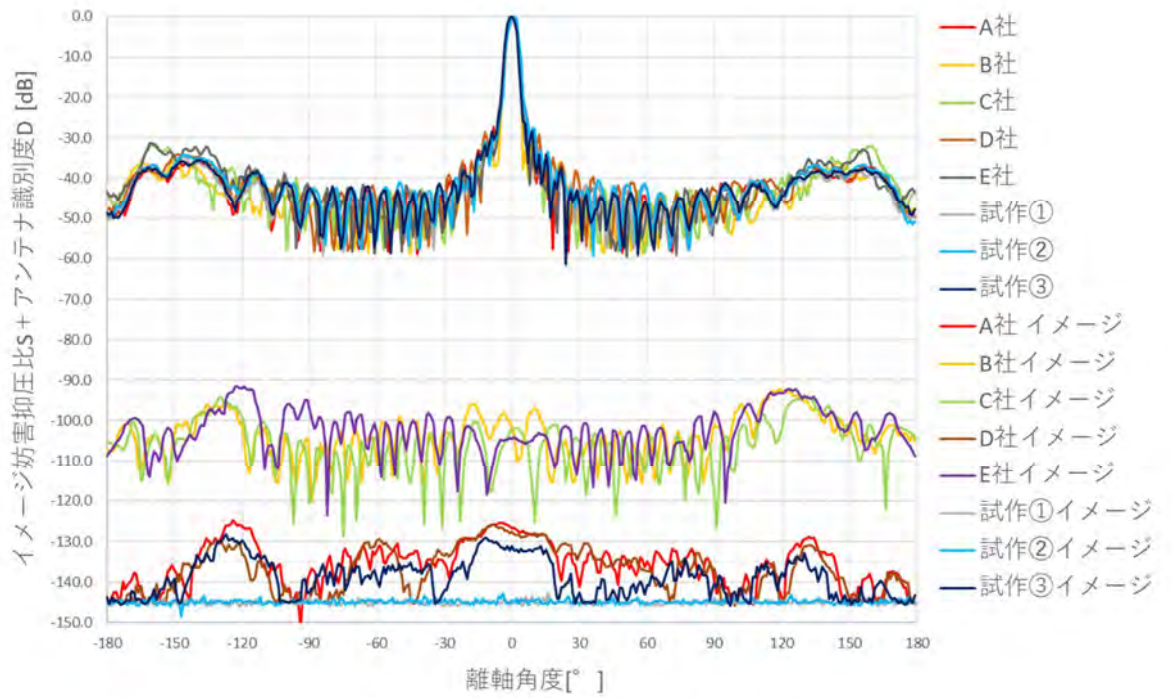


図 4. 3-9 仰角 38° の水平面パターン (BS-11ch)

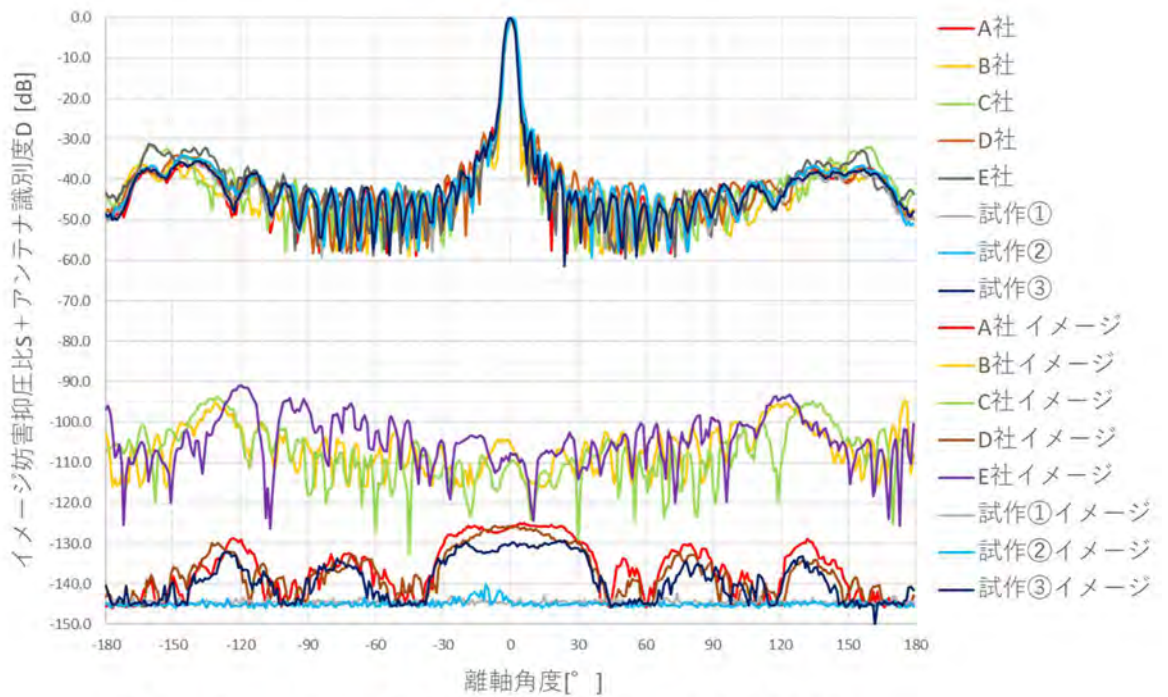


図 4. 3-10 仰角 57° の水平面パターン (BS-11ch)

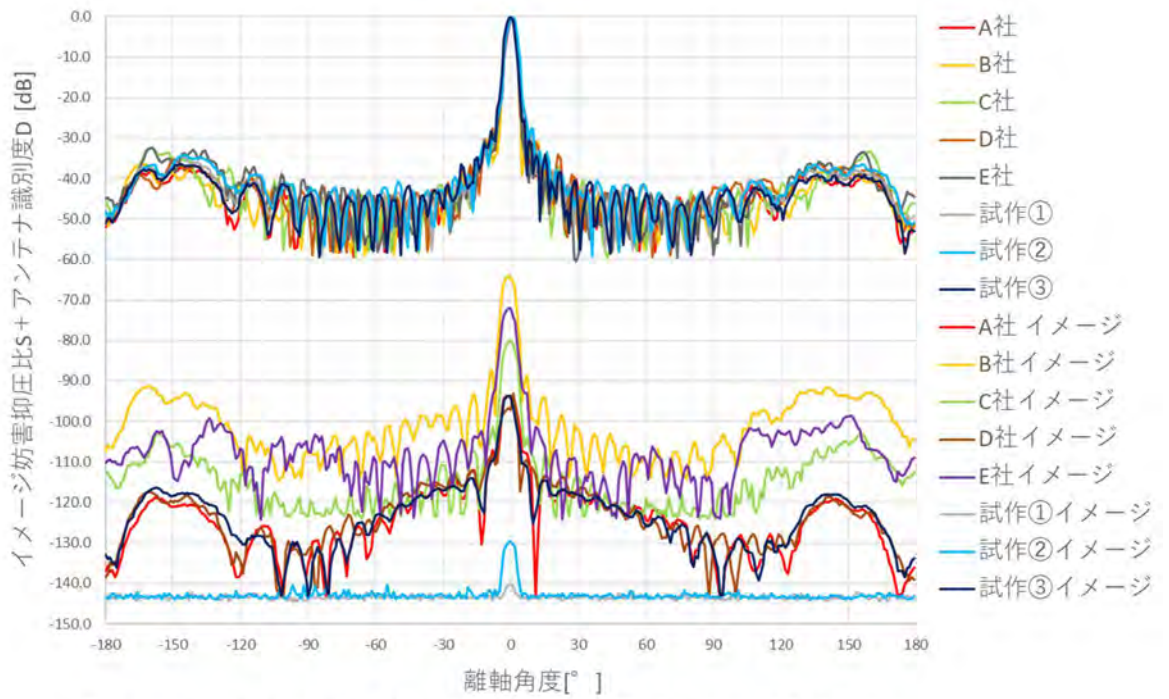


図 4. 3 - 1 1 仰角ポアサイトの水平面パターン (BS-23ch)

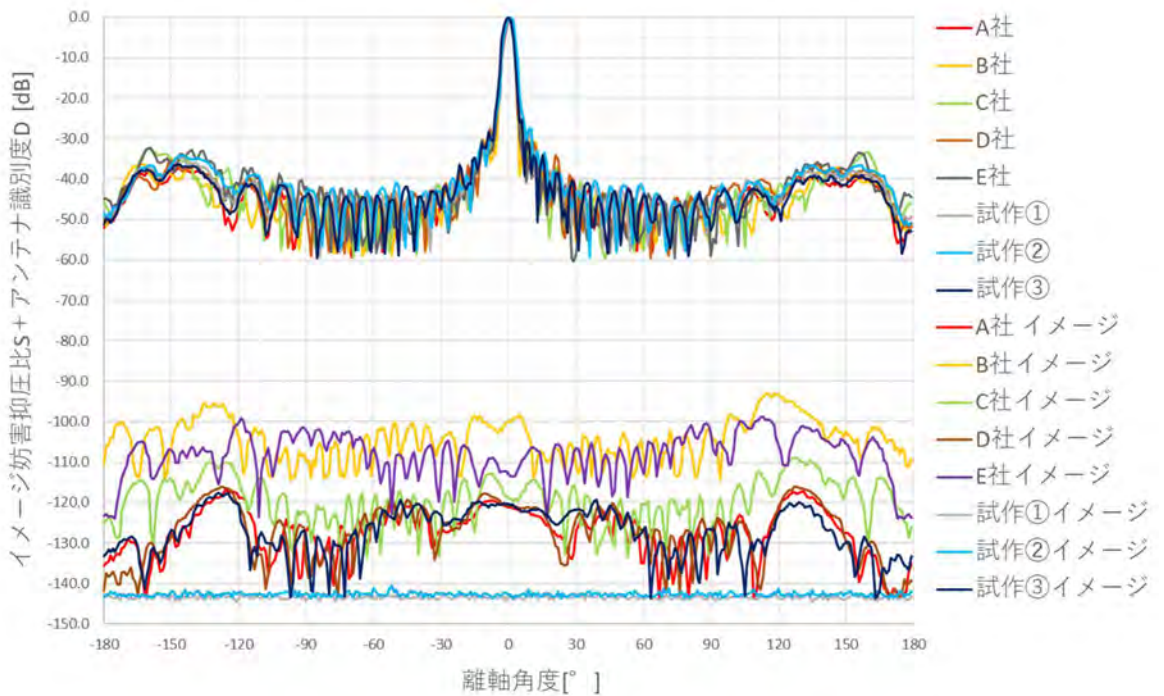


図 4. 3 - 1 2 仰角 29° の水平面パターン (BS-23ch)

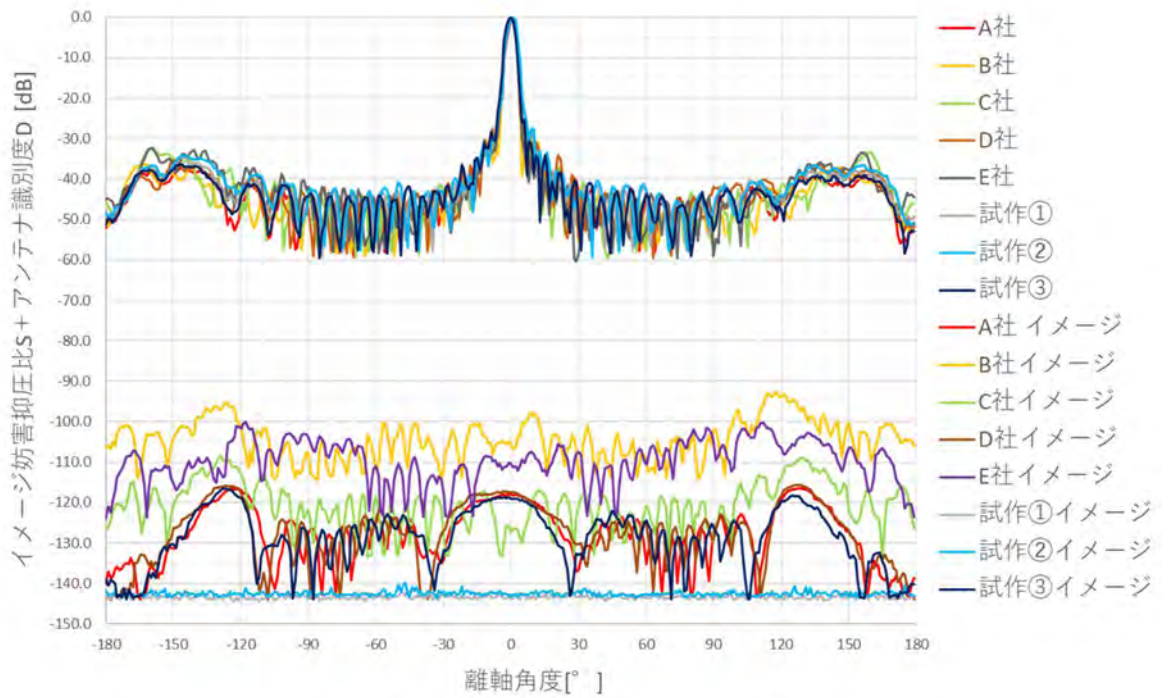


図4. 3-13 仰角 38° の水平面パターン (BS-23ch)

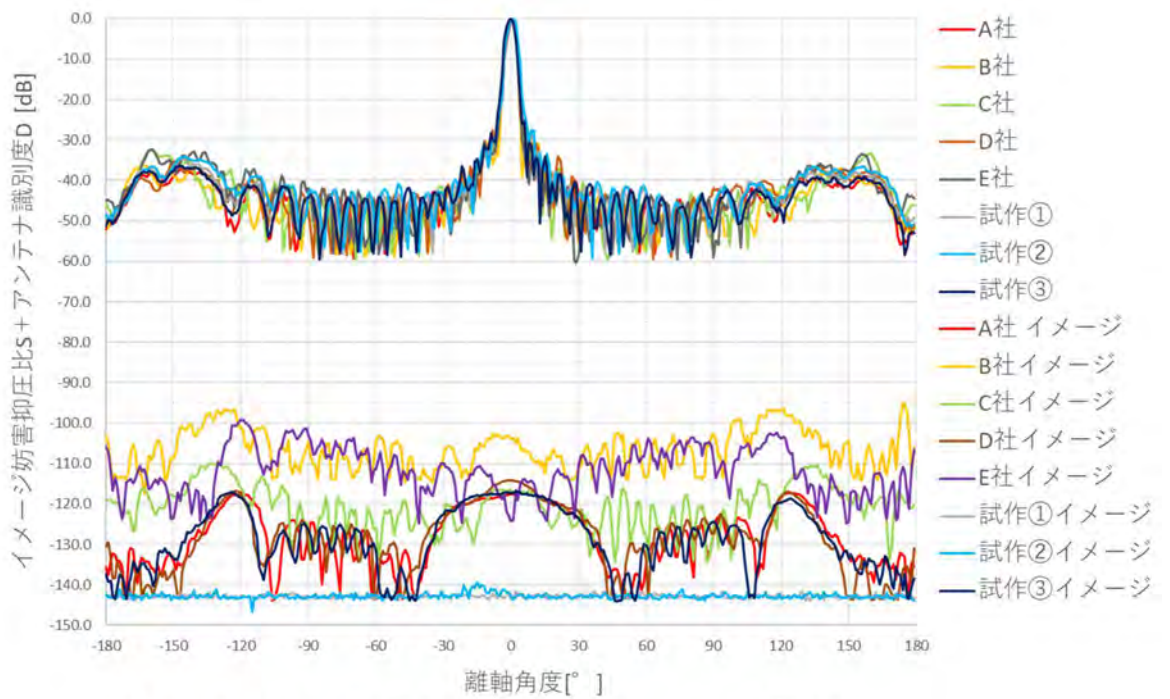


図4. 3-14 仰角 57° の水平面パターン (BS-23ch)

