

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

「小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件」のうち
「76GHz帯小電力ミリ波レーダーの高度化に関する技術的条件」

平成27年4月28日

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	3
IV	検討概要	4
第1章	検討の背景	4
1-1	76GHz 帯小電力ミリ波レーダーに係るこれまでの導入経緯	4
1-2	現行の技術基準	4
1-3	レーダーシステムに関する動向	5
1-4	電波によるレーダーシステムのこれまでの導入経緯・現状	7
1-5	ミリ波レーダーの技術動向	9
1-6	各国の76GHz 帯レーダーの制度化状況	9
第2章	76GHz 帯小電力ミリ波レーダーの高度化	12
2-1	今回の検討対象等	12
2-2	検討の妥当性	12
第3章	他の無線システムとの共存に関する検討	13
3-1	76GHz 帯及びその隣接周波数帯における割当状況等	13
3-2	検討の前提条件	14
3-3	高度化による帯域内の与干渉	14
3-4	高度化による帯域外の与干渉	15
3-5	76GHz 帯レーダーが被干渉となる場合	17
3-6	76GHz 帯レーダー間の相互干渉	17
第4章	76GHz 帯ミリ波レーダーの高度化に関する技術的条件	20
第5章	今後の検討課題	20
V	検討結果	20
別添	76GHz 帯ミリ波レーダーの高度化に関する技術的条件	21
別表		
別表1	情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 構成員名簿	22
別表2	76GHz 帯小電力ミリ波レーダー高度化作業班 構成員	23
参考資料		24
参考資料2		26

検討事項

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は、情報通信審議会諮問第 2009 号「小電力の無線システムの高度化に必要な技術的条件」（平成 14 年 9 月 30 日諮問）のうち「76GHz 帯小電力ミリ波レーダーの高度化に関する技術的条件」について検討した。

I 委員会及び作業班の構成

委員会の構成員については、別表 1 のとおり。

本委員会の下に検討の促進を図るため、76GHz 帯小電力ミリ波レーダー高度化作業班（以下「作業班」という。）を設置し検討を行った。作業班の構成員については、別表 2 のとおりである。

II 検討経過

1 委員会での検討

(1) 第 12 回（平成 26 年 6 月 6 日）

委員会の運営方針、検討事項及びスケジュールについて検討を行い、委員会の下に作業班を設置することとした。

(2) 第 16 回（平成 26 年 12 月 9 日）

作業班の報告を受け、陸上無線通信委員会報告案についての検討を行った。

(3) 第 18 回（平成 27 年 3 月 3 日～平成 27 年 3 月 6 日）

第 16 回委員会会合での議論を踏まえ、陸上無線通信委員会報告案の一部修正について検討を行い、最終的な報告案を取りまとめた。（メーリングリスト上で実施）。

(4) 第 20 回（平成 27 年 4 月 20 日～平成 27 年 4 月 23 日）

報告案に対する意見募集の結果及び意見に対する委員会の考え方について検討し、報告を取りまとめた。

2 作業班での検討

(1) 第 1 回（平成 26 年 7 月 16 日）

作業班の運営方針及び今後の検討の進め方について検討を行った。

76GHz 帯小電力ミリ波レーダー高度化の概要及び諸外国の状況等について関係者から説明され、議論を行った。

(2) 第 2 回（平成 26 年 11 月 20 日）

他の無線システムとの共用について関係者から報告され、議論を行った。

(3) 第 3 回（平成 26 年 12 月 1 日）

陸上無線通信委員会報告案について報告され、議論を行った。

(4) 第 4 回（平成 27 年 2 月 20 日～平成 27 年 2 月 24 日）

第 16 回委員会会合での議論を踏まえ、陸上無線通信委員会報告案の一部修正について、議論を行った。（メーリングリスト上で実施）。

III 検討概要

第1章 検討の背景

1-1 76GHz 帯小電力ミリ波レーダーに係るこれまでの導入経緯

76GHz 帯（76-77GHz）による小電力ミリ波レーダーは、1996 年以降、欧米で標準化され、車載レーダーとして国際的に利用されてきた。我が国では平成 9 年（1997 年）の電気通信技術審議会答申を受けて制度化され、高速道路での追従走行（ACC）や追突防止等のための自動車レーダー等に広く使われている。

電気通信技術審議会答申（技術的条件）では、占有周波数帯幅を「1GHz」としていたが、制度化に際しては同帯域幅を「500MHz」と規定（当時のミリ波帯の発振器の周波数安定度が低かったことを考慮した模様）しており、関係メーカーでは同規定に合わせて製品化し、自動車への搭載、実用化を推進してきた。一方、欧米では制度上は 1GHz 幅まで許容されているが、用途が主に ACC（100～200m 先の先行車を検知）であり、あまり高い距離分解能を要しなかったこともあり、これまで 500MHz 幅以下で製品化されてきたところである。しかし、欧米の自動車メーカーでは、76GHz 帯レーダーによる追突防止（自動ブレーキ）機能等の高度化を図るため、500MHz～1GHz 幅を用いる同レーダーを製品化する動きがあり、我が国の占有周波数帯幅の 1GHz への拡大の検討が必要となっている。

1-2 現行の技術基準

76GHz 帯小電力ミリ波レーダーに係る技術基準は現在、表 1-1 のとおり定められている。

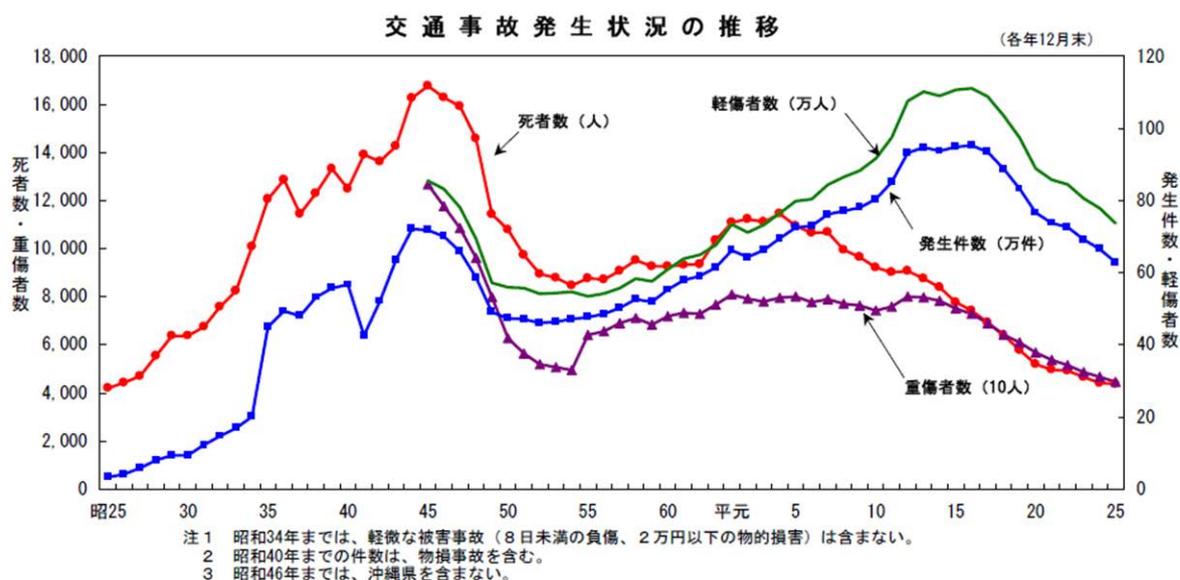
表 1-1 76GHz 帯小電力ミリ波レーダーに係る技術基準

周波数	76.5 GHz
指定周波数帯	76.0 - 77.0 GHz
空中線電力	0.01W 以下
空中線電力の許容誤差	上限：50%、下限：70%
空中線利得	40dBi 以下
周波数の許容偏差	76.0 - 77.0 GHz
占有周波数帯幅の許容値	500MHz
帯域外領域（74.5～76.0GHz 及び 77.0～78.5GHz） におけるスプリアス発射の強度の許容値※	100 μ W 以下
スプリアス領域（～74.5GHz 及び 78.5GHz～） における不要発射の強度の許容値※	50 μ W 以下