4. 3. 2 屋外測定

4. 3. 2. 1 概要

放送関係者の協力の下、埼玉大学にて屋外実験(2023年1月30日~2月1日)を行った。使用したBS受信アンテナは電波暗室で測定したA社、B社、C社、E社、試作品①~③のアンテナである。BS受信アンテナは理学部3号館屋上に設置してBS放送を受信し、工学部3号館屋上設置のMP-PAWRから9GHz帯レーダー信号を送信した。屋外試験の環境を図4. 3-15及び図4. 3-16に示す。

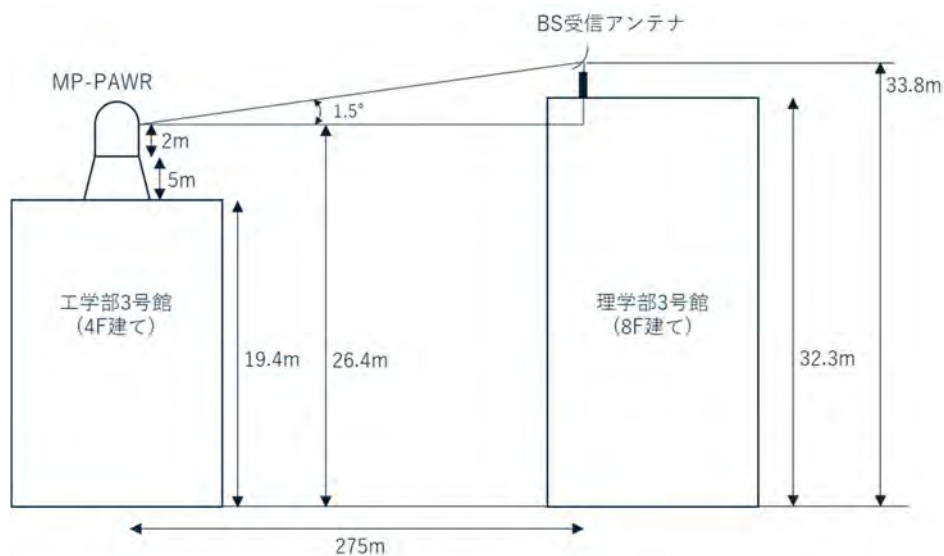


図4. 3-15 埼玉大学屋外試験

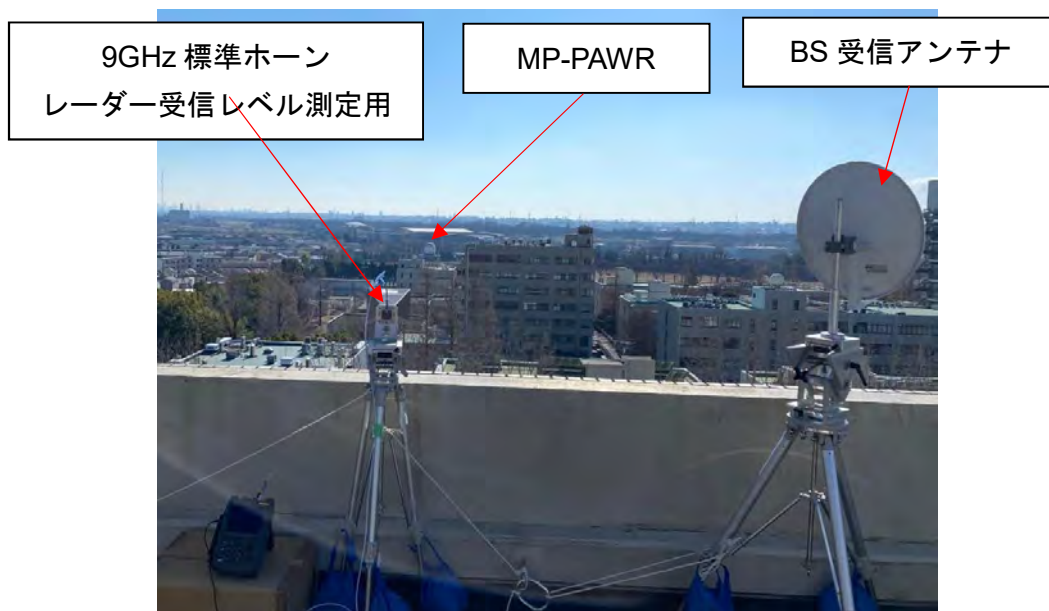


図4. 3-16 受信地点からみたMP-PAWRの見通し

4. 3. 2. 2 測定機材の諸元

試験に使用した MP-PAWR 信号、受信アンテナ及び BS 放送信号の諸元を表 4. 3-2～表 4. 3-5 に示す。

表 4. 3-2 MP-PAWR 信号諸元

項目	諸元等	備考
中心周波数	9,425MHz	—
送信電力(Peak)	36.8dBW	H: 2400W V: 2400W
アンテナ利得	29.6dBi	—
EIRP	66.4dBW	指定のない限り H/V 同時送信
送信ビーム幅	方位: 1.2° 仰角: ファンビーム	—
アンテナ回転速度	停止(理学部 3 号館方向)	—
PRF	1,533Hz	—
変調形式	長: QON 短: PON	—
パルス幅(デューティー)	長 32 μ s(4.91%) 短: 1 μ s(0.153%)	—
チャープ信号掃引帯域幅	1.63MHz	—

表 4. 3-3 BS 受信アンテナ諸元(市場流通品)

項目	A 社	B 社	C 社	E 社
チャンネル番号	BS-11ch			
RF 周波数(中心)	11.91928GHz			
波長	0.025m			
局発周波数	10.678GHz			
IF 周波数(中心)	1241.28MHz			
偏波	右旋円偏波			
アンテナ開口率	0.45m			
アンテナ利得(標準値)	33.8dBi	33.9dBi	34.0dBi	33.8dBi
受信 C/N(BS-11ch)	20.0dB	18.4dB	18.7dB	19.7dB
備考	—	—	—	—

表 4. 3-4 BS 受信アンテナ諸元(試作品)

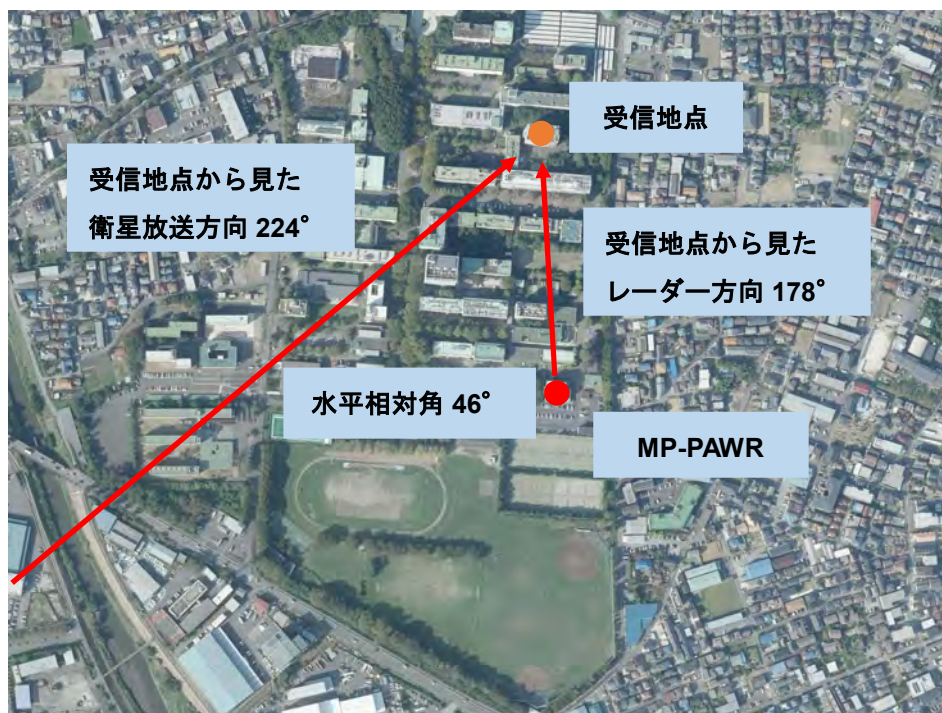
項目	試作品①	試作品②	試作品③
チャンネル番号	BS-11ch		
RF 周波数(中心)	11.91928GHz		
波長	0.025m		
局発周波数	10.678GHz		
IF 周波数(中心)	1241.28MHz		
偏波	右旋円偏波		
アンテナ開口率	0.45m		
アンテナ利得(標準値)	33.8dBi	33.9dBi	34.0dBi
受信 C/N(BS-11ch)	20.6dB	19.9dB	20.8dB
備考	—	—	—

表 4. 3-5 BS 放送信号諸元

項目	諸元等
伝送方式	ISDB-S
シンボルレート	28.86Mbaud
ロールオフ率	0.35
占有帯域幅	34.5MHz
変調方式	Trellis coded 8PSK
誤り訂正方式	畳込み符号+Reed Solomon 符号
所要 C/N	10.7dB

4. 3. 2. 3 位置関係

受信地点から見た MP-PAWR と衛星方向の水平相対角は 46° である(図 4. 3-17 参照)。



下記 URL の画像を加工

<https://mapps.gsi.go.jp/contentsImageDisplay.do?specificationId=1855782&isDetail=true>

図 4. 3-17 位置関係

4. 3. 2. 4 画像破綻 Cave/Ipeak 測定

MP-PAWR による干渉波により BS 受信画像が破綻する Cave/Ipeak 値を測定した。測定系統図を図 4. 3-18 に示す。BS 信号においては電波伝搬経路によるレベル変動の影響を避けるため、予め BS 放送を受信して記録した BS キャプチャー信号を使用した。

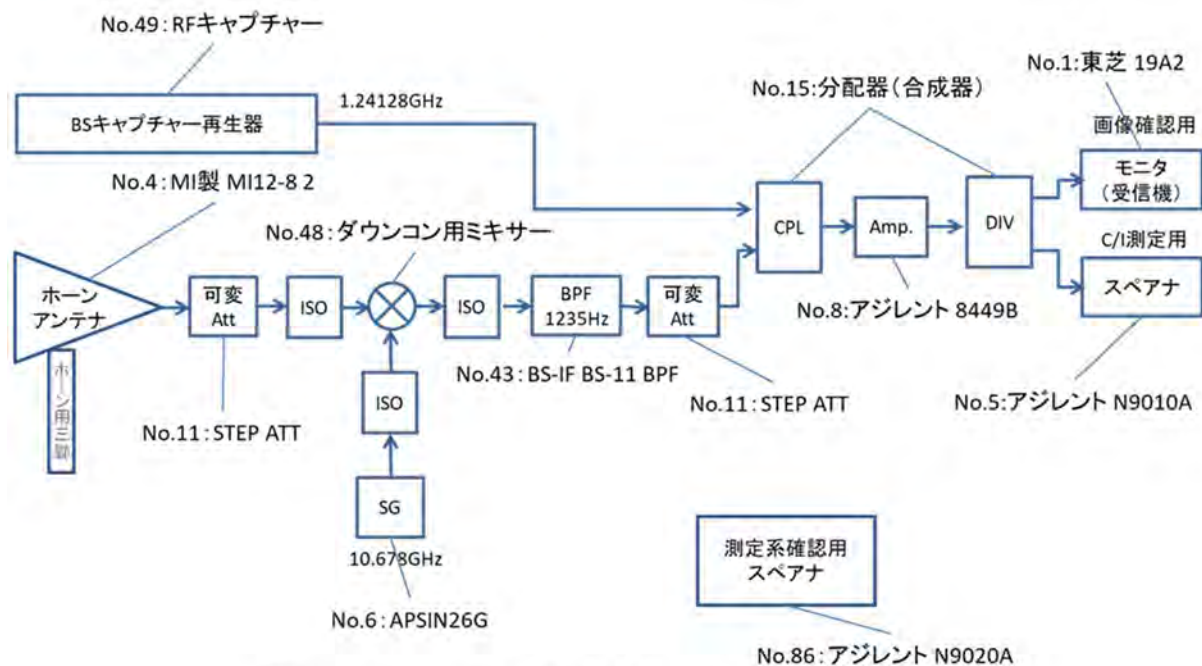


図4. 3-18 画像破綻 Cave/Ipeak 測定系統

画像破綻を評価する放送番組は放送大学(BS231)を使用した。測定結果を表4. 3-6に示す。Cave/Ipeakが12.6dBの場合、図4. 3-18に示すように画像破綻(ブラックアウト)となった。画像が良好となったのはCave/Ipeakが13.6dBであり、この値を画像破綻Cave/Ipeakと呼ぶ。

表4. 3-6 画像破綻 Cave/Ipeak 測定結果

C (dBm)	-32.9	-32.9	-32.9	-32.9
I (dBm)	-48.5	-47.5	-46.5	-45.5
Cave/Ipeak (dB)	15.6	14.6	13.6	12.6
画像	良好	良好	良好	破綻 (ブラックアウト)



図4. 3-19 画像破綻時の測定画像

4. 3. 2. 5 干渉試験によるBS受信画像測定

BS受信アンテナを放送衛星BSAT-4aに指向させてBS-11chを受信した状態で、MP-PAWRからレーダー信号を送信し、画像破綻の有無を確認する。測定系統を図4. 3-20に示す。

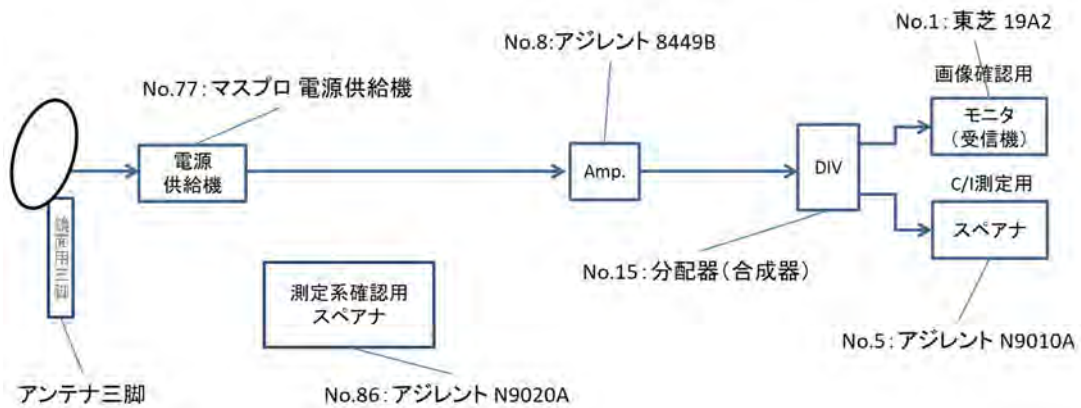


図4. 3-20 干渉試験によるBS受信画像測定系統

MP-PAWR信号による干渉試験のBS受信画像結果を表4. 3-7に示す。A社と試作①～③は画像破綻が起きなかったが、B社、C社、E社は瞬時に破綻(ブラックアウト)した。