※ 参照帯域幅は 1MHz。

1-3 レーダーシステムに関する動向

現在、我が国では自動車の普及が進む一方で、交通事故や交通事故死者数については、近年は減少傾向にはあるものの、まだ十分に低い水準とは言えず（図 1-1 参照）、政府は 2018 年を目途に交通事故死者数を半減させ、2500 人以下とする目標を立てているところである。この高い目標を達成するためには、交通マナーも含めた交通対策と自動車等の双方で取り組む必要がある。自動車の衝突等への被害軽減対策は 1990 年中頃から重点的に実施されてきたことから、近年は予防安全対策が重要視されている。



出典：警察庁「平成 25 年中の交通事故の発生状況」

図 1-1 道路交通事故件数と死亡者数

近年、ドライバーの高齢化などにより、安全運転に対する意識が高まっている。このような状況の中で、先進運転支援システムが低価格で提供されることとなり、急速に普及が進むきっかけとなった。先進運転支援システムの中でも特に先進緊急ブレーキシステム（AEBS：Advanced Emergency Braking System、以下 AEBS とする）および車間距離制御装置（ACC：Adaptive Cruise Control、以下 ACC とする）への関心が高い。この AEBS や ACC のセンサーとして、長い間使用されているのが 76GHz 帯ミリ波レーダーである。近年はステレオカメラやレーザーレーダーなどのシステムも導入されているが、今後においても 76GHz 帯レーダーの使用は更に進むことが予想される。主な先進運転支援システムと、それらに採用されているセンサーは表 1-2 の通りである。

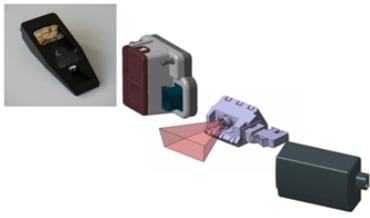
表 1-2 先進安全運転支援システムと採用されているセンサーの例

先進運転支援システム	センサー
先進緊急ブレーキ (AEBS)	76GHz レーダー、ステレオカメラ、 レーザーレーダー (30km/h 以下)
車間距離制御装置 (ACC)	76GHz レーダー、ステレオカメラ、単眼カメラ
全車速域 ACC	76GHz レーダー+カメラ、ステレオカメラ
後側方障害物警報	24GHz レーダー、カメラ 79GHz レーダー (開発中)
歩行者認識	ステレオカメラ、76GHz レーダー+単眼カメラ 79GHz レーダー (開発中)
車線維持支援装置	カメラ (ステレオまたは単眼)
ナイトビジョン (含む夜間の歩行者・動物認識)	近赤外線カメラ、遠赤外線カメラ
インテリジェントヘッドランプ	カメラ (対向車を認識)
信号・標識認識	カメラ
駐車支援	超音波センサー、カメラ

これらの先進運転支援システムの中で、従来は主に高級車を中心に搭載されていた AEBS は、大衆車および軽自動車まで拡大されており、多くの消費者が選択できるようになってきている。

この AEBS 機能を実現する技術は、76GHz 帯ミリ波レーダー以外にカメラやレーザーレーダー等のセンサーが採用されているが、現在世界の多くの自動車メーカーが AEBS および ACC のために信頼性の高い 76GHz 帯レーダーを採用している。

このような技術の核とすべき障害物を検知するためのセンシングシステムについて、代表的な各種センシングシステムの検出能力を図 1-2 に示す。これらのセンシングシステムの搭載とその組み合わせは、採用している車載センサー技術によるが、AEBS を例にとるならば、ステレオカメラのみ、赤外線センサーのみ、レーダーのみ、カメラとレーダーの組み合わせ等、各社の技術指向により、多種多様な搭載状況である。この中で、カメラの特徴は対象物の識別能力に優れていることではあるが、反面、レーダーよりも対象物までの距離認識および悪天候時の識別能力に問題があることから、コストとの兼ね合いもあるが、2種類のセンシングシステムを組み合わせる事例が多くなっている。



	近距離レーダー 24/76GHz & 70GHzレーダー	長距離レーダー 76GHzレーダー	近赤外線センサ	超音波センサ	単眼カメラ	ステレオカメラ	遠赤外線カメラ
検出範囲 < 2m	+	o	o	++	-	++	-
検出範囲 2-30m	+	++	++	-	-	o	-
検出範囲 30-150m	n.a.	++	+	--	-	-	-
角度検出範囲 < 10deg	+	+	++	-	++	+	++
角度検出範囲 > 30deg	o	-	++	o	++	+	++
角度分解能	o	o	++	-	++	+	++
直接速度検出	++	++	--	o	--	--	--
雨天性能	++	+	o	o	o	o	o
霧、雪での性能	++	++	-	+	-	-	o
センサーが汚れた状態での性能	++	++	o	++	--	--	--
ナイトビジョン	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-	o	++