表4. 3-7 MP-PAWR信号による干渉試験のBS受信画像測定結果

	A社	B社	C社	E社	試作①	試作②	試作③
測定結果	良好	破綻	破綻	破綻	良好	良好	良好



図4. 3-2-1 BS受信画像破綻時のブラックアウト画像とスペアナの観測波形例

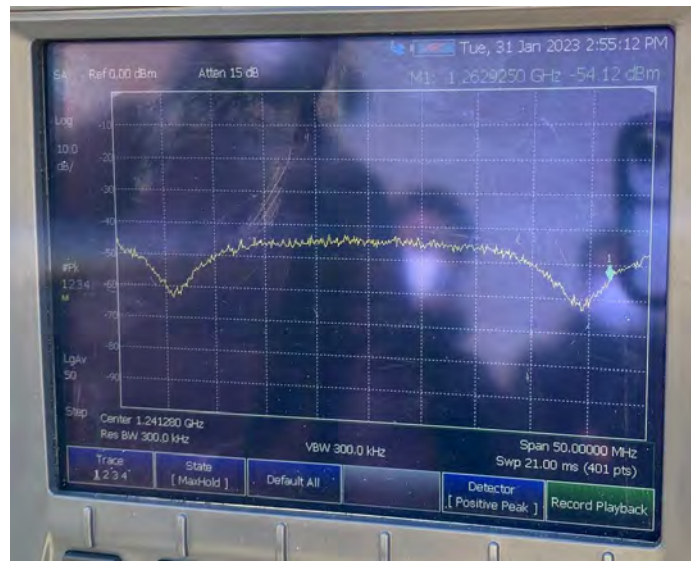
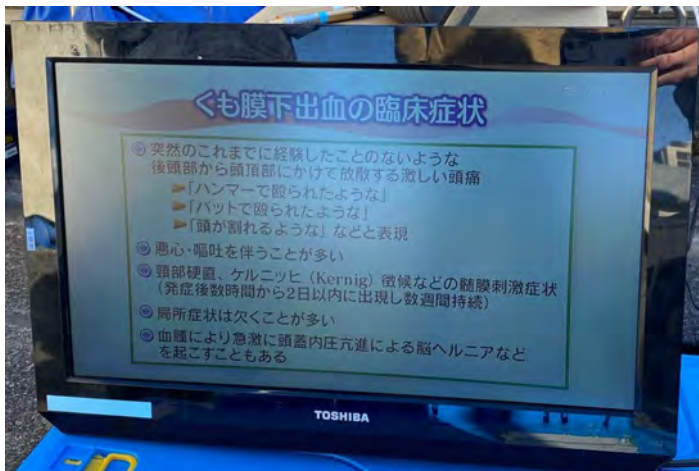


図4. 3-2-2 BS受信画像良好時の受信画像とスペアナの観測波形例

4. 4 まとめ

4. 4. 1 共用条件の整理

4. 4. 1. 1 所要離隔距離の計算

昨年度検討された所要離隔距離の計算方法を用いて、今年度測定したイメージ妨害抑圧比S+アンテナ識別度Dの各測定値から、所要離隔距離を計算する。以下に計算条件、計算方法を示す。

<計算条件>

○計算周波数：

- ・BS-1ch 11.72748GHz、イメージ周波数 9.62852GHz
- ・BS-11ch 11.931GHz、イメージ周波数 9.425GHz（レーダー周波数）
- ・BS-23ch 12.14944GHz、イメージ周波数 9.20656GHz

BS 右旋帯域の最小周波数と最大周波数と MP-PAWR 周波数を選定した。

○アンテナ仰角：仰角 29°（稚内）、仰角 38°（東京）、仰角 57°（石垣）

最小仰角と最大仰角、最も受信世帯密集地域である東京を選定した。

○各種計算パラメータ

所要離隔距離を計算する為に必要なパラメータを表 4. 4-1 に示す。

表 4. 4-1 所要離隔計算パラメータ

項目	値	備考
BS 受信 PFD (dBW/m ² /34.5MHz)	稚内：-104.3	東京：-102.6 石垣：-104.3
画像破綻 Cave/Ipeak (dB)	13.5	21 年度に埼玉大学屋外試験で測定した画像破綻 Cave/Ipeak を使用
M：マージン (dB) ※	12.2	ITU-R S.1432 から引用
S：イメージ妨害抑圧比 (dB) +D：アンテナ識別度 (dB)	117.1	A 社アンテナを稚内に設置した BS-23ch の例
レーダーEIRP (dBW)	66.4	MP-PAWR 信号諸元より

※降雨減衰による劣化に対するマージン

<計算方法>

① 気象レーダーから BS/CS 放送受信設備への許容干渉 PFD I_r は以下の式で表される。

$$PFD I_r = BS \text{ 受信 PFD} - \text{画像破綻 Cave/Ipeak} - M + S + D$$

② 気象レーダーPFD PAWR は、以下の式で表される。

$$PFD PAWR = \text{レーダーEIRP} - 10 \log (4 \pi R^2)$$

③ PFD Ir と PFD PAWR が同じ値になる距離が、R : 所要離隔距離となる。

4. 4. 1. 2 所要離隔距離の計算結果

各アンテナの所要離隔距離の最悪値を表 4. 4-2 に示す。

表 4. 4-2 各アンテナの所要離隔距離計算結果

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	2,602.5	638.8
	B 社 (BS-1 稚内)	83.2	129,120.5	31,695.3
	C 社 (BS-1 稚内)	82.1	147026.3	36,090.7
	D 社 (BS-23 石垣)	114.2	3,634.1	892.1
右旋アンテナ (2014~2016 年品)	E 社 (BS-1 稚内)	77.5	248,825.6	61,079.4
試作品	① (BS-23 石垣)	141.5	156.8	38.5
	② (BS-1 石垣)	136.7	271.0	66.5
	③ (BS-23 石垣)	117.0	2,632.7	646.2

○試作①が 156.8m、②が 271.0m の所要離隔距離となった。

○試作③が 2632.7m、A 社が 2602.5m でほぼ同等の所要離隔距離となった。

(1) BS-1ch 各仰角での計算結果 (S+D は水平面パターンの最小値 (最悪値))

表 4. 4-3 仰角 29° (稚内) の所要離隔距離 (BS-1ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
A 社 (離軸角度-2°)	124.3	101.8	22.6	1135.4	278.7
B 社 (離軸角度+118°)	83.2	54.2	28.9	129,120.5	31,695.3
C 社 (離軸角度+130°)	82.1	53.9	28.2	147,026.3	36,090.7
D 社 (離軸角度+117°)	126.1	99.7	26.5	922.6	226.5
E 社 (離軸角度+123°)	77.5	48.0	29.5	248,825.6	61,079.4
試作① (離軸角度-175°)	142.9	140.0	3.0	132.9	32.6
試作② (離軸角度-23°)	139.8	129.7	10.1	190.6	46.8
試作③ (離軸角度+117°)	130.3	105.5	24.9	566.6	139.1

表 4. 4-4 仰角 38° (東京)の所要離隔距離 (BS-1ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
A社(離軸角度-11°)	126.9	101.8	25.1	697.7	171.3
B社(離軸角度+120°)	83.5	54.2	29.2	10,3073.0	25,301.4
C社(離軸角度-130°)	82.4	53.9	28.6	115,889.8	28,447.6
D社(離軸角度-12°)	127.2	99.7	27.6	669.0	164.2
E社(離軸角度+123°)	78.1	48.0	30.1	191,115.1	46,913.2
試作①(離軸角度+79°)	142.9	140.0	2.9	110.0	27.0
試作②(離軸角度-13°)	138.9	129.7	9.2	175.2	43.0
試作③(離軸角度+115°)	131.5	105.5	26.0	409.2	100.4

表 4. 4-5 仰角 57° (石垣)の所要離隔距離 (BS-1ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
A社(離軸角度+3°)	124.9	101.8	23.2	1,054.6	258.9
B社(離軸角度+175°)	86.5	54.2	32.2	87,992.4	21,599.6
C社(離軸角度-131°)	82.0	53.9	28.1	14,7858.1	36,294.9
D社(離軸角度-12°)	126.8	99.7	27.1	855.1	209.9
E社(離軸角度-121°)	77.5	48.0	29.6	24,7739.4	60,812.8
試作①(離軸角度-134°)	142.6	140.0	2.6	138.2	33.9
試作②(離軸角度-11°)	136.7	129.7	7.1	271.0	66.5
試作③(離軸角度+4°)	130.7	105.5	25.2	543.9	133.5

(2) BS-11ch(レーダー周波数) 各仰角での計算結果

(S+D は水平面パターンの最小値 (最悪値))

表 4. 4-6 仰角 29° (稚内) の所要離隔距離 (BS-11ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離 [m] マージン有	離隔距離 [m] マージン無
A 社 (離軸角度- 123°)	124.8	110.9	13.9	1,072.0	263.3
B 社 (離軸角度+118°)	91.9	62.0	29.9	47,380.0	11,625.0
C 社 (離軸角度+129°)	93.9	64.4	29.4	37,600.0	9,234.1
D 社 (離軸角度- 127°)	128.1	110.2	17.8	733.5	180.1
E 社 (離軸角度+129°)	91.8	61.0	30.8	47,900.0	11,759.7
試作①(離軸角度- 45°)	143.1	141.5	1.6	130.5	32.0
試作②(離軸角度- 36°)	142.2	140.9	1.2	146.4	35.9
試作③(離軸角度- 124°)	127.0	111.4	15.6	833.0	204.4

表 4. 4-7 仰角 38° (東京) の所要離隔距離 (BS-11ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離 [m] マージン有	離隔距離 [m] マージン無
A 社 (離軸角度- 124°)	124.9	110.9	14.0	874.0	214.5
B 社 (離軸角度+119°)	92.1	62.0	30.1	38,150.0	9,362.6
C 社 (離軸角度+130°)	94.1	64.4	29.7	30,500.0	7,437.0
D 社 (離軸角度- 9°)	125.8	110.2	15.6	787.8	193.4
E 社 (離軸角度- 119°)	91.5	61.0	30.5	40,869.1	10,032.2
試作①(離軸角度+16°)	142.7	141.5	1.3	112.6	27.6
試作②(離軸角度- 4°)	142.8	140.9	1.9	111.3	27.3
試作③(離軸角度- 127°)	128.2	111.4	16.8	597.6	146.7

表 4. 4-8 仰角 57° (石垣) の所要離隔距離 (BS-11ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
A社(離軸角度+6°)	125.0	110.9	14.1	1,048.1	257.3
B社(離軸角度+175°)	94.7	62.0	32.8	34,308.0	8,421.6
C社(離軸角度-130°)	93.9	64.4	29.5	37,617.9	9,234.1
D社(離軸角度-1°)	125.7	110.2	15.5	966.9	237.4
E社(離軸角度-120°)	91.0	61.0	30.0	52,528.5	12,894.2
試作①(離軸角度+74°)	142.4	141.5	0.9	141.4	34.7
試作②(離軸角度+11°)	140.0	140.9	0.9	186.4	45.8
試作③(離軸角度+24°)	129.2	111.4	17.8	646.2	158.6

(3) BS-23ch 各仰角での計算結果 (S+D は水平面パターンの最小値 (最悪値))

表 4. 4-9 仰角 29° (稚内) の所要離隔距離 (BS-23ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
A社(離軸角度-126°)	117.1	93.7	23.4	2,602.5	638.8
B社(離軸角度+115°)	93.0	64.0	29.0	41,725.0	10,242.3
C社(離軸角度+127°)	108.9	80.1	28.8	6,689.5	1,642.1
D社(離軸角度-127°)	116.1	93.1	23.0	2,920.1	716.8
E社(離軸角度+113°)	98.8	72.0	26.7	21,399.9	5,252.9
試作①(離軸角度+8°)	141.8	140.2	1.6	151.5	37.2
試作②(離軸角度-52°)	140.4	129.8	10.7	178.0	43.7
試作③(離軸角度-125°)	117.6	93.8	23.8	2,456.9	603.1

表 4. 4-10 仰角 38° (東京)の所要離隔距離 (BS-23ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
A社(離軸角度-104°)	116.3	93.7	22.7	2,351.8	577.3
B社(離軸角度+117°)	92.9	64.0	28.9	34,785.4	8,528.8
C社(離軸角度-129°)	108.5	80.1	28.5	5,772.9	1417.1
D社(離軸角度+127°)	115.7	93.1	22.6	2,520.0	618.6
E社(離軸角度-118°)	100.0	72.0	28.0	15,360.1	3,770.5
試作①(離軸角度+46°)	141.7	140.2	1.5	126.3	31.0
試作②(離軸角度-47°)	139.9	129.8	10.1	155.4	38.1
試作③(離軸角度-128°)	116.5	93.8	22.7	2,298.2	564.1

表 4. 4-11 仰角 57° (石垣)の所要離隔距離 (BS-23ch)

	S+D[dB]	S[dB]	D[dB]	離隔距離[m] マージン有	離隔距離[m] マージン無
A社(離軸角度-120°)	117.2	93.7	23.6	2,572.7	631.5
B社(離軸角度+174°)	95.2	64.0	31.2	32,388.8	7,950.5
C社(離軸角度-130°)	109.4	80.1	29.3	6,315.3	1,550.2
D社(離軸角度-1°)	114.2	93.1	21.0	3,634.1	892.1
E社(離軸角度-119°)	99.1	72.0	27.1	20,672.5	5,074.5
試作①(離軸角度+37°)	141.5	140.2	1.3	156.8	38.5
試作②(離軸角度-15°)	139.5	129.8	9.8	197.5	48.5
試作③(離軸角度+2°)	117.0	93.8	23.2	2,632.7	646.2

4. 4. 1. 3 対策案と課題

今回の調査検討により分かった、各試作品の課題

試作① 所要離隔距離 156.8m

課題（１）新たなイメージ帯域の発生

課題（２）雑音指数（NF）の劣化

試作② 所要離隔距離 271.0m

課題（２）雑音指数（NF）の劣化

試作③ 所要離隔距離 2,632.7m

課題（３）イメージ妨害抑圧比 100dB 未達成

課題に対する詳細説明と対応検討

課題（１）新たなイメージ帯域の発生

ハイローカルを追加した為、新たに 15.056~16.106GHz にイメージ帯域が発生する。16GHz の干渉波を想定し、イメージ妨害抑圧比 S+アンテナ識別度 D を測定したところ、アンテナ仰角 38° で 107.6dB であった。

これは、今回の気象レーダーと同じ EIRP の場合、所要離隔距離が 6403.9m 必要となり、新たな干渉問題が発生する可能性がある。

○対応策検討

新たなイメージ帯域の干渉を改善するためには、BPF の追加等の対策が必要となるため、雑音指数（NF）の更なる劣化が見込まれるため、ハイローカル（13.903GHz）による対策モデルの実用化は現実的では無いと考える。

課題（２）雑音指数（NF）の劣化

試作①の NF は 1.19dB、試作②の NF は 1.14dB であり、市場流通品の測定値に比べると、約 0.5dB 劣化している。試作①は、新たなイメージ帯域の発生により、実用化の見込みは低いため、試作②において回線設計を実施し、雑音指数（NF）劣化の影響度を確認した。回線設計結果を表 5.1-12 に示す。

回線設計は、ARIB STD B44 の設定条件で、NF1dB と市販品カタログ値の NF0.5dB も合わせて実施した。

表 4. 4-12 <回線設計結果>BS 放送受信の年間サービス時間率の計算

	NF [dB]	年間サービス 時間率[%]	最悪月サービス 時間率[%]	年間遮断 時間[分]	試作②の 遮断時間の増分 [分]	試作②の 遮断時間の増分 [%]
試作②	1.14	99.92	99.68	421	—	—
ARIB 規格の 計算例	1.00	99.93	99.70	393	28	7.12
市販品 カタログ値	0.50	99.94	99.75	315	106	33.65

○対応策検討

ハイローカルの追加、BPFの追加により、雑音指数(NF)劣化(BS放送受信の年間サービス時間率が劣化)するため、今後の課題として、雑音指数(NF)を維持しながら、イメージ妨害抑圧比を改善する必要がある。

課題(3) イメージ妨害抑圧比 100dB 未達成

一次放射器の円形導波管の設計変更により、イメージ妨害抑圧比の改善を図ったが、目標値の100dBを達成することが出来なかった。

○対応策検討

一次放射器の円形導波管の検討だけでは、イメージ妨害抑圧比の改善が不十分であった。イメージ妨害抑圧比を改善するためには、BPFの追加が現実的であると考える。

4. 4. 1. 4 対策対象台数について

(1) 全世帯を対象とした検討

現在のBS受信設備は、約1,689万台が設置(*7)されていると想定され、すべての受信設備機器を対策品に交換するには、巨大なコストが必要である。

(*7)2021年10月29日付 放送を巡る諸課題に関する検討会 衛星放送の未来像に関するワーキンググループ報告書内の「図表9 4K・8K 受信可能世帯数推計(直接受信)」から、個別受信1660万世帯=受信アンテナ1660万台と集合住宅1520万世帯から集合住宅1棟あたりの平均個数52戸(一般社団法人マンション管理業協会 令和4年マンション管理受託動向調査結果より)で除した約29万棟=約29万台の合計値

(2) MP-PAWR1台設置した場合の交換台数検討

MP-PAWRを1台設置した場合、E社から試作品①、②、③にそれぞれ交換した場合の交換台数を試算する。所要離隔距離の一番大きいE社にて計算を実施した。

<計算条件>

○日本面積：2,194 km²

○全国世帯数：55,830,000 世帯(令和2年国勢調査より引用)

<計算方法>

① 日本面積と全国世帯数から、世帯密度を算出する。

$$\text{世帯密度} [\text{世帯}/\text{km}^2] = \text{全国世帯数} [\text{世帯}] / \text{日本面積} [\text{km}^2]$$

② E社及び、試作品①、②、③の所要離隔距離の面積を算出する。

$$\text{所要離隔距離の面積 E社} [\text{km}^2] = \pi \times \text{所要離隔距離 E社}^2 [\text{km}]$$

③ E社から試作品①、②、③にそれぞれ交換した場合のアンテナ交換対象地域を算出する。

$$\text{アンテナ交換対象地域 E社} \Rightarrow \text{試作①} [\text{km}^2] = \text{所要離隔距離の面積 E社} [\text{km}^2] - \text{所要離隔距離の面積 試作①} [\text{km}^2]$$

④ アンテナ交換対象世帯数（交換台数）

$$\text{アンテナ交換対象世帯数 E社} \Rightarrow \text{試作①} [\text{世帯}] = \text{世帯密度} [\text{世帯}/\text{km}^2] \times \text{アンテナ交換対象地域 E社} \Rightarrow \text{試作①} [\text{km}^2] \times 0.5$$

※MP-PAWR とアンテナの位置関係や、地形・建物等による遮蔽により、対象地域においても干渉を受けない場合が半数あると想定し、補正係数を 0.5 とした。

上記計算方法より E社から各試作品に交換した場合の、MP-PAWR1 台設置した場合の交換対象台数を表 4.4-13 に示す。

表 4.4-13 MP-PAWR1 台設置した場合の交換対象世帯数

(交換台数) (E社から各試作品に交換)

	世帯密度 [世帯/ km ²]	所要離隔距離 [km]	所要離隔距離の 面積 [km ²]	アンテナ交換 対象地域 [km ²]	アンテナ交換世帯数 (交換台数) [世 帯]
E社	148	61.079	11,720.16	—	—
試作①		0.157	0.08	5,860.04	867,286
試作②		0.271	0.23	5,859.97	867,276
試作③		2.633	21.78	5,849.19	865,681

上記交換台数は、各世帯に 1 台 BS 放送受信設備が設置されていると仮定した場合の計算である。実際には、BS 放送受信設備が設置されていない世帯もあるため、今後、その割合も加味して交換台数の検討が必要である。

また、④アンテナ交換対象世帯数（交換台数）の計算においても、MP-PAWR とアンテナの位置関係や、地形・建物等による補正係数を 0.5 としたが、今後、実情に合った補正係数の検討が必要である。

4.4.1.5 その他（懸念事項）

今回の所要離隔検討により、試作①は、降雨減衰による劣化に対するマージンが無い場合は、所要離隔距離 38.5m という結果となった。しかし、実際に気象レーダーから 38.5m の場所に BS 放送受信設備を設置した場合、気象レーダー信号の過入力による伝送性能劣化の可能性があり、今後の検証課題であると考えられる。

4. 4. 2 まとめ

今回試作した、試作①、試作②は、9.4GHz帯 MP-PAWR と BS 放送受信設備の所要離隔距離が、試作①：156.8m、試作②：271m と 21 年度に報告した最大 65,373m を大幅に改善する結果となった。ただし、試作①は、新たなイメージ帯域の発生、試作①、②は、雑音指数（NF）劣化に伴う受信サービス時間率の劣化の課題が出た。試作①と②を比較すると、新たなイメージ帯域の発生が無い分、試作②の方が対策品に適していると考えられる。しかし、試作品①、②の対策は、理論的に雑音指数（NF）の劣化は避けられず、MP-PAWR からの干渉劣化は避けられないと言える。一方試作③は、所要離隔距離 2,632.7m で 65,373m よりは改善が見られたが、合わせて調査した市場流通品にも、所要離隔距離 2,602.5m の BS 受信アンテナがあった。

[参考]

参考 1 試作②（BPF 追加）の NF 値 1.14 の 回線設計例

表 1 BS 回線設計(16APSK(7/9) 受信点:東京 受信アンテナ径:45cm NF:1.14dB)

項目	単位	晴天時	降雨時
衛星 EIRP P_e	dBW	60.0	60.0
出力バックオフ B_o	dB	2.2	2.2
自由空間損失 L_f	dB	205.6	205.6
大気吸収減衰の合計	dB	0.1	3.9
大気減衰	dB	0.1	0.1

降雨減衰 L_r	dB	0.0	3.3
雲による減衰 L_c	dB	0.0	0.5
シンチレーション	dB	0.0	0.3
受信アンテナ口径 D	cm	45.0	45.0
受信アンテナ開口効率 η	%	70.0	70.0
受信アンテナ利得 G_r	dBi	33.5	33.5
ポインティング損失	dB	0.1	0.1
受信機入力 C	dBW	-112.3	-116.1
p. f. d.	dBW/m ²	-102.6	-102.6
ボルツマン定数 K	dB/Hz	-228.6	-228.6
アンテナ雑音温度	K	50.0	202.9
LNC雑音指数 N_F	dB	1.14	1.14
LNC雑音指数 N_F'	K	87.0	87.0
受信機雑音温度 T	K	137.0	290.0
受信機雑音温度 T'	dBK	21.4	24.6
性能指数 G/T	dB/K	12.1	8.9
受信帯域幅 B	MHz	33.7561	33.7561
受信帯域幅 B'	dB · Hz	75.3	75.3
雑音入力 N	dBW	-131.9	-128.7
交差偏波による干渉 C/I	dB	22.9	22.9
交差偏波 EIRP	dBW	60.0	60.0
衛星受信 (アップリンク) XPD	dB	30.0	30.0
衛星送信 (ダウンリンク) XPD	dB	30.0	30.0
受信アンテナ XPD	dB	25.0	25.0
ダウンリンク C/N	dB	19.7	12.6
隣接チャンネル干渉	dB	60.3	60.3
総合 $C/(N+I)$	dB	18.0	12.2
所要 C/N	dB	12.2	12.2
システムマージン	dB	5.8	0.0
年間サービス時間率	%	-	99.92
最悪月サービス時間率	%	-	99.68

参考 2 ARIB STD B44 回線設計例

表 2 BS 回線設計 (16APSK (7/9) 受信点: 東京 受信アンテナ径: 45cm N_F : 1.0dB)

項目	単位	晴天時	降雨時
衛星 EIRP P_e	dBW	60.0	60.0
出力バックオフ B_o	dB	2.2	2.2
自由空間損失 L_f	dB	205.6	205.6
大気吸収減衰の合計	dB	0.1	4.0
大気減衰	dB	0.1	0.1
降雨減衰 L_r	dB	0.0	3.4

雲による減衰 L_c	dB	0.0	0.5
シンチレーション	dB	0.0	0.3
受信アンテナ口径 D	cm	45.0	45.0
受信アンテナ開口効率 η	%	70.0	70.0
受信アンテナ利得 G_r	dBi	33.5	33.5
ポインティング損失	dB	0.1	0.1
受信機入力 C	dBW	-112.3	-116.2
p. f. d.	dBW/m ²	-102.6	-102.6
ボルツマン定数 K	dB/Hz	-228.6	-228.6
アンテナ雑音温度	K	50.0	206.7
LNC雑音指数 N_F	dB	1.0	1.0
LNC雑音指数 N_F'	K	75.1	75.1
受信機雑音温度 T	K	125.1	281.8
受信機雑音温度 T'	dBK	21.0	24.5
性能指数 G/T	dB/K	12.5	9.0
受信帯域幅 B	MHz	33.7561	33.7561
受信帯域幅 B'	dB · Hz	75.3	75.3
雑音入力 N	dBW	-132.3	-128.8
交差偏波による干渉 C/I	dB	22.9	22.9
交差偏波 $EIRP$	dBW	60.0	60.0
衛星受信 (アップリンク) XPD	dB	30.0	30.0
衛星送信 (ダウンリンク) XPD	dB	30.0	30.0
受信アンテナ XPD	dB	25.0	25.0
ダウンリンク C/N	dB	20.1	12.6
隣接チャンネル干渉	dB	60.3	60.3
総合 $C/(N+I)$	dB	18.2	12.2
所要 C/N	dB	12.2	12.2
システムマージン	dB	6.0	0.0
年間サービス時間率	%	-	99.93
最悪月サービス時間率	%	-	99.70

参考3 市販品 (2022年) のカタログNF値0.5の回線設計例

表3 BS回線設計(16APSK(7/9)) 受信点:東京 受信アンテナ径:45cm NF:0.5dB)

項目	単位	晴天時	降雨時
衛星 $EIRP$ P_e	dBW	60.0	60.0
出力バックオフ B_o	dB	2.2	2.2
自由空間損失 L_f	dB	205.6	205.6
大気吸収減衰の合計	dB	0.1	4.5
大気減衰	dB	0.1	0.1
降雨減衰 L_r	dB	0.0	3.8

雲による減衰 L_c	dB	0.0	0.6
シンチレーション	dB	0.0	0.4
受信アンテナ口径 D	cm	45.0	45.0
受信アンテナ開口効率 η	%	70.0	70.0
受信アンテナ利得 G_r	dBi	33.5	33.5
ポインティング損失	dB	0.1	0.1
受信機入力 C	dBW	-112.3	-116.7
p. f. d.	dBW/m ²	-102.6	-102.6
ボルツマン定数 K	dB/Hz	-228.6	-228.6
アンテナ雑音温度	K	50.0	219.1
LNC雑音指数 N_F	dB	0.5	0.5
LNC雑音指数 N_F'	K	35.4	35.4
受信機雑音温度 T	K	85.4	254.4
受信機雑音温度 T'	dBK	19.3	24.1
性能指数 G/T	dB/K	14.2	9.4
受信帯域幅 B	MHz	33.7561	33.7561
受信帯域幅 B'	dB · Hz	75.3	75.3
雑音入力 N	dBW	-134.0	-129.3
交差偏波による干渉 C/I	dB	22.9	22.9
交差偏波 $EIRP$	dBW	60.0	60.0
衛星受信 (アップリンク) XPD	dB	30.0	30.0
衛星送信 (ダウンリンク) XPD	dB	30.0	30.0
受信アンテナ XPD	dB	25.0	25.0
ダウンリンク C/N	dB	21.7	12.6
隣接チャンネル干渉	dB	60.3	60.3
総合 $C/(N+I)$	dB	19.2	12.2
所要 C/N	dB	12.2	12.2
システムマージン	dB	7.0	0.0
年間サービス時間率	%	-	99.94
最悪月サービス時間率	%	-	99.75

第5章 5GHz 帯気象レーダーと他の無線システムとの共用条件に係る検討

5. 1 5GHz 帯無線 LAN の利用状況

5GHz 帯気象レーダーは 5250MHz～5372.5MHz を用いるが、同じ 5GHz 帯には無線ローカルエリアネットワークが存在する。

図 5. 1-1 に日本の 5GHz 帯無線 LAN システムのチャネル割り当てとその代表的な共存システムを示す。5250MHz～5350MHz（本章では W53 という。）を利用する無線 LAN は C 帯気象レーダーと周波数が重なる。この W53 を用いる無線 LAN ではレーダーシステムとの共存のために動的周波数選択とそれに付随する送信電力制御（Transmit Power Control : TPC）という機能の具備が要求されている。