++: 最適
-: 非常に困難

/+: 良い性能
/--: 不可

/o: 可能だが欠点あり
/n.a.: 不適

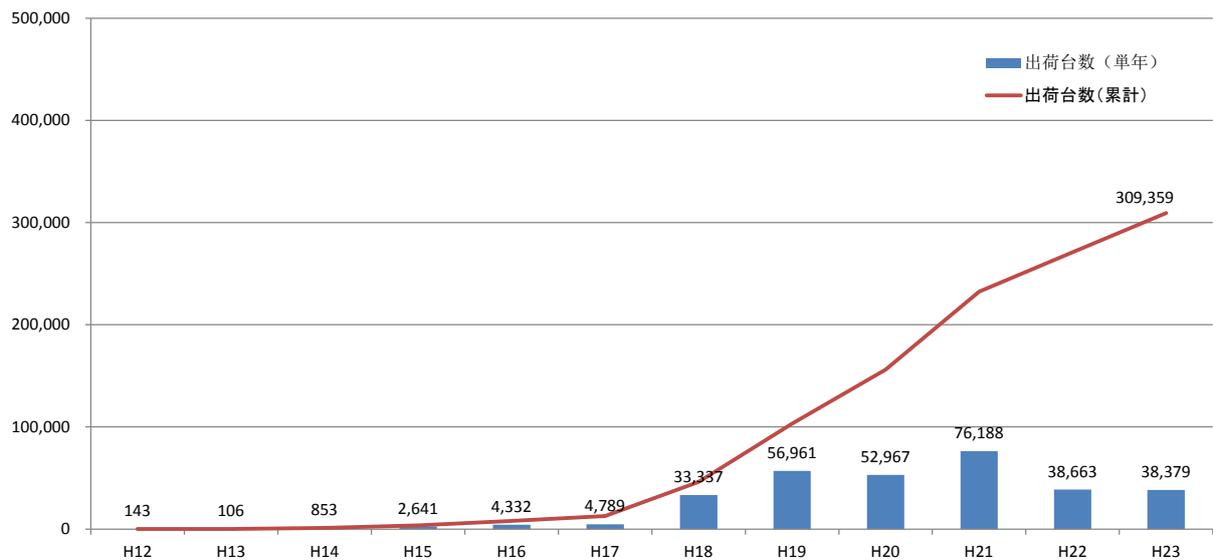
情報提供： 独ダイムラー社

図 1-2 他の車載センサー技術との比較

1-4 電波によるレーダーシステムのこれまでの導入経緯・現状

日本における電波によるレーダーシステムは、主に自動車における前方障害物との衝突事故回避装置の実現を目的として法制化の審議が行われた。76GHz 帯ミリ波レーダーについては、平成 7 年 3 月に開催された第 80 回電気通信技術審議会にて既に報告された 60GHz 帯の小電力ミリ波レーダーに追加する形で、平成 9 年に「76GHz 帯の周波数を利用する小電力ミリ波レーダーの技術的条件」が答申されたことに始まる。76GHz 帯を追加検討した意義の一つには、欧米で標準化が検討されていた 76GHz 帯を利用することで、国内外のメーカーが相互参入しやすく量産効果による低価格化が期待できることにもあった。現在、76GHz 帯小電力ミリ波レーダーは長距離（200m 超）車載レーダーとして世界的に使用され、先進運転支援システムの主要なセンサーとして普及が拡大している。

図 1-3 に 76GHz 帯ミリ波レーダーを搭載した車両の普及状況を示す。平成 23 年時点で累計約 30 万台が出荷されている。



電波の利用状況調査の評価結果(総務省)を基に JAIA 作成

図 1-3 76GHz 帯ミリ波レーダーの普及状況

24GHz 帯 (24.05-24.25GHz) も車載レーダー用途に世界で広く採用されている。日本では、特定小電力無線局移動体検知センサー用無線設備の規定により占有周波数帯幅が「76MHz 以下」に制限されていたが、平成 22 年 5 月にその制限が撤廃され、200MHz 幅の占有周波数帯幅が使用可能となった。その基準改正により車載レーダーとして国内でも採用され始め、その普及が進んでいる。

平成 22 年 4 月には、既に欧米で制度化されていた 24/26GHz 帯 UWB レーダーが日本でも制度化され、その高性能さから普及拡大が期待された。しかし欧州の制度における使用時限 (24GHz 帯は 2013 年、26GHz 帯は新規型式認定取得 2018 年および継続認定の販売期限 2022 年) および国内の制度における使用期限 (24GHz 帯のみ販売期限が 2016 年末) のために普及拡大には至っていない。

平成 24 年 12 月には、国内でも近距離から中距離までの車両の全周囲を高分解能で検知することが可能な 79GHz 帯高分解能レーダーが制度化された。欧州プロジェクトで開発された SiGe 系の安価なチップの採用も可能となり、その性能面・価格面から近・中距離用車載レーダーとして今後国内外で普及が期待されている。現時点では使用可能周波数帯が 78GHz～81GHz の 3GHz 幅に限られているが、2015 年に開催予定の WRC-15 において、これまで無線標準業務に国際分配されていない 77.5GHz～78GHz の同業務への追加分配が決定された場合には、77～81GHz の 4GHz 幅が使用可能になる見込みである。

1-5 ミリ波レーダーの技術動向

我が国で76GHz帯ミリ波レーダーが法制化された平成9年当時、ミリ波帯の周波数を得るために水晶発振器から逡倍、増幅する方法は既に実用化されていた。ただし、逡倍・増幅することは極めて高価であり車載用レーダーに採用することは困難であった。低コスト化の実現の為に当時採用されたのはガンダイオードを用いた空洞発振機であった。空洞（Cavity）発振器の周波数は金属の温度に依存するため、自動車が存在する温度変化の範囲を想定した場合の周波数安定度は非常に低く、500MHz程度の変化に留めるのが限度であった。現在は、PLL（Phase Locked Loop）付の自励発振器を用いるのが一般的であり、高次逡倍を用いることもあるが、その周波数安定度は水晶発振器制御に準拠した精度を維持可能となっている。

76GHz帯ミリ波レーダーの占有周波数帯幅を500MHzから1GHzに広げた場合、距離分解能が向上することで、物体検出の位置精度も高まると考えられる。

一般に占有周波数帯幅等に応じて距離分解能が決まるが、本作業班で提案されている500MHz超の占有周波数帯幅のレーダーでは、より高い距離精度での障害物検出が可能となり、AEBS等の予防安全効果などの更なる向上が期待される。

1-6 各国の76GHz帯レーダーの制度化状況

諸外国においては、米国で1996年、欧州で1998年に76GHz帯レーダーが制度化され、1997年に制度化された我が国も含めて、76GHz帯レーダーが長距離（200m超）車載レーダーの国際標準となっている。図1-4に示す世界の多くの国々で、1GHz幅の占有周波数帯幅の使用が認められており、より高度な先進運転支援システムの実現のために76GHz帯レーダーの使用が可能な状況となっている。

本作業班での検討で占有周波数帯幅の許容値が1GHzに改正されることは、76GHz帯レーダーの国際標準との整合を確保することに繋がる。



日本を除く緑色の地域では 1GHz 幅の占有周波数帯幅が使用可能

情報提供： 独ダイムラー社

図 1-4 76GHz 帯ミリ波レーダーを利用可能な地域

表 1-3 に示すミリ波レーダーの ITU-R 規格においても、76GHz 帯レーダーの必要帯域幅の最大値は 1GHz と定義されている。

表 1-3 ミリ波レーダーの ITU-R 規格

TABLE 1
Automotive radar characteristics in the frequency band 76-81 GHz

Parameter	Radar A ¹ Automotive radar For front applications for e.g. for adaptive cruise control	Radar B Automotive high-resolution radar For front applications	Radar C Automotive high-resolution radar For corner applications	Radar D Automotive high-resolution radar	Radar E Automotive high-resolution radar Very short range applications (e.g. Parking- Aid, collision avoidance at very low speed)
Sub-band used (GHz)	76-77	77-81	77-81	77-81	77-81
Typical operating range (m)	Up to 250	Up to 100	Up to 100	Up to 100	Up to 50
Range resolution (cm)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Typical emission type	FMCW, Fast-FMCW	FMCW, Fast-FMCW	FMCW, Fast-FMCW	FMCW	FMCW, Fast-FMCW
Max Necessary bandwidth (GHz)	1	4	4	4	4
Chirp bandwidth (GHz)	1	2-4	2-4	2-4	2
Typical sweep time (μs)	10 000-40 000 for FMCW 10-40 for fast-FMCW	10 000-40 000 for FMCW 10-40 for fast FMCW	10 000-40 000 for FMCW 10-40 for fast FMCW	2 000 – 20 000 for FMCW	10 000-40 000 for FMCW 10-40 for fast-FMCW
Maximum e.i.r.p. (dBm)	55	33	33	45	33
Maximum transmit power to antenna (dBm)	10	10	10	10	10
Max power density of unwanted emissions (dBm/MHz)	0 (73.5-76 GHz and 77-79.5 GHz) -30 otherwise	-30	-30	-13 ²	-30
Receiver IF bandwidth (-3 dB) (MHz)	0.5-1	10	10	10	10

¹ Radar type A is related to Recommendation ITU-R M.1452.