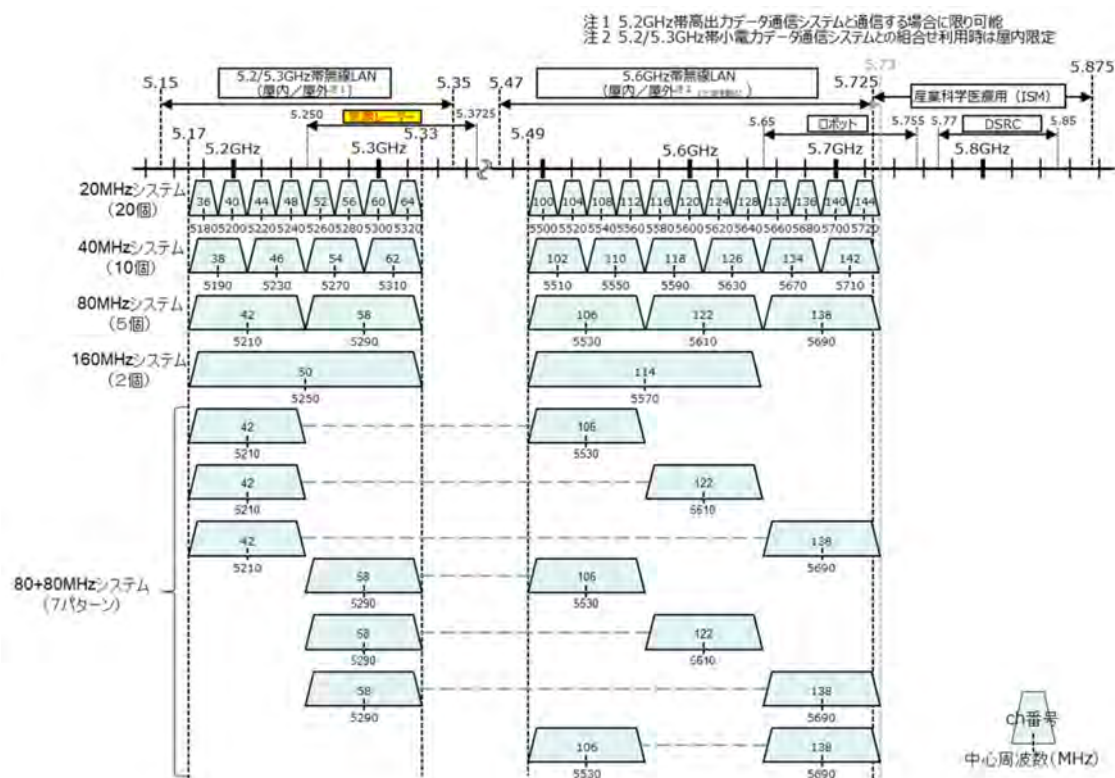


図 5. 1-1 日本の 5GHz 帯無線 LAN システムのチャネル割り当てと代表共存システム

レーダーシステムとの観点から論じるときは、DFS とは利用するチャネルでのレーダーの存在を確認し、レーダー波を検出した場合には速やかにほかのチャネルに移行する機能である。DFS 動作が要求されるレーダーのパルスパターン（これを以降、DFS パルスパターンという。）は各国・各地域で使用されるレーダーのパルスパターンに基づき、それぞれ独自に規定されている。日本では平成 19 年度 1 月 31 日総務省告示第 48 号で

W53 の DFS パルス 2 パターンが規定された（この DFS パルス 2 パターンを以降、旧技適パルスパターンという）。しかし、これらの旧技適パルスパターンはどのレーダーにも該当しない検出条件を選択したものであり、また現業レーダーでも使用されていないものであった。その後、平成 28 年度、29 年度に「無線 LAN の DFS における周波数有効利用の技術的条件に関する調査検討」が行われ、そこで市販無線 LAN は旧技適パルスパターンには確実に反応するが、現業パルスパターンには必ずしも反応しないことが判明した。これを受けて、W53 無線 LAN の DFS に係る技術的条件の見直しが行われ、2019 年 7 月 11 日に公布された、次世代高効率無線 LAN の導入に向けた電波法施行規則等の一部を改正する省令及び関連告示に伴い、W53 の DFS パルスパターンが変更された（この新しく規定された DFS パルスパターンを以降、新技適パルスパターンという）。

しかし旧技適パルスパターンにより技術適合認証を取得した無線 LAN アクセスポイント（AP）は多数存在しており、それら AP のうち一部は気象レーダーの運用を検知しない。その場合、高利得アンテナを使う気象レーダーには、最悪ケースで数 100 km 離れた無線 LAN から干渉が及ぶ可能性がある。無線 LAN による干渉が発生すると、気象レーダーは誤った雨量値を算出してしまうなど、そのデータ品質を著しく悪化させる。

更に今後は訪日外国人の増加による持ち込みやネット通販によって海外 AP が日本で違法に用いられてしまう状況が増大すると考えられる。前述のように DFS パルスパターンは各国・各地域で使用されるレーダーのパルスパターンに基づき、定義されており、海外 AP はその仕向け地である各国・各地域での技術基準に従っている。したがって、これら海外 AP による気象レーダーへの干渉リスクも考慮する必要がある。

なお、海外からの持ち込み無線 LAN 機器は、端末（子局）に限っては平成 27 年 5 月に改正された電波法により、電波法に定める技術基準に相当する技術基準に適合する等の条件（平成 27 年総務省告示第 437 号）を満たす場合、入国の日から 90 日以内に限って使用可能となっているところである。

5 GHz 帯無線 LAN 利用状況について、福井県東尋坊気象レーダー観測所、大阪府高安山気象レーダー観測所、愛知県名古屋地方気象台にて市中の無線 LAN を観測した。その結果、日本が仕向け地でない無線 LAN AP も観測され、更に日本では開放されていない W58 での利用もあった。802.11ac の必須チャネル幅である 80 MHz 用チャネルの利用が多い傾向にある。W52 や W56 に比べると利用率は低いものの、C 帯気象レーダーの周波数と重なる W53 でも無線 LAN AP は観測されたことから、W53 が割り当てられる周波数のレーダーについては、干渉回避機能を有することが望ましい。

C 帯気象レーダーにおける無線 LAN 信号低減機能（5GHz 帯無線 LAN 干渉回避機能）については、福井県東尋坊気象レーダー観測所、大阪府高安山気象レーダー観測所、愛知県名古屋地方気象台にて市中無線 LAN を対象とする屋外実験に加えて、東尋坊気象レーダー観測所と離隔距離 100km の舞鶴に設置した実験試験局免許取得の無線 LAN AP 間で

の屋外実験も行い、その機能を評価した。

舞鶴の無線 LAN AP との間の屋外実験からは、離隔距離 100km の無線 LAN AP であっても気象レーダーに干渉を与えうることを確認した上で、その距離であっても 5GHz 帯無線 LAN 干渉回避機能が無線 LAN AP の干渉を検出し、DFS パルスパターンを発射、更にその発射された DFS パルスパターンが無線 LAN AP に有効に機能したことを確認した。

市中無線 LAN を対象とする屋外実験では、市中無線 LAN による干渉を検出し、また DFS パルスパターンを発射することで、通常運用のパルスパターンで DFS 検知しない無線 LAN AP であっても有効であることを確認した。人的なリセット操作やレーダー検出チャンネルでの再利用規制期間の終了をもって無線 LAN の利用が戻ってくることから、運用中は観測への影響を抑える手法を取りつつ 5GHz 帯無線 LAN 干渉回避機能を継続稼働することが望ましい。なお、DFS 動作しない違法 AP の対策については 5GHz 帯無線 LAN 干渉回避機能とは別のアプローチが必要である。また本実験からは、特に市街地にある気象レーダーサイトでは影響を受ける無線 LAN AP 数が非常に多くなるため、W53 と重複する周波数の利用は避けた方がよいことが示唆された。

以上より、5GHz 帯無線 LAN 干渉回避機能は、通常運用のレーダーパルスを DFS 検知しない無線 LAN AP にも有効であり、無線 LAN システムによる干渉がある場合に気象レーダー側が取りうる有用な対策である。

5. 2 現業で用いられている気象レーダーのパルスパターン

レーダーシステムと無線 LAN を共存させるための DFS 機能を有効に機能させるためのパルスパターンの策定が必要である。無線 LAN においては、レーダーシステムとの共存のために DFS 機能が 5.3GHz 帯並びに 5.6GHz 帯のチャンネルグループ（本節では W53 と W56 という。）で要求されている。この DFS 機能では、無線 LAN が DFS 要求周波数帯を利用する場合、運用前又は運用中においてレーダー波をモニタリングし、レーダー波を検出した場合、無線 LAN が運用しているチャンネルからほかのチャンネルへ移行する動作を行う。この DFS 機能では、無線 LAN が DFS 要求周波数帯を利用する場合、運用前又は運用中においてレーダー波をモニタリングし、レーダー波を検出した場合、無線 LAN が運用しているチャンネルからほかのチャンネルへ移行する動作を行う。

DFS 動作が要求されるレーダーのパルスパターンについては各国・各地域により規定されている。日本の技術基準においては、平成 19 年 1 月 31 日総務省告示第 48 号で W53 について、表 5. 2-2 に示すパルスパターンが採用されていた（本節では旧技適パルスパターンという。）。旧技適パルスパターンは、パルス幅が $1.0\mu\text{s}$ ~ $2.5\mu\text{s}$ の短パルスで、かつ固定の単一の PRF が採用されていた。

表 5. 2-1 日本の旧技適パルスパターン (W53)

パルス幅[μs]	パルス繰り返し周波数[Hz]	1バースト当たりのPRF数	1周期当たりのパルス数の最小値
1.0	700	18	15
2.5	260	18	15

なお、これらの旧技適パルスパターンは、告示の制定時含め、電子管型気象レーダーのいずれでも使用されていない。その上で、電子管型気象レーダーは短パルスを送信して運用しているが、現在、主流となっている固体素子型気象レーダーは短パルスと長パルスの両方を送信して運用している。また、PRFについても、気象レーダーの観測目的に応じて、様々なPRFを採用している。こうした状況から旧技適パルスパターンは、実際の気象レーダーで運用されているパルスパターンの実情と全く合っていない状況にあった。

無線 LAN がレーダー波を検知するためのパルスパターンとして、平成 29 年度の技術試験事務「無線 LAN の DFS における周波数有効利用の技術的条件に関する調査検討」において、気象庁及び国土交通省と協議のもと明らかとなった運用で必要とされる固体素子レーダーのパラメータの範囲が示され、旧技適パルスパターンに変わる新しい技適のパルスパターンとしてこの範囲を盛り込むように検討された。一方、現行の無線 LAN では、搭載されているハードウェアチップの制約からこのパラメータ範囲に入るレーダー波全てを検知することは厳しく、その上で仮にハードウェアを改変しても通常の通信パケットや雑音による誤検出を抑える動作保証のために性急な判断はできないことが分かった。こうした状況を受けて、2019 年 7 月 11 日に次世代高効率無線 LAN の導入に向け電波法施行規則等の一部を改正する省令及び関連告示が交付され、新しい技適パルスパターンとして図 5. 3-12 及び表 5. 2-32 のように変更された。

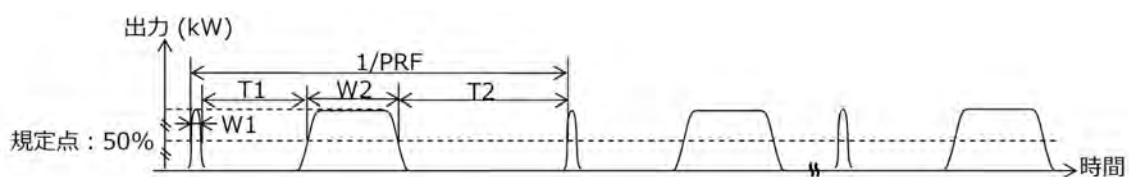


図 5. 2-2 DFS が検出するパルスパターン

表 5. 2-2 日本の新技適パルスパターン (W53)

試験 信号	パルス幅： W1 [μs]		パルス繰り返し 周波数：PRF [Hz]		1パー スト 当た りの PRF 数	1周期当たりの パルス数の 最小値	備考
	最小	最大	最小	最大			
1	0.5	5	200	1000	1	10	—
2	0.5	15	200	1600	1	15	
3	0.5	5	200	1000	1	$\min\{\max\{22, [0.026 \times \text{PRF}]\}, 30\}$	チャープ変調 (周波数偏差：±0.5 MHz～ 1.0 MHz) $T1, T2 \geq 70 \mu\text{s}$ $20 \mu\text{s} \leq W2 \leq 110 \mu\text{s}$, $ W1 - W2 \geq 15 \mu\text{s}$ デューティ比：10%未満
4	0.5	15	200	1600	1	$\min\{\max\{22, [0.026 \times \text{PRF}]\}, 30\}$	
5	0.5	1.5	1114	1118	1	30	チャープ変調 (周波数偏差：±0.5 MHz～ 1.0 MHz) $T1, T2 \geq 50 \mu\text{s}$ $30 \mu\text{s} \leq W2 \leq 32 \mu\text{s}$ (許容偏差：±5%)
6	0.5	1.5	928	932	1	25	
7	0.5	1.5	886	890	1	24	
8	0.5	1.5	738	742	1	20	

しかしながら新しい技適パルスパターンは、無線 LAN のハードウェアチップの制約と誤検出回避の観点から、現行の無線 LAN が検出可能と保証できるパターンに制限されている。そのため、現在運用で使用されているパルスパターンを網羅できておらず、新技適パルスパターンに収まらない現業の運用パルスパターンが存在することから現業で用いられている気象レーダーのパルスパターンを調査し整理した。国交省の C 帯レーダー雨量計、気象庁の一般気象レーダー、気象庁 DRAW を対象とし、運用されているパルスパターンの整理を行った。その結果を表 5. 3-13 に示す。

表 5. 2-3 運用中の基本のパルスパターン

システム	PRF [Hz]	パルス幅 [μ s]		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
	1830 / 1525	1	32	21 / 17	2.2 or 2.4
気象庁 DRAW	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

5. 3 共用条件案

将来的に DFS へ登録を求めるパルスパターン案を示す。

運用中の気象レーダーの基本のパルスパターン（表 5. 2-3）と、干渉除去のための PRF シフトを考慮するパルスパターンを包含する範囲を将来的に DFS に登録を求めるパルスパターンの一案とするが、これをベースに現実的なパターンを検討する必要がある。規定すべきパラメータは、我が国の現在の技適パルスパターンから、PRF、W1(短パルス幅)、T1(短パルス受信時間)、W2(長パルス幅)、T2(長パルス受信時間)、1 周期当たりのパルス数の最小値、周波数チャープ変調幅だと考えられる。まず W2 以外を規定する。運用中の気象レーダーの基本のパルスパターンから、 $1 \mu s \leq W1 \leq 2.2 \mu s$ なのでこれにレーダーサイト調整幅 10% を付加した $1 \mu s \leq W1 \leq 2.22 \mu s$ を規定する。T1 について、一般的に気象レーダーでは短パルス受信時間は長パルス幅によって観測不能になる範囲を観測するため $T1 \geq W2$ に設定される。そのため $T1 \geq W2$ と規定する。T2 は PRI (=1/PRF) から W1、T1、W2 を除いた値であるため、PRF、W1、T1、W2 を規定することで T2 は規定しない。1 周期当たりのパルス数の最小値は PRF から計算される。周波数チャープ変調幅はチャンネル幅である 2.5MHz を規定値とする。最後に、W2 は一般的に PRI (=1/PRF) と相関がある値で、これらの関係はデューティー比 (W2/PRI) であらわされる。運用中のパルスパターンのデューティー比は平均約 4% であることから、W2 [μ

s] = 0.04 PRI [μs]を基準とし、運用中のパルスパターンと干渉除去のための PRF シフトを考慮するパルスパターンを包含する範囲を規定する。図 5. 3-1 に、運用中のパルスパターンと、それに PRF シフトアルゴリズムを 1 回適用したパルスパターンと、2 回適用したパルスパターンをプロットしている。

PRF シフトは PRI が増加するので、各プロットの右に平行移動したプロットが PRF シフト後のパルスパターンである。また、参考としてデューティー比 10%の直線も記入している。

グラフ中の点線は各プロットの W2 に±10%の幅を持たせたものである。この幅はレーダーサイトの地理環境に適応させるための調整幅を示す。デューティー比 4%を基準にこれらのプロットを包含する範囲を赤枠で示して、この赤枠を DFS に登録を求めるパルスパターンの W2 と PRI とする。以上を表 5. 3-1 にまとめた。

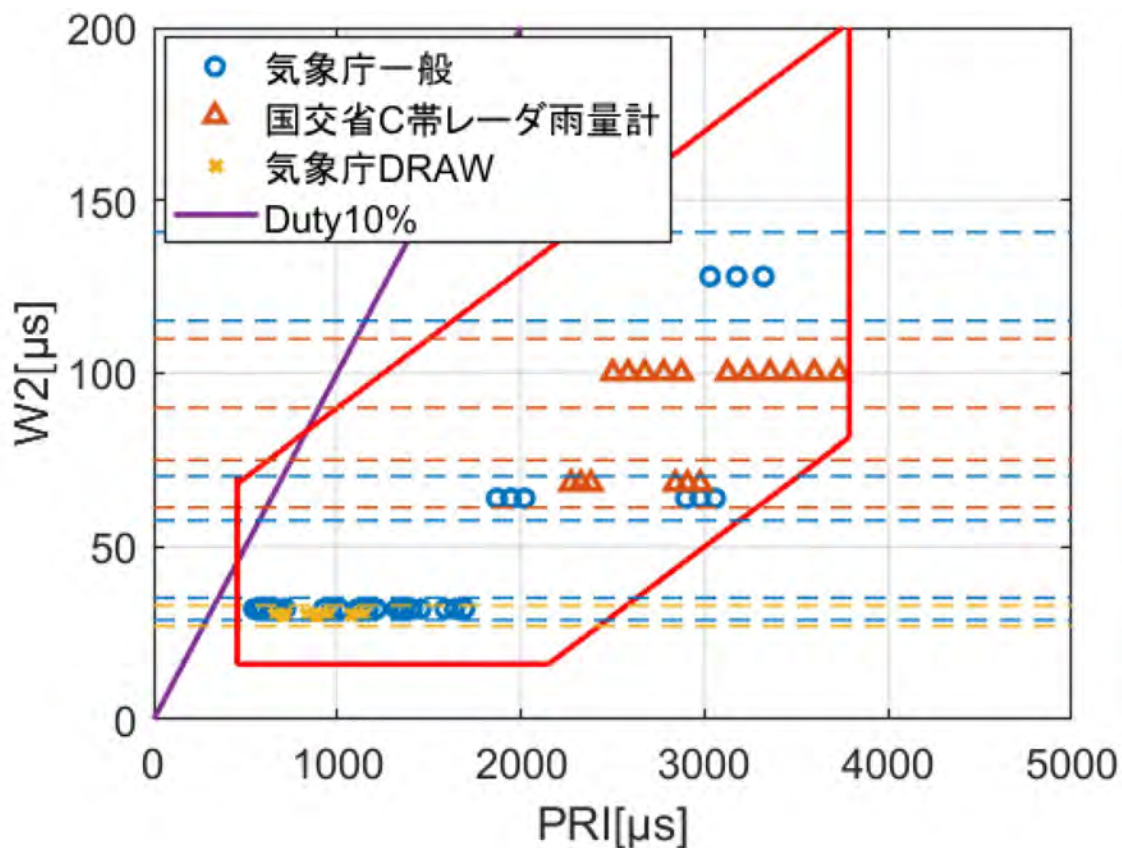


図 5. 3-1 W2 と PRI の関係

表 5. 3-1 将来的に DFS へ登録を求めるパルスパターン

パラメータ	規定値
W1	$1 \leq W1 [\mu s] \leq 2.22$
T1	$T1 \geq W2$
PRI と W2	$450 \leq PRI [\mu s] \leq 3800$ $16 \leq W2 [\mu s]$ $0.04PRI [\mu s] + 50 \geq W2 [\mu s]$ $0.04PRI [\mu s] - 70 \leq W2 [\mu s]$
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

5. 4 共用条件案に対する検討

5. 3 項までで述べてきた将来的に DFS へ登録を求めるパルスパターンについて、気象レーダー関係者と無線 LAN 関係者の双方で追加導入の可能性について確認を行った。しかしながら、無線 LAN 側で気象レーダーの送信波検出に必要なパルス数の観点から、技術的に対応が困難であることが判明した。

このような状況下で、直近で干渉が生じえないかを判断するために、以下の2つの観点から調査を実施した。

- ① 現世代の固体素子気象レーダーが保護されているか
- ② 次世代の固体素子気象レーダーが保護されるか

上記①については、固体素子レーダーで利用するパルスパターンのうち、干渉リスクの高い低仰角用は、802.11ac 以降で DFS 検出対象とされていることを確認した。また、近年運用を開始した気象庁の固体素子気象レーダーも対象となっていることを確認した。上記②については、気象レーダーの技術発展は日々進んでおり、現時点で将来を見通すのは困難と判断した。さらに、無線 LAN 側でのパルスパターンの追加には、相応の作業負荷が想定されるため、頻繁な追加は慎むべきと判断した。

無線 LAN の新規格が 10 年以内おきに生まれている現状を踏まえ、全体の益を考慮し、双方において大きな状況変化が見込まれた際に、改めて協議を進めることとし、変化状況の見落としを避けるべく、パルスパターンに関して、関係者による定期報告で情報を共有する。

第6章 今後の課題

第1章に示した通り、今後気象は激甚化していき、X帯の気象レーダー局数（高性能レーダーを含む）は増加していくものと想定される。その際、気象レーダー間のメインローブ-メインローブ干渉は許容するが、サイドローブ-サイドローブ干渉は許容することはできない。そのため、新設/更新レーダーについては、原則として既設レーダーへメインローブ-サイドローブ干渉が発生しないチャンネルが割り当てられる必要がある。

しかしながらこの条件を満たす空きチャンネルがない新設レーダーは、既設レーダー方向に対して必要な送信ブランキングまたは送信ヌル制御を行うことで気象レーダー間の干渉を避けることが可能である。ただし、既設レーダーの更新時に新技術基準が適用され、メインローブ-サイドローブが許容値以下となる場合は、送信ブランキングまたは送信ヌル制御は不要となる。

V 検討結果

気象レーダー作業班は、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に関する技術的条件」について、別添のとおりとりまとめた。

別添 9. 7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーに関する技術的条件

1. 一般的条件

- ・ 適用範囲
この技術的条件は、9. 7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーであって、送信機の終段増幅器に固体素子を用いるものに対して適用する。
- ・ 周波数帯
高性能型気象レーダーの周波数帯は、9, 702. 5~9, 797. 75MHz の範囲（割当周波数 9, 705~9, 795MHz）とする。

2. 送信装置の条件

- ・ 変調方式および電波の型式
変調方式はパルス変調とすることが適当である。電波の型式は、PON 又は QON、もしくはその両方とすることが適当である。
- ・ 搬送波の周波数
電波の型式が PON の搬送波の周波数は、電波の型式が QON の搬送波の周波数より 2. 5MHz 高い周波数とすることが適当である。ただし、これらは同時に送信しないこと。
- ・ 周波数の許容偏差
周波数の許容偏差は、恒温槽付水晶発振器や温度補償水晶発振器が高い周波数精度を確保できることから、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
フェーズドアレイレーダーの場合、各ユニットの振幅・位相のばらつきによるその影響が出やすく、パルス波形や OBW 等がひずむことが知られている。パルス圧縮が必要な QON については、狭帯域検討を行い 2. 5MHz に収めた。PON については、その影響が出やすく、現在運用中の気象レーダーの実測結果も踏まえ、3MHz 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（以下、「二重偏波」という）、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 PON、QON と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。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。

3. 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。

- ・ 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。

4. スプリアス発射又は不要発射の強度

- ・ 帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値
基本周波数の平均電力より、40dB 低い値とすることが適当である。
無線測位業務を行う無線局の送信設備の帯域外領域とスプリアス領域の境界の周波数は、ITU-R 勧告 SM. 1541-5 Annex 8 の条件に適合することとし、以下のとおりとする。

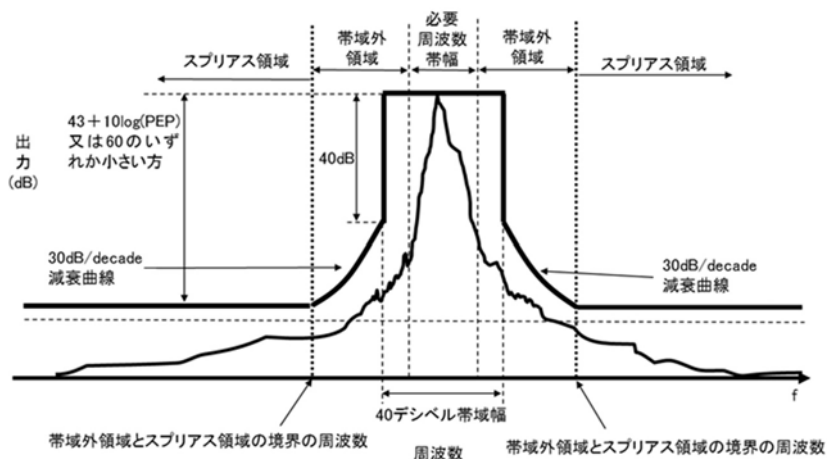


図1 帯域外領域とスプリアス領域の境界の周波数

- ・ スプリアス発射領域における不要発射の強度の許容値
基本周波数の尖頭電力より、60dB 低い値とすることが適当である。なお、参照周波数帯幅及び帯域外領域とスプリアス発射領域の境界の周波数は、ITU-R 勧告 SM. 1541-5 Annex 8 の条件に適合することが適当である。

5. 空中線

- ・ 空中線利得
空中線利得については、EIRP、空中線電力での規定を満足すればよいので、規定しない。
- ・ 空中線ビーム幅
空中線のビーム幅は、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。

6. 電波防護指針

9. 7GHz 帯高性能型気象レーダーについては、当該レーダーを設置する段階において、その諸元が電波防護指針と適合できるか確認するものである（電波防護指針については、参考資料1参照）。

電波防護対策としては、電波防護指針に基づき、設置環境に応じてそれぞれが離隔距離を算出し、離隔距離以内に立ち入れないように対策（ビルの屋上に人が立ち入るときは電源が切れる、など）を施したり、空中線が停止した際は、電波の送信も停止させる機能を装備したりするなどの対策を行う必要がある。

X 帯高性能型気象レーダーの以下の諸元に基づき、電波防護指針の適合性を確認する。ひとつの参考値を以下に示す。

表 1 離隔距離と計算条件

離隔距離	計算条件
15.3m	空中線は回転する EIRP : 110dBm デューティー比 : 10% 直接波+ビル等の反射

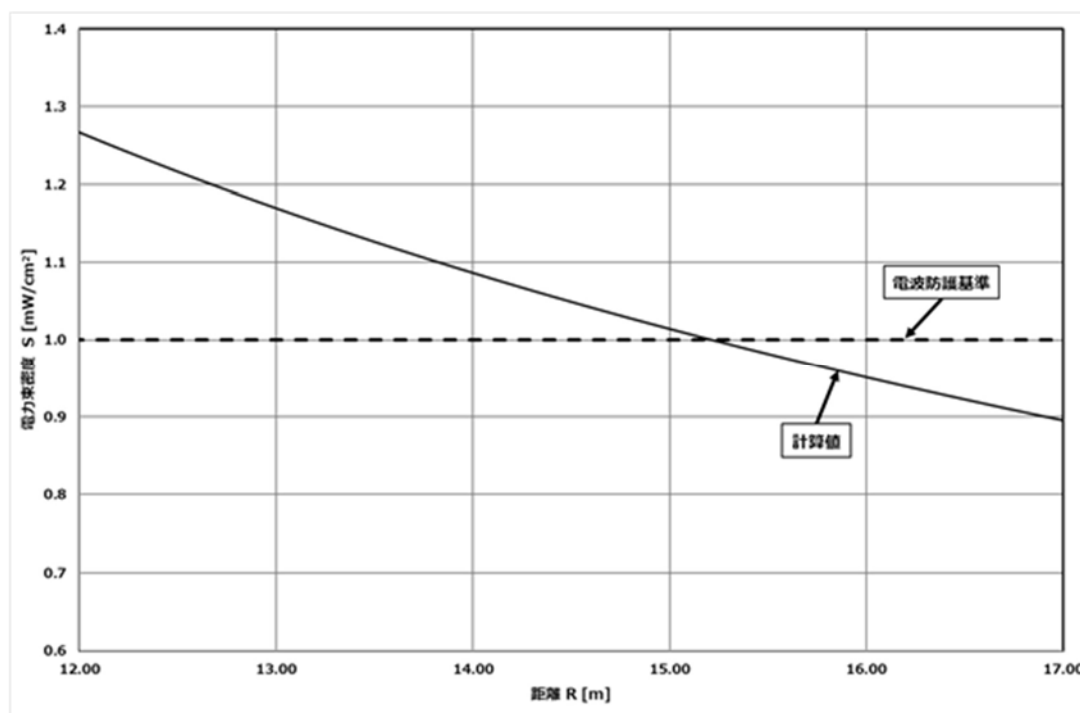


図 2 X 帯高性能型気象レーダーの電波防護指針と適合性（例）

この例の場合、離隔距離を 15.3m 程度確保することにより、電波防護指針に適合できることを確認した。ビルの屋上等に設置する際には、人の立ち入りに応じて送信を停止させる、アンテナの回転を停止した状態で送信できないようにする等の対策を行う必要がある。

7. 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。
- ・ 副次的に発する電波等の限度
現行無線設備規則第 24 条の規定のとおり、X 帯高性能気象レーダーについても、受信機から副次的に発する電波の限度は、 4 nW 以下とする。

8. 測定法

本節では、9.7GHz 帯フェーズドアレイ気象レーダーの技術的条件のうち、測定法に関する項目について定める。

- ・ 周波数の測定（特性周波数）
電波の型式が PON の場合 -3dBpp 、QON の場合 -10dBpp となる周波数の平均とする。
- ・ 占有周波数帯幅の測定
占有周波数帯幅（以下、OBW）の測定において、周波数オフセットした PON と QON を同時にスペクトラム・アナライザーにて測定すると分解能帯域幅（RBW）の設定値によって PON と QON のピークレベル差が変化するため、RBW の設定値を規定する必要がある。この解決方法として、周波数オフセットした PON と QON を個別にスペクトラム・アナライザーにて測定する（測定例については参考資料 2 参照）。