² Maximum power density of unwanted emission is specified at antenna input terminal.

資料引用元：Recommendation ITU-R M.2057-0(02/2014) Systems characteristics of automotive radars operating in the frequency band 76-81 GHz for intelligent transport systems applications

これまでは、諸外国においても 500MHz 以下の占有周波数帯幅の 76GHz 帯レーダーが導入されていたため、共通の規格の製品を国内にも導入することが可能であったが、主に欧米のメーカーが 500MHz 超の占有周波数帯幅の 76GHz 帯レーダーを製品化する動きがあり、国際標準化の観点からも我が国における占有周波数帯幅の 1GHz への拡大検討が急務となっている。

第2章 76GHz 帯小電力ミリ波レーダーの高度化

2-1 今回の検討対象等

本検討は、76GHz 帯小電力レーダーについて、諸外国では 1GHz 幅の電波発射が許容されている状況に比べて、我が国の技術基準における占有周波数帯幅の制限値が 500MHz と規定されており、我が国での同レーダーの製品開発、展開の制約となっている状況を踏まえ、当該規定を国際的に標準となっている 1GHz に変更することの可否に関する検討を行うものである。

したがって、今回は、この占有周波数帯幅の変更（500MHz 幅から 1GHz 幅への拡張）と、同変更による他の無線システムとの周波数共用・共存関係への影響について検討することとする。

2-2 検討の妥当性

本検討は 76GHz 帯小電力レーダーの占有周波数帯幅を 500MHz 幅から 1GHz 幅に変更することを検討するものであるが、前述のとおり、同レーダーの導入にあたっての平成 9 年（1997 年）の電気通信技術審議会答申（技術的条件）ではもともと占有周波数帯幅を「1GHz」としていた。当時はミリ波帯の発振器の周波数安定度が低かったことを考慮して制度化に際して、76GHz から 77GHz の 1GHz 幅を当該特定小電力無線局の指定周波数帯とする一方で、占有周波数帯幅は「500MHz」と規定していたものであるが、現在ではミリ波帯においても十分な周波数安定度が得られるようになっており、実際、一昨年に制度化されている 79GHz 帯高分解能レーダー（指定周波数帯は 78～81GHz の 3GHz 幅）については占有周波数帯幅を「3GHz」として技術基準が整備されているところである。

このような過去の経緯、状況を踏まえ、また、我が国での占有周波数帯幅の制限値の規定が今後の 76GHz 帯小電力レーダーの製品開発、展開の制約となっており、国際的な標準との整合を図ることが求められていることを考慮すると、現時点において同レーダーの占有周波数帯幅の変更（500MHz 幅から 1GHz 幅への拡張）について検討することは十分な妥当性があるものと考えられる。

第3章 他の無線システムとの共存に関する検討

3-1 76GHz帯及びその隣接周波数帯における割当状況等

平成11年(1999年)に76GHz帯小電力レーダーに関する電波法令関連の制度整備がなされた当時は、同一周波数帯(76~77GHz帯)に関しては無線標定業務以外には割当はなく、また隣接帯域も含めて既に導入されたシステム等は存在しなかったが、平成13年(2001年)には電波天文業務も一次業務として76~77.5GHz帯が割り当てられている。

また、80GHz帯において5GHz幅を使用する高速無線伝送システムについて、平成23年(2011年)5月に情報通信審議会からその技術的条件が答申された。同システムについては、その後、移動通信システムの基地局間を結ぶ回線としての利用ニーズが顕在化しつつあること、また、ITU-Rにおいて帯域内をチャンネルで細分化する規定が勧告化されるなど、国際的には、大容量通信かつ周波数利用効率の高い狭帯域システムの開発・商用化の取組が進展していることを踏まえ、平成26年4月に、80GHz帯高速無線伝送システムのうち狭帯域システムの技術的条件が答申され、同年8月に制度整備が行われており、今後、71GHzから76GHz(73GHz帯)及び81GHzから86GHz(83GHz帯)を用いて、具体的なシステム展開が進められるものと見込まれている。

したがって、現時点で、76GHz帯小電力レーダーと同一周波数帯及び隣接周波数帯における導入済みの他の無線システムとしては、能動業務として固定業務である80GHz帯高速無線伝送システムが存在しており、また、受動業務では同一周波数帯を含む帯域に電波天文業務が一次業務として割り当てられている状況である。(図3-1)