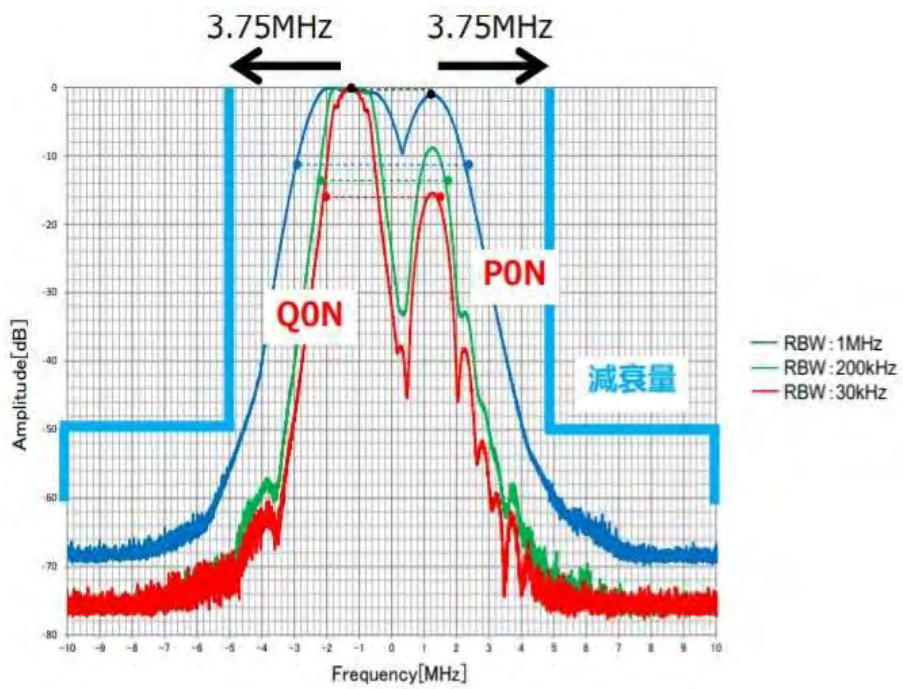


図3 周波数オフセットについて

表 2 の条件で測定を行うと、OBW、送信周波数及び搬送波の変調波スペクトルが同時に測定できる。

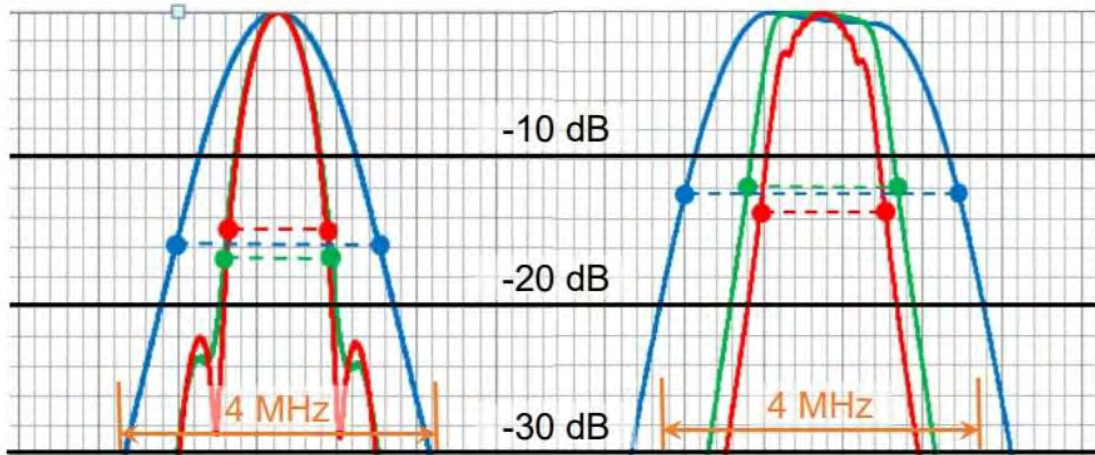
表 2 測定条件

	測定条件	数値例	
		PON	QON
掃引周波数幅	OBW、送信周波数、及び搬送波の変調スペクトルの許容範囲が同時に測定できる幅	30 MHz	
分解能帯域幅 (RBW)	OBW 許容値の 1%以上	30 kHz	
ビデオ帯域幅 (VBW)	RBW と同程度	30 kHz	
データ点数	1000 点以上	1501 点以上	
掃引モード	繰り返し掃引	繰り返し掃引	
掃引時間	PRF の逆数とデータ点数の積以上	10 秒	
信号対雑音比 (S/N)	50 dB 以上	70 dB 以上	
検波モード	ポジティブピーク	ポジティブピーク	
表示モード	マックスホールド	マックスホールド	
特性周波数 (参考)	ピークから一定割合電力低下した周波数の平均	-3 dBpp となる周波数の平均	-10 dBpp となる周波数の平均

測定条件の根拠は、以下のとおりである。

ア 掃引周波数幅

- OBW 計算をするためには、適切な幅で掃引しなければならない。OBW は、掃引周波数幅内の電力総和に対して 99%の電力が集中する周波数幅で規定される。つまり、掃引周波数の幅が狭すぎる場合には、OBW が過小評価される。
- 国内規定には根拠の記述がないため、ITU - R 勧告 SM. 443-4 を引用する。掃引周波数幅が過剰に広い場合、多量の雑音計算過程に混入して精度低下要因となる。そのため、少なくとも最大振幅に対して 0.5% (または-26dB) のスペクトル成分が十分に含まれる幅とする (図)。
- OBW の端点は概ね-15~-10dB となる。OBW の 2 倍程度幅を取れば、スペクトルの接点は-30dB を下回るが、OBW だけでなく、送信周波数や減衰量など全体を一度に測定するには、掃引周波数幅を 30MHz とすることが適当である。



*ITU-R 勧告 SM. 443-4 “Bandwidth measurement at monitoring stations”

図4 OBWの測定方法の根拠

イ RBW

OBWは探知性能に直結するため、許容値付近で運用することが望ましい。また、2桁程度の測定精度が必要であるため、RBWはOBWの1%程度とする。ただし、実際のスペクトラム・アナライザは離散的なRBWしか設定できないため、RBWはOBWの1%以上とする。

PONをスペクトラム・アナライザで測定すると、PRF毎に分布する線スペクトルとして観測されるため、観測点毎にスペクトルを1本以上入れる必要があることから、RBWはPRF以上とする必要がある。PRFとして50Hz~20kHzが想定されているが、RBWを1%とした場合は概ね要件を満たす。

ウ データ点数

データ点数は、掃引周波数幅をRBWで除した値が下限値となる。掃引周波数が30MHz、RBWをOBWの1% ($30\text{MHz} \times 1\% = 0.030\text{MHz}$) とすると、下限値は $30 / 0.030 = 1000$ 点となる。

エ 掃引モード

スペクトルの測定においては、レーダーと非同期で測定するために、1回の掃引だけでは、スペクトルのエンベロープが形成されないため、ある程度の繰り返しが必要である。ITU-R 勧告 SM. 443-4 では、400回以上の掃引が必要であると言われている。

オ 掃引時間

各データ点の測定時間は最低でも、送受信1周期以上が必要である。PRFの逆数が送信周期であり、各点の測定時間の最低値となるため、掃引時間はPRFの逆数とデータ点数の積以上とする。

カ 信号対雑音比

OBWの測定には、最低でも26dBのダイナミックレンジが要求されている。許容誤差を0.02dBとすると、 $(S+N)/S \leq 10^{(0.02/10)}$ より $S/N \geq 216.65 \approx 23.4$ [dB]となるため、測定系には $26\text{dB} + 23.4\text{dB} = 49.4\text{dB}$ 以上のダイナミックレンジが要求される。よって、信号対雑音比は50dB以上とする。

- ・ 副次的に発する電波等の限度

空中線接続端子に擬似負荷を接続し、受信装置を連続受信状態として、スペクトラム・アナライザ等を用いて測定すること。

- ・ フェーズドアレイレーダーにおける測定法

フェーズドアレイレーダーの周波数、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。（3つの測定方式については参考資料3）

9. その他

今後気象は激甚化していき、高性能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 $I/N < 35\text{dB}$ 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。

参考資料 1 電波防護指針

我が国では、無線設備から発射される電波について、これまでの科学的知見を基に人体の健康に好ましくない影響を及ぼさない電波の強さの指針（電波防護指針）を定め、それに基づき電波法令により安全性を確保している。電波法施行規則第二十一条の四においては、無線設備が安全施設をしなければならない電波の強度について、次のとおり定められている。

電波法施行規則第二十一条の四

（電波の強度に対する安全施設） 無線設備には、当該無線設備から発射される電波の強度（略）が別表第二号の三の三に定める値を超える場所（略）に取扱者のほか容易に出入りすることができないように、施設をしなければならない。（以下、略。）

別表第二号の三の三 電波の強度の値の表（第 21 条の 4 関係）

第 1

周波数	電界強度の実効値 (V/m)	磁界強度の実効値 (A/m)	電力束密度の実効値 (mW/cm ²)
100kHz を超え 3 MHz 以下	275	2.18 f ⁻¹	
3 MHz を超 30MHz 以下	824f ⁻¹	2.18 f ⁻¹	
30MHz を超え 300MHz 以下	27.5	0.0728	0.2
300MHz を超え 1.5GHz 以下	1.585f ^{1/2}	f ^{1/2} /237.8	f/1500
1.5GHz を超え 300GHz 以下	61.4	0.163	1

注 1 f は、MHz を単位とする周波数とする。

- 2 電界強度、磁界強度及び電力束密度は、それらの 6 分間における平均値とする。
- 3 人体が電波に不均一にばく露される場合その他総務大臣がこの表によることが不合理であると認める場合は、総務大臣が別に告示するところによるものとする。
- 4 同一場所若しくはその周辺の複数の無線局が電波を発射する場合又は一の無線局が複数の電波を発射する場合は、電界強度及び磁界強度については各周波数の表中の値に対する割合の自乗和の値、また電力束密度については各周波数の表中の値に対する割合の和の値がそれぞれ 1 を超えてはならない。

第 2

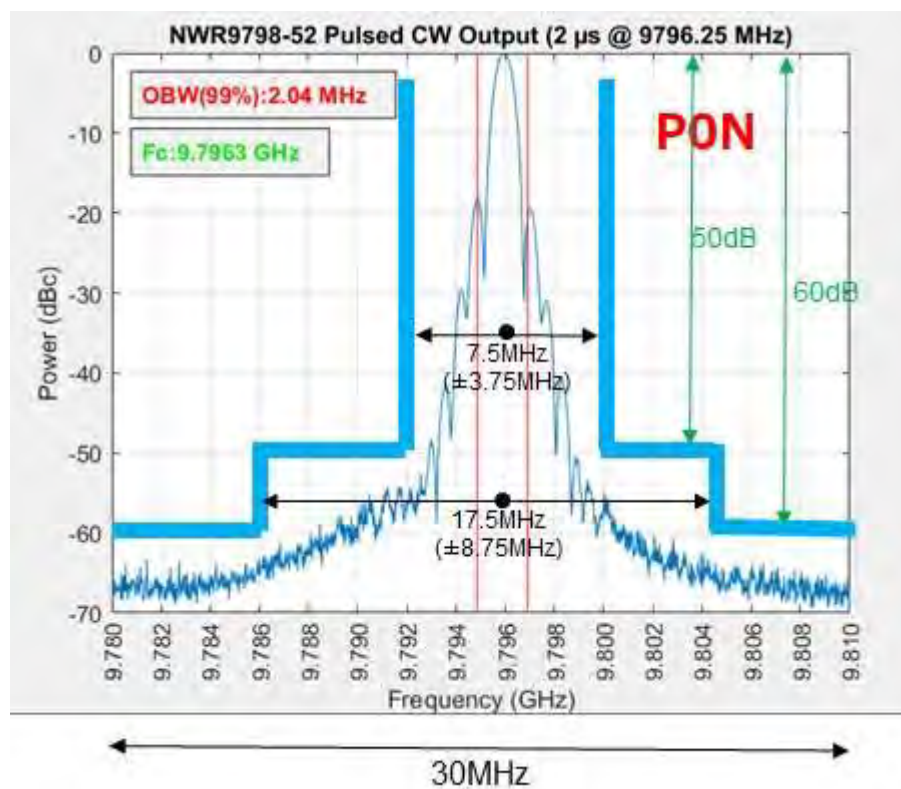
周波数	電界強度の実効値 (V/m)	磁界強度の実効値 (A/m)	磁束束密度の実効値 (T)
10kHz を超え 10MHz 以下	83	21	2.7×10^{-5}

注 1 電界強度、磁界強度及び磁束密度は、それらの時間平均を行わない瞬時の値とする。

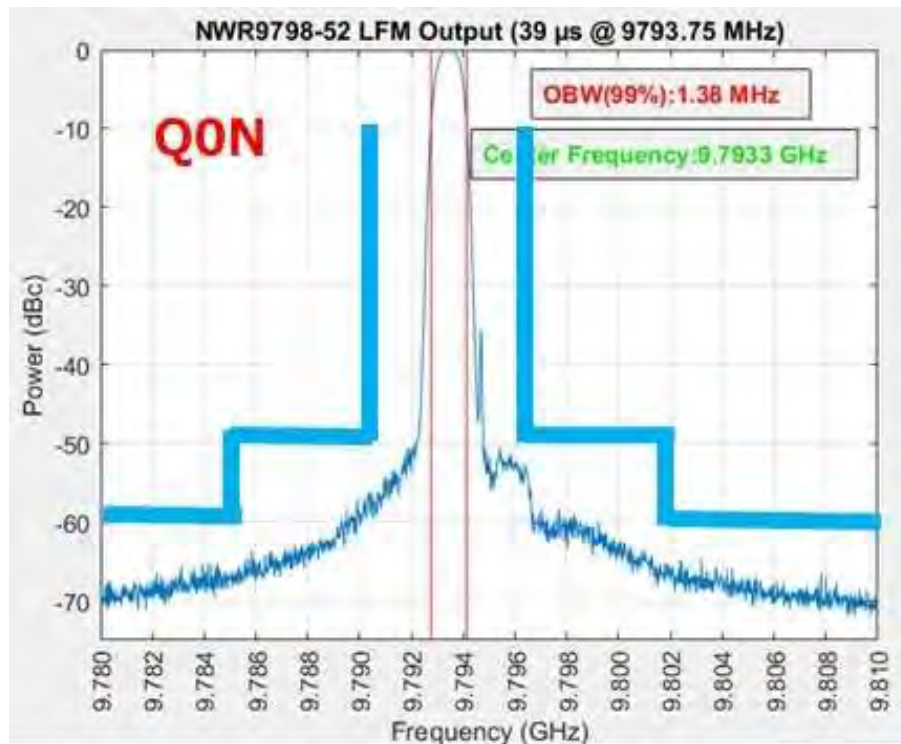
- 2 人体が電波に不均一にばく露される場合その他総務大臣がこの表によることが不合理であると認める場合は、総務大臣が別に告示するところによるものとする。
- 3 同一場所若しくはその周辺の複数の無線局が電波を発射する場合又は一の無線局が複数の電波を発射する場合は、電界強度、磁界強度及び磁束密度については表中の値に対する割合の和の値、又は国際規格等で定められる合理的な方法により算出された値がそれぞれ 1 を超えてはならない。