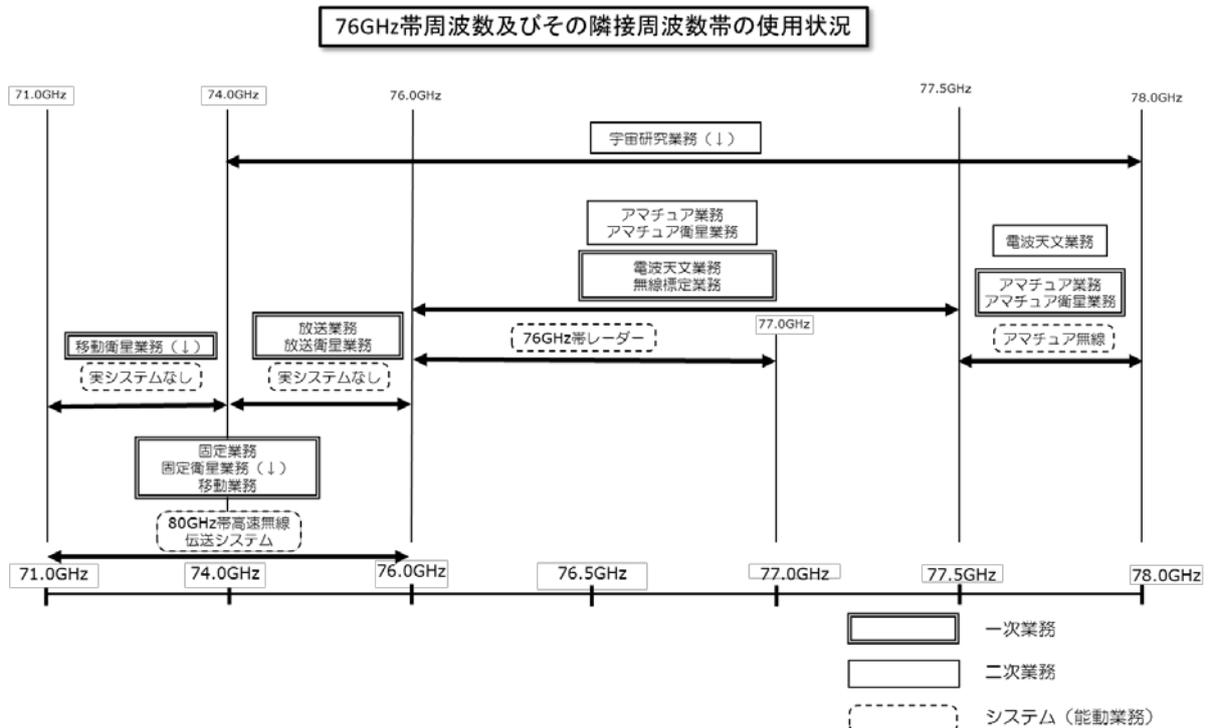


図3-1 76GHz帯及びその隣接周波数帯の使用状況

3-2 検討の前提条件

76GHz 帯小電力レーダーと、その後同一周波数帯を含む帯域に一次業務として割り当てられた電波天文業務、また、隣接周波数帯に導入された 80GHz 帯高速無線伝送システムは、それぞれの制度整備の際に、必要に応じて技術検討を行った上で、実運用上、周波数の共用・共存が可能との整理がなされて、それぞれ導入されてきたものであり、それを前提に各システムの導入、普及展開の取組が進められてきたところである。(76GHz 帯小電力レーダーは、高速道路での追従走行や追突防止等の運転支援機能における主要技術として普及が進んでいる。)

このような経緯等を踏まえ、本検討では、76GHz 帯小電力レーダーの技術基準において今回変更される要素、つまり占有周波数帯幅の拡張が、他の無線システム(電波天文業務及び 80GHz 帯高速無線伝送システム)との共用・共存関係にどのように影響するかについて検討を行うものとする。

3-3 高度化による帯域内の与干渉

帯域内においては、占有周波数帯幅が 500MHz から 1GHz に拡大してもレーダーから発射される総電力(空中線電力 0.01W 以下)は変わらない為、レーダーからの 1MHz 当りの与干渉電力は半分になる。つまり、干渉の影響を軽減する方向に作用する。

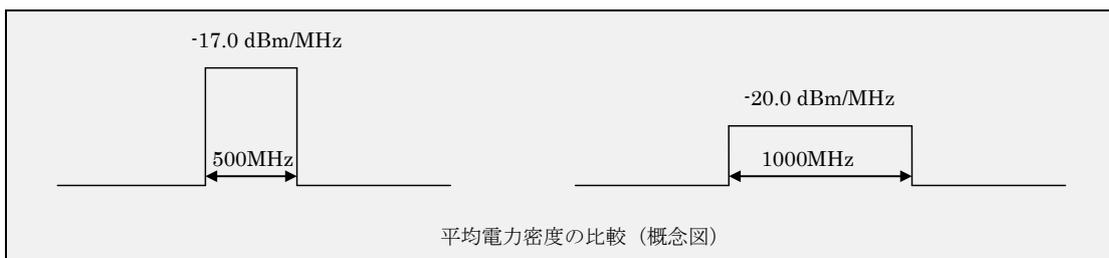
ここで、レーダーから発射される総電力の最大値(空中線電力 0.01W)の 99% (9.9mW) が 500MHz の占有周波数帯幅に様に分散していると仮定すると、1MHz 当りの与干渉電力(平均電力密度)は、

$$10 \times \log(9.9mW) - 10 \times \log(500MHz) = -17.0 dBm / MHz$$

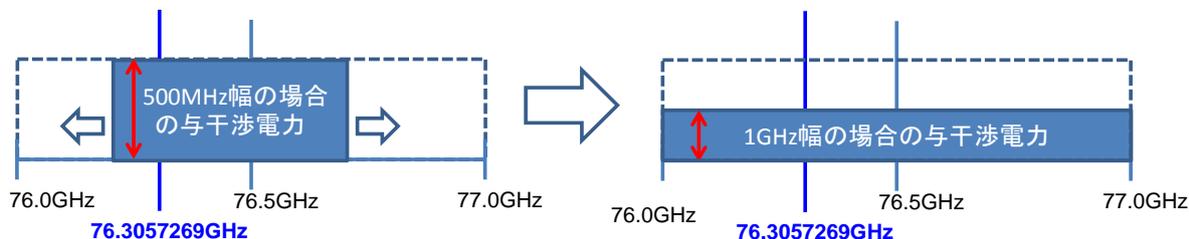
となる。一方、レーダーから発射される総電力の最大値(空中線電力 0.01W)の 99% が 1000MHz の占有周波数帯幅に様に分散していると仮定すると、1MHz 当りの与干渉電力(平均電力密度)は、

$$10 \times \log(9.9mW) - 10 \times \log(1000MHz) = -20.0 dBm / MHz$$

となり、1MHz 当りの与干渉電力(平均電力密度)は 3dB 低減する。



国立天文台から提示された観測周波数 76.3057269GHz の電波天文観測への影響についても、現行の技術基準である 500MHz の占有周波数帯幅の許容値においても指定周波数帯 (76.0 ~ 77.0 GHz) の 1GHz の範囲で 500MHz 幅を自由に設定することができることから、干渉の影響が増加することはないと言える。



3-4 高度化による帯域外の与干渉

76GHz 帯レーダーの現行の技術基準において帯域外の不要発射の強度の許容値は、無線設備規則（昭和 25 年 11 月 30 日電波監理委員会規則第十八号）別表第三号（第 7 条関係）に定められており、これらの値は 960MHz を超える 10W 以下の無線設備に適用されている。

帯域外領域における スプリアス発射の強度の許容値	100 μ W 以下
スプリアス領域における 不要発射の強度の許容値	50 μ W 以下

※ 参照帯域幅は 1MHz。

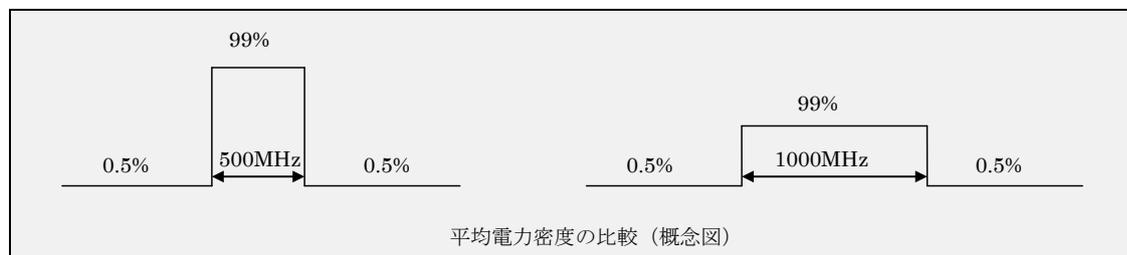
帯域外領域およびスプリアス領域の範囲も同別表第三号（第 7 条関係）に定められている。

周波数範囲	必要周波数帯幅の条件	帯域外領域及びスプリアス領域の 境界の周波数
$f_c > 26 \text{ GHz}$	$BN < 1 \text{ MHz}$	$f_c \pm 2.5 \text{ MHz}$
	$1 \text{ MHz} \leq BN \leq 500 \text{ MHz}$	$f_c \pm 2.5 BN$
	$BN > 500 \text{ MHz}$	$f_c \pm (1.5 BN + 500 \text{ MHz})$

「BN」とは、帯域外領域及びスプリアス領域の境界の周波数を算出するために用いる必要周波数帯幅をいう。この場合における必要周波数帯幅は、占有周波数帯幅の許容値とする。ただし、指定周波数帯が指定されているものの必要周波数帯幅は、指定周波数帯の値とすることができる。76GHz 帯レーダーの現行の技術基準の占有周波数帯幅の許容値 500MHz においても、指定周波数帯が指定されているので指定周波数帯 1GHz を適用し、BN=1GHz で、帯域外領域の範囲が算出され、以下の算出結果を得る。

74.5 GHz 以上 76.0 GHz 未満 および 77.0 GHz 超 78.5 GHz 以下

占有周波数帯幅が 500MHz から 1GHz に拡大してもレーダーから発射される総電力（空中線電力 0.01W 以下）は変わらない為、99%の電力範囲の定義から算出される不要発射の電力の最大値（片側 0.5%=0.05mW）も変化しない。



80GHz 帯高速無線伝送システム作業班においては、ITU-R 勧告(M.2057)に記載の Radar A のパラメータを用いて、76GHz 帯レーダーから 80GHz 帯高速無線伝送システムへの干渉の影響が検討され、サイトエンジニアリング対応により、76GHz 帯レーダーと共存可能との結論が出ている（18 頁参照）。

なお、検討に用いられた Radar A は、国内法の規格値ではないが、昨今の自動車産業のグローバル化の状況においては、国際標準である ITU-R 勧告値に準拠する 76GHz 帯レーダーが国内にも導入されるものと考えられる。図 3-2 は、国内法の技術基準と国際規格を图示したものである。

国内法の技術基準				ITU-R規格 ¹⁾	欧州規格 ETSI EN 301 091
給電点	e.i.r.p.	60dBm	(1kW)	e.i.r.p.	
	最大電力 50dBm	50dBm	(100W)	最大電力 55dBm	
	↑			↓	
	空中線利得 40dBi	40dBm	(10W)	空中線利得 45dBi	
		30dBm	(1W)		
		20dBm	(100mW)		
	最大電力 10dBm	10dBm	(10mW)		
		0dBm	(1mW)	帯域外輻射	0dBm/MHz
帯域外領域 スプリアス領域 -10dBm/MHz		-10dBm	(100μW)	73.5 GHz ~ 76.0 GHz、77.0 GHz ~ 79.5 GHz	
但し、99%の電力範囲の規定により片側の不要発射の電力の積算値が片側に許容される電力(10mWの0.5% = 50μW)を超えてはならない		-20dBm	(10μW)		
		-30dBm	(1μW)	スプリアス輻射	-30dBm/MHz
		-40dBm	(0.1μW)	~ 73.5 GHz、79.5 GHz ~	
		-50dBm	(0.01μW)		
		-60dBm	(0.001μW)		

1) Recommendation ITU-R M. 2057-0 (02/2014) Systems characteristics of automotive radars operating in the frequency band 76-81 GHz for intelligent transport systems applications の Table 1 の中の Radar A

図 3-2 76GHz 帯レーダーの国内法の技術基準と国際規格との比較

3-5 76GHz 帯レーダーが被干渉となる場合

80GHz 帯高速無線伝送システム作業班においては、80GHz 帯高速無線伝送システムから76GHz 帯レーダーへの干渉は特段問題にならないとの結論が出ている。(18 頁参照)

その80GHz 帯高速無線伝送システム作業班における検討では、76.25~76.75GHz の500MHz の占有周波数帯幅の76GHz 帯レーダーを想定して検討された。ここで、76.00~77.00GHz の1GHz の占有周波数帯幅で計算すると干渉量は2dB 程度増加するが、80GHz 帯高速無線伝送システム側の3dB 程度の製造マージンによる干渉低減があることから、占有周波数帯幅の1GHz 化を行っても76GHz 帯レーダーへの干渉は特段問題にならないと考えられる。

なお、500MHz 以下の占有周波数帯幅で、使用周波数帯域が76.00GHz に近い製品の場合には干渉量が増加することが想定されることから、このことに関係者が十分留意しつつ、システム検討等が行われる必要がある。

3-6 76GHz 帯レーダー間の相互干渉

76GHz 帯レーダーとして既に実用化されている既存のレーダー(占有周波数帯幅 500MHz 以下)と今回の高度化によるレーダー(占有周波数帯幅 1GHz 以下)が混在する場合の各種組合せにおける相互干渉については、参考資料2の検討結果の例に示されるように、既存のレーダー(占有周波数帯幅 500MHz 以下)のみが存在する場合のレーダー間干渉レベルに比べて高くなるとは言えない。

76GHz 帯レーダーが受ける可能性のあるレーダー間干渉については、既存レーダーにおいても、干渉の影響を除去するための種々の手段がそのレーダー要素機能として既に実用化されている。今後、76GHz 帯レーダーの普及率が一層上昇することが予想されるが、そのような中であっても干渉除去機能の有効性が維持されるよう、関係者において普及状況の推移をみながら十分留意していく必要がある。

また、今回の高度化によるレーダーについても、その製品化にあたっては、干渉除去技術の更なる向上に努めるなど、十分な相互干渉除去の機能を確保することが必要である。

参考：車載レーダーから 80GHz 帯高速無線伝送システムへの干渉検討

(引用元：陸上無線通信委員会報告「業務用陸上無線通信の高度化等に関する技術的条件」のうち、「80GHz 帯高速無線伝送システムのうち狭帯域システムの技術的条件」より一部抜粋)

1) 車載レーダーから 80GHz 帯高速無線伝送システムへの干渉

① 76GHz 帯レーダーの 73.5-76GHz における干渉電力値

e. r. p. 0dBm/MHz の空中線入力端子換算値-27.9dBm/MHz を用いて積分により干渉電力を求める場合、帯域幅が 31MHz 超となる場合に占有周波数帯幅規定による外片側の総電力量 (送信出力 10dBm-23dB) = -13dBm を超えてしまうことから、e. r. p. 0dBm/MHz を用いた電力推計法による干渉電力値の計算は不適当である。e. r. p. 0dBm/MHz の規定は、輝線状のスペクトラルを想定した規定であると思われることから、今般の干渉電力量の計算では、帯域幅 250MHz 内に輝線スペクトラル総計で e. r. p. 0dBm の放射があり、併せて全帯域幅に e. r. p. -30dBm/MHz の干渉電力があるものと仮定して計算を行った。本計算による総干渉電力は-26.9dBm/250MHz となる。

② 79GHz 帯レーダーの干渉電力値

e. r. p. -30dBm/MHz の空中線入力端子換算値-50.9dBm/MHz から積分により 250MHz 帯幅の干渉電力を求めることとする。本計算による総干渉電力を空中線入力端子値として-33.9dBm/250MHz とする。

レーダー空中線入力端子における干渉波電力を表 3-12 に示す。なお、レーダー干渉波が周波数軸上に一定の電力密度で分布するならば、熱雑音に対する比で評価する場合、チャンネル幅 250MHz で検討した結果を他のチャンネル幅にも適用することが可能である。