参考資料 2 占有周波数帯幅の測定例

占有周波数帯幅（OBW）の測定における測定例を以下に示す。

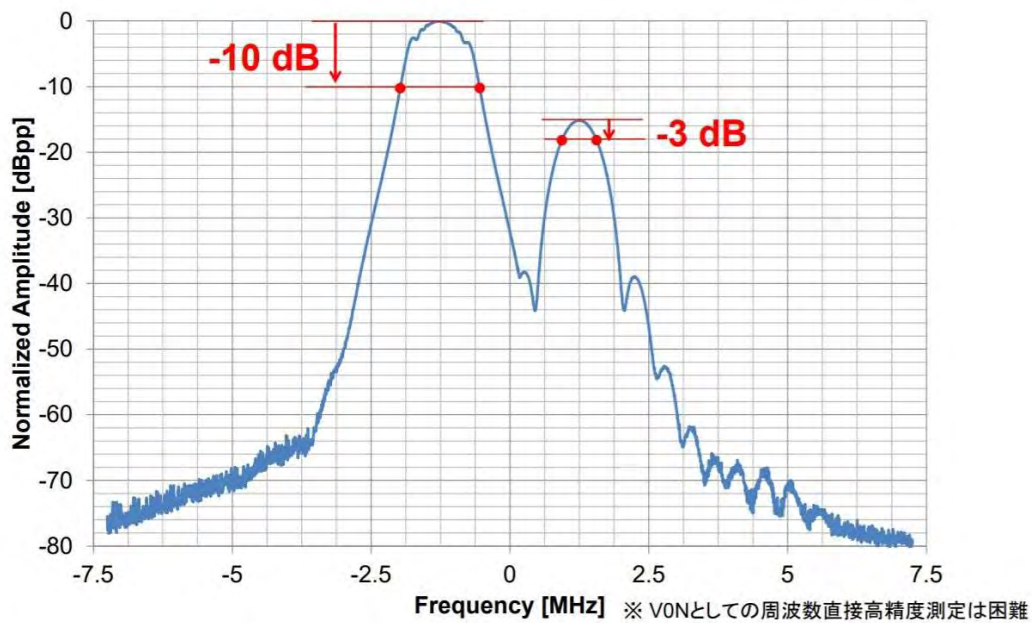


OBW の測定 (PON)



OBW の測定 (QON)

特性周波数のスペクトルの測定例を以下に示す。



OBW の測定 (VON)

表 特性周波数スペクトル測定例

	電波の型式	測定値
OBW [MHz]	PON	1.26
	QON	1.58
	VON	3.48
送信周波数偏差 [kHz]	PON	-2.5
	QON	-10.0
送信周波数偏差 [ppm]	PON	-0.27
	QON	-1.06

パルス仕様

PON : パルス幅 $1 \mu\text{s}$

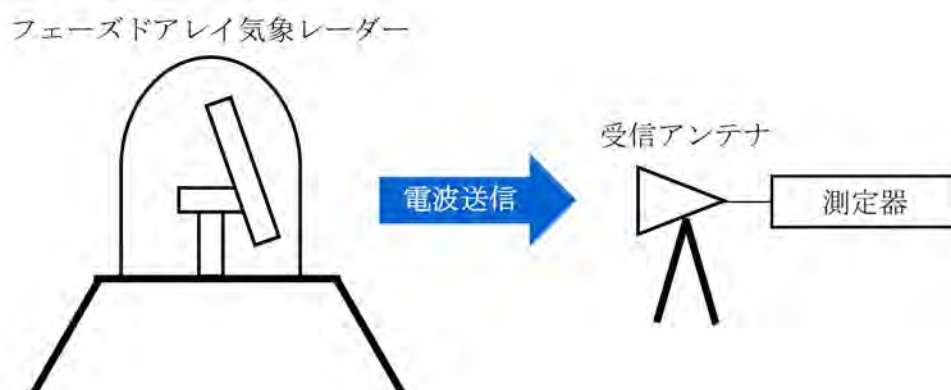
QON : パルス幅 $50 \mu\text{s}$ 、変調幅 2MHz

参考資料3 フェーズドアレイレーダーにおける測定法の概要

フェーズドアレイレーダーにおける測定法の概要を以下に示す。

(1) 空間発射測定法

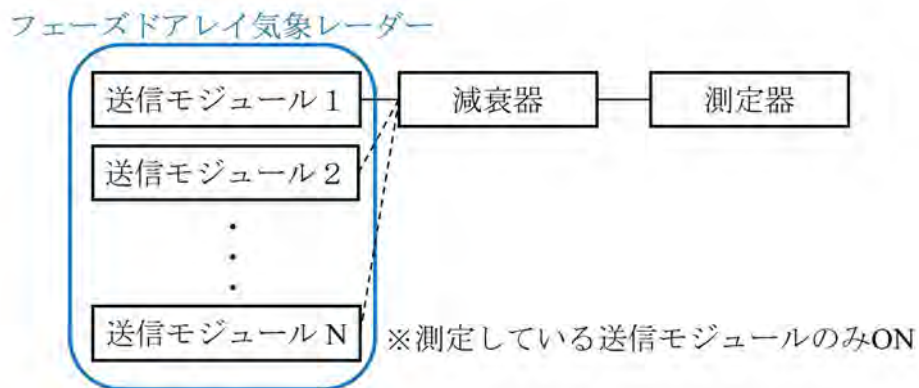
空間発射測定法は、全ての送信モジュールを一度に送信し、空間に発射された電波を受信アンテナによって測定する方法である。レーダー運用時の状態でパラメータを測定できる一方で、測定に適した場所が確保できない場合、マルチパス等の影響で正確なパラメータを測定できない可能性がある。以下に、空間発射測定法の概要図を示す。



空間発射測定法の概要図

(2) 有線接続測定法

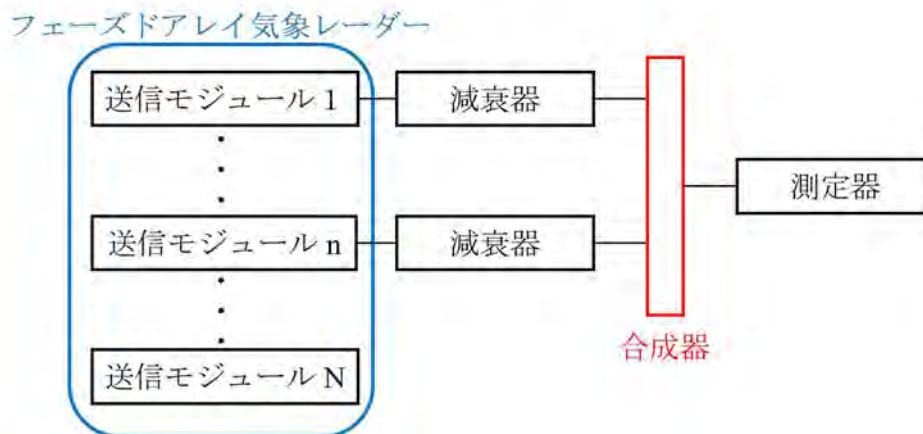
有線接続測定法は、各送信モジュールに直接測定器を接続し、送信出力段における出力を測定する方法である。レーダーの設置場所に関わらず測定できる一方で、アンテナ素子数の増加に伴い、送信モジュールの測定数が増えるため、測定時間が膨大になる可能性がある。以下に、有線接続測定法の概要図を示す。



有線接続測定法の概要図

(3) 複数合成測定法

複数合成測定法は、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である。レーダーの設置場所に関わらず測定でき、有線接続測定法に比べて測定時間を短縮できる一方で、空間発射測定法と等価となるように、複数合成測定法での測定点において、同位相合成となる調整と経路ロス補正を実施する必要がある。以下に、複数合成測定法の概要図を示す。



複数合成測定法の概要図

別表 1

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 構成員

(敬称略)

氏名		所属
主査 専門委員	三次 仁	慶應義塾大学 環境情報学部 教授
主査代理 専門委員	豊嶋 守生	国立研究開発法人情報通信研究機構 ネットワーク研究所ワイヤレス ネットワーク研究センター 研究センター長
委員	高田 潤一	東京工業大学 環境・社会理工学院 学院長／教授
〃	森川 博之	東京大学 大学院 工学系研究科 教授
専門委員	秋山 裕子	富士通株式会社 モバイルシステム事業本部モバイルネットワーク事 業部 事業部長
〃	飯塚 留美	一般財団法人マルチメディア振興センター ICT リサーチ&コンサル ティング部 シニア・リサーチディレクター
〃	井家上 哲史	明治大学 理工学部 教授
〃	伊藤 数子	特定非営利活動法人 STAND 代表理事
〃	今村 浩一郎	日本放送協会 放送技術研究所 伝送システム研究部 部長
〃	児玉 俊介	一般社団法人電波産業会 専務理事
〃	坂本 信樹	日本電信電話株式会社 技術企画部門 電波室長 (10月3日～)
〃	杉浦 誠	一般社団法人全国陸上無線協会 専務理事
〃	杉本 千佳	横浜国立大学大学院工学研究院 知的構造の創生部門 准教授
〃	高尾 義則	一般社団法人 日本アマチュア無線連盟 会長 (～10月2日)
〃	田丸 健三郎	日本マイクロソフト株式会社 技術統括室 業務執行役員 ナショナル テクノロジーオフィサー
〃	福家 裕	日本電信電話株式会社 技術企画部門 電波室長 (～10月2日)
〃	藤井 威生	電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター 教授
〃	藤野 義之	東洋大学 理工学部 電気電子情報工学科 教授
〃	松尾 綾子	株式会社東芝 情報通信プラットフォーム研究所 ワイヤレスシステ ムラボラトリー 室長
〃	森田 耕司	一般社団法人 日本アマチュア無線連盟 会長 (10月3日～)
〃	吉田 貴容美	日本無線株式会社 シニアエキスパート
〃	吉田 奈穂子	欧州ビジネス協会 電気通信機器委員会 委員

(令和5年10月3日現在)

別表 2

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 気象レーダー作業班 構成員

(敬称略)

	氏 名	所 属
主任	川西 哲也	早稲田大学
主任代理	牛尾 知雄	大阪大学 教授
	荒川 勝行	国土交通省 航空局 交通管制部 管制技術課 航行支援技術高度化企画室 管制技術調査官
	安藤 憲治	電気事業連合会 情報通信部 副部長
	今井 克之	住友電設(株)通信システム事業部 事業企画部 主管
	岡島 健	日本無線(株)ソリューション事業部 水インフラ技術部 水事業推進グループ
	柿元 生也	三菱電機(株) 電子通信システム製作所 インフラ情報システム部 監視管制システム課 専任
	梶原 佑介	気象庁 大気海洋部 観測整備計画課 遠隔観測技術管理調整官
	加藤 敦史	(株)JAL エンジニアリング 技術部 システム技術室 RJ ボーインググループ
	國吉 裕夫	国土交通省 大臣官房技術調査課 電気通信室 課長補佐
	小西 康友	日本アンテナ(株) 開発設計部 マネージャー
	清水 昭典	古野電気(株) SSBU ソリューション開発課 課長
	鈴木 格	マスプロ電工(株) 開発部 係長
	田中 祥次	(株)放送衛星システム 総合企画室 専任部長
	鷹取 泰司	(一社)電波産業会 無線 LAN システム開発部会 副委員長
	田北 順二	(一社)全国船舶無線協会 水洋会部会 事務局長
	田島 慶一	スカパーJSAT(株)メディア事業部門 メディア技術本部 技術企画部 企画チーム 上席専任主幹
	手柴 充博	(株)ウェザーニューズ レーダープロジェクトリーダー
	東野 学	全日本空輸(株) 整備センター 技術部 技術企画チーム マネージャー
	長坂 正史	NHK放送技術研究所 伝送システム研究部 上級研究員

	中澤 伸之	海上保安庁 総務部情報通信課システム整備室 課長補佐
	花土 弘	(国研)情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター リモートセンシング研究室 研究マネージャー
	藤高 丞士	サン電子(株) 埼玉事業所 開発本部 開発部 受信機器開発課 主務
	細川 貴史	(国研)宇宙航空研究開発機構 周波数管理室 室長
	増田 有俊	(一財)日本気象協会 技術戦略室 室長
	松下 智昭	DXアンテナ(株) 技術第2部 技術規格チーム チームリーダー
	水谷 文彦	東芝インフラシステムズ(株) 小向事業所 電波応用技術部
	中村 元	防衛省 整備計画局 サイバー整備課 防衛部員
	米本 成人	(国研)海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 上席研究員
オブザーバー	末岡 洋二	日本航空(株) IT 運営企画部 センター基盤グループ マネージャー
オブザーバー	城田 雅一	(一社)電波産業会 無線 LAN 開発部会

(令和5年9月11日現在)

別表 3

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
 気象レーダー作業班 X 帯サブ・ワーキング・グループ 構成員

(敬称略)

	氏 名	所 属
リーダー	牛尾 知雄	大阪大学 教授
	柿元 生也	三菱電機株式会社 通信機製作所インフラ情報システム部監視 管制システム課 専任
	加藤 敦史	株式会社 JAL エンジニアリング 技術部システム技術室電装技 術グループ
	川辺 俊和	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA) 周波数管 理室
	木田 智史	東芝インフラシステムズ株式会社 小向事業所 電波応用技術部 スペシャリスト
	小西 康友	日本アンテナ株式会社 蕨工場 開発設計部
	斎藤 秀樹	国土交通省大臣官房技術調査課電気通信室
	清水 昭典	古野電気株式会社 SSBU ソリューション開発課 課長
	末長 康孝	NHK 技術局 管理部
	鈴木 修	気象研究所 台風・災害気象研究部 第四研究室 研究官
	鈴木 格	マスプロ電工株式会社 開発部
	田島 慶一	スカパーJSAT 株式会社 サービス技術部
	田中 祥次	株式会社放送衛星システム 総合企画室
	手柴 充博	株式会社ウェザーニューズ レーダープロジェクトリーダー
	東野 学	全日本空輸株式会社 整備センター技術部 技術企画チーム
	羽田 利博	日本無線株式会社 ソリューション事業部 水インフラ技術部 気象レーダーシステムグループ
	藤高 丞士	サン電子株式会社 開発部 受信機器開発課
	松下 智昭	D X アンテナ株式会社 技術第 2 部 技術規格チーム チーム リーダー
	中村 元	防衛省 整備計画局 サイバー整備課 防衛部員
	米本 成人	(国研)海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 上席研 究員

(令和 5 年 4 月 1 2 日現在)