表 3-12 レーダー干渉波電力

	Radar A	Radar B, C, E	備考
狭帯域システム帯域内干渉波電力 (dBm)	-26.9	-33.9	帯域幅 250MHz

(中略)

上記検討結果から、狭帯域システムに対する車載レーダーの与干渉は、狭帯域システムのサイトエンジニアリングにより回避可能である。

今回の検討では、被干渉となる狭帯域システムが都市内街路と平行に設置され、与干渉となる車載レーダーの空中線を道路の進行方向に向けている場合を中心に計算した。この場合、被干渉と与干渉がある程度離れた距離のときに、両者の空中線の離角がほぼ 0 度になるために干渉が最も大きくなるとの結果が得られた。このような条件で最大値となる場合には、被干渉側の車載レーダーの空中線は、前方に位置する車両がブロックすることになるので、シングルエントリーでの検討を中心に進めればよいものと考えられる。

一方、狭帯域システムをモバイルバックホール回線等に適用する場合には、建物の屋上への設置など様々な形態が想定され、この形態では比較的近い距離において、両者の空中線の離角がほぼ 0 度になる場合が考えられ得る。しかし、干渉の最大値が比較的近くの距離となることから、狭帯域システムと車載レーダーの位置関係から事前に干渉の発生場所を特定し易いことや、狭帯域システムの空中線指向特性が鋭く、狭帯域システムのサービス自体も被干渉となる車両の遮蔽による影響が考えられることなどから、詳細検討の必然性は比較的低いものと考えられる。

2) 80GHz 帯高速無線伝送システムから車載レーダーへの干渉

以上のように、76GHz 帯あるいは 79GHz 帯レーダーとの技術共存においては、80GHz 帯高速無線伝送システムの使用周波数帯への車載レーダーからの不要発射強度が極端に大きくなるようなことがない限り、これまで述べたサイトエンジニアリング等に対応できると考えられる。また、車載レーダーは、同一周波数帯において連続波方式・間欠波方式それぞれを含む車載レーダーが相当数普及することを前提に、それらが相互に共存可能なように検討が進められていることから、80GHz 帯高速無線伝送システムとの干渉は特段問題にならないものと考えられる。

第4章 76GHz 帯ミリ波レーダーの高度化に関する技術的条件

現行の技術基準のうち、占有周波数帯域幅を下記の通り修正する。

- 占有周波数帯幅の許容値
1GHzであること。

第5章今後の検討課題

検討の過程において、作業班構成員より、帯域外領域におけるスプリアス発射の強度の許容値及びスプリアス領域における不要発射の強度の許容値においても、国際標準（ITU-R M.2057 Table1 RadarA）に合わせる見直しをすべきであり、類似の検討を陸上無線通信委員会 80GHz 帯高速無線伝送システム作業班で実施した検討が参考になる、との指摘があった。

この点については、現状より規制強化につながる方向での変更となること、経過措置の必要性等の検討も含め、既に出荷されている無線機への影響について慎重に検討した上で対応する必要があることなどから、必要に応じて関係企業・利用者のニーズ等を踏まえた上で、今後、必要な検討を実施する必要がある。

IV 検討結果

「76GHz 帯小電力ミリ波レーダーの高度化に関する技術的条件」について別添のとおり取りまとめた。

76GHz 帯小電力ミリ波レーダーの高度化に関する技術的条件

76GHz 帯小電力ミリ波レーダーの技術的条件は、現行の技術基準のうち、占有周波数帯域幅を下記の通り修正することが適当である。

- 占有周波数帯幅の許容値
1GHz であること。

情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 構成員名簿

(平成27年4月1日現在 敬称略・五十音順)

No.	氏名	主要現職	備考
1	主査員 安藤 真	東京工業大学 理事・副学長（研究担当）山岳連携推進本部長	
2	主査代理員 矢野 博之	国立研究開発法人情報通信研究機構ワイヤレスネットワーク研究所所長	
3	専門委員 飯塚 留美	（一財）マルチメディア振興センター 電波利用調査部 研究主幹	
4	” 伊藤 数子	特定非営利活動法人STAND 代表理事	
5	” 大寺 廣幸	（一社）日本民間放送連盟 常勤顧問	
6	” 小笠原 守	日本電信電話(株) 技術企画部門 電波室長	
7	” 加治佐 俊一	日本マイクロソフト(株) 兼マイクロソフトディベロップメント(株)技術顧問	
8	” 唐沢 好男	電気通信大学大学院 情報理工学研究科 教授	第16回まで
9	” 川嶋 弘尚	慶應義塾大学 名誉教授	
10	” 菊井 勉	（一社）全国陸上無線協会 常務理事・事務局長	
11	” 河野 隆二	横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 兼 同大学未来情報通信医療社会基盤センター長	
12	” 小林 久美子	日本無線（株） 研究所 ネットワークフロンティア チームリーダー	
13	” 斉藤 知弘	日本放送協会 放送技術研究所 伝送システム研究部長	
14	” 玉眞 博義	（一社）日本アマチュア無線連盟 専務理事	第17回から
15	” 藤原 功三	（一社）日本アマチュア無線連盟 参与	第16回まで
16	” 本多 美雄	欧州ビジネス協会 電気通信機器委員会 委員長	
17	” 松尾 綾子	（株）東芝 研究開発センター 研究主務	
18	” 三谷 政昭	東京電機大学 工学部情報通信工学科 教授	第17回から
19	委員 森川 博之	東京大学 先端科学技術研究センター 教授	
20	専門委員 矢野 由紀子	日本電気（株） クラウドシステム研究所 シニアエキスパート	
21	” 若尾 正義	元 （一社）電波産業会 専務理事	

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
76GHz 帯小電力ミリ波レーダー高度化作業班 構成員

(敬称略、構成員は五十音順)

氏名	主要現職
主任 やの ひろゆき 矢野 博之	(独) 情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク研究所長
〃 たかだ じゅんいち 高田 潤一	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
構成員 あおき ゆたか 青木 豊	(株) デンソー 研究開発3部 センシングシステム開発室 開発3課 担当課長
〃 あおやぎ やすし 青柳 靖	古河電気工業(株) 研究開発本部 コア技術融合研究所 高周波エレクトロニクス技術センター
〃 あけやま あきら 明山 哲	(一社) 日本アマチュア無線連盟 マイクロ波委員会 委員長
〃 おおた たかし 太田 貴志	日本自動車輸入組合
〃 おおほし ようじ 大橋 洋二	(株) 富士通研究所 ネットワークシステム研究所 先端ワイヤレス研究部 主管研究員
〃 おたけ のぶゆき 小竹 信幸	(一財) テレコムエンジニアリングセンター 企画・技術部門 技術グループ 担当部長
〃 かきはら まさき 柿原 正樹	(一社) 日本自動車工業会 ITS技術部会 委員
〃 こうの たかひろ 河野 隆宏	(独) 宇宙航空研究開発機構 周波数管理室 室長
〃 さいとう まさお 齋藤 正雄	国立天文台 野辺山宇宙電波観測所長
〃 しんぎょうじ まさひと 新行内 誠仁	(株) 本田技術研究所 四輪R&Dセンター 第12技術開発室 第2ブロック 主任研究員
〃 せがわ くらぞう 瀬川 倉三	(一社) 電波産業会 研究開発本部 ITSグループ 担当部長
〃 たかた ひとし 高田 仁	(一社) 日本民間放送連盟 企画部 主幹
〃 なかざわ すずむ 中澤 進	日本放送協会 伝送システム研究部 専研
〃 ひろせ としゆき 廣瀬 敏之	コンティネンタルオートモーティブ(株) ビジネスユニットADAS RFマスタースペシャリスト
〃 ふじもと ひろし 藤本 浩	日産自動車(株) 第一電子技術開発本部 IT&ITS開発部 ITS開発グループ
〃 ふじもと よしのり 藤本 芳宣	日本電気(株) モバイルワイヤレスソリューション事業部 テクニカルアドバイザー
〃 ほそかわ ひとし 細川 均	ボッシュ(株) テクニカルセンター長 ゼネラルマネージャー
〃 みなみ よしあき 南 義明	トヨタ自動車(株) 制御システム先行開発部 第2制御システム先行開発室 主任
〃 やまだ まさや 山田 雅也	住友電気工業(株) インフォコミュニケーション・社会システム研究開発センター
〃 よしとみ さだゆき 吉富 貞幸	(株) 東芝 セミコンダクター&ストレージ社

補足説明

80GHz 帯高速無線伝送システムから車載レーダーへの干渉

陸上無線通信委員会報告「業務用陸上無線通信の高度化等に関する技術的条件」のうち「80GHz 帯高速無線伝送システムのうち狭帯域システムの技術的条件」のP22の図2-2のようなチャンネル配置の76.0GHzに近いチャンネルからの帯域外放射電力が76.5GHz帯レーダーへの干渉電力として検討された。



図 2-2 狭帯域システム制度化初期のチャンネル配置案

同報告資料のP51の図3-18の左図に76.0~77.0GHzの帯域外放射電力の電力マスクが示されており、表3-13に76.25~76.75GHzの500MHzの占有周波数帯幅の76GHz帯レーダーへの与干渉電力が算出されており、2000MHz Ch2が最大の干渉電力となった。

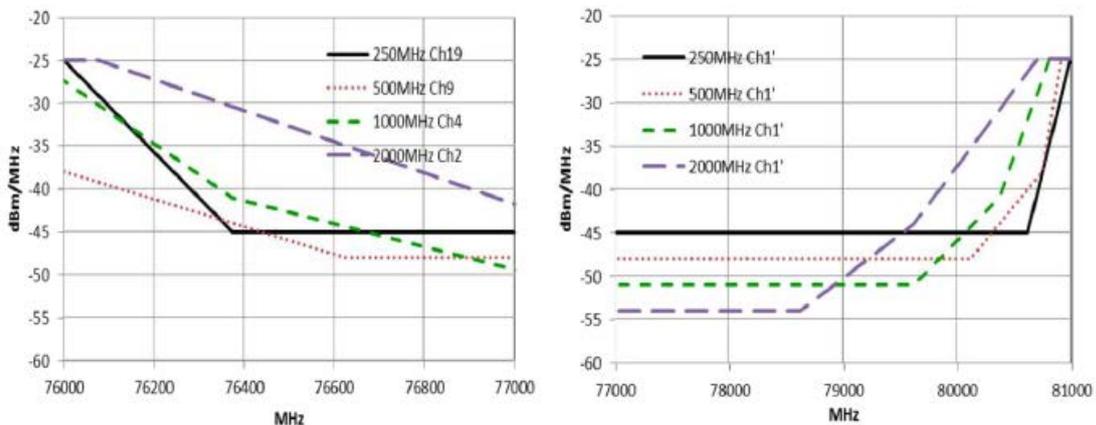


図 3-18 レーダー帯域干渉波スペクトル

表 3-13 与干渉狭帯域システムパラメータ

80GHz チャンネル帯幅 (MHz)	250	500	1000	2000	備考
チャンネル番号	Ch19	Ch9	Ch4	Ch2	低群上端チャンネル
Radar A 帯域総電力 (dBm)	-16.7	-18.3	-17.5	-4.9	76.25~76.750GHz
等価雑音帯域内電力 (dBm)	-61.0	-61.3	-60.5	-47.9	25kHz
チャンネル番号	Ch1'	Ch1'	Ch1'	Ch1'	高群下端チャンネル
Radar 帯域総電力 (dBm)	-4.7	-4.9	-1.3	2.2	78~81GHz
等価雑音帯域内電力 (dBm)	-57.4	-57.6	-54.1	-50.5	16kHz

ここで、76.25~76.75GHz の 500MHz の占有周波数帯幅の場合と 76.00~77.00GHz の 1GHz の占有周波数帯幅の場合の与干渉電力を比較すると 1.8dB 増加する。(下表)

80GHz チャンネル帯幅 (MHz)	2000		備考
チャンネル番号	Ch2		低群上端チャンネル
レーダー受信帯域 (GHz)	76.25-76.75	76.0-77.0	
レーダー占有周波数帯幅 (MHz)	500	1000	
Radar A 帯域総電力 (dBm)	-4.9	-0.4	
等価雑音帯域内電力 (dBm)	-47.9	-46.1	25kHz
干渉電力の増加 (dB)	-	1.8	

同報告資料 P52 には、80GHz 帯高速無線伝送システム側には一般に規格保証のため 3dB 程度の製造マージンを含んでいるとの記載があり、その製造マージンにより 3dB 程度までの干渉電力超過分は低減できることにより、80GHz 帯高速無線伝送システムから 76GHz 帯レーダーへの干渉は、本作業班で改正される占有周波数帯幅の 1GHz 化によっても特段問題にならないと考えられる。

76GHz 帯レーダー間の干渉検討

76.0-77.0GHzの周波数帯域内で、占有周波数帯幅を現在の500MHzから1GHzに拡大することによる76GHz帯レーダー間の干渉、特に、500MHz以下のレーダー（Nレーダーと呼ぶ）と1GHz以下のレーダー（Wレーダーと呼ぶ）間の相互干渉のレベルを、その一例としてNレーダー、Wレーダー共に最も一般的に使われているFMCWの場合を例として検討する。

1. レーダーモデルと干渉モデル

図1は、76GHz帯レーダーの典型的な構成を示す。

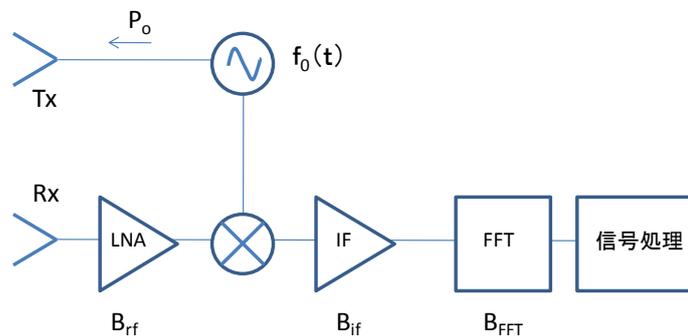


図1. 76GHz帯レーダーの典型的な構成

図2は干渉検討で想定するNレーダーとWレーダーの周波数スイープの様子を模式的に示している。

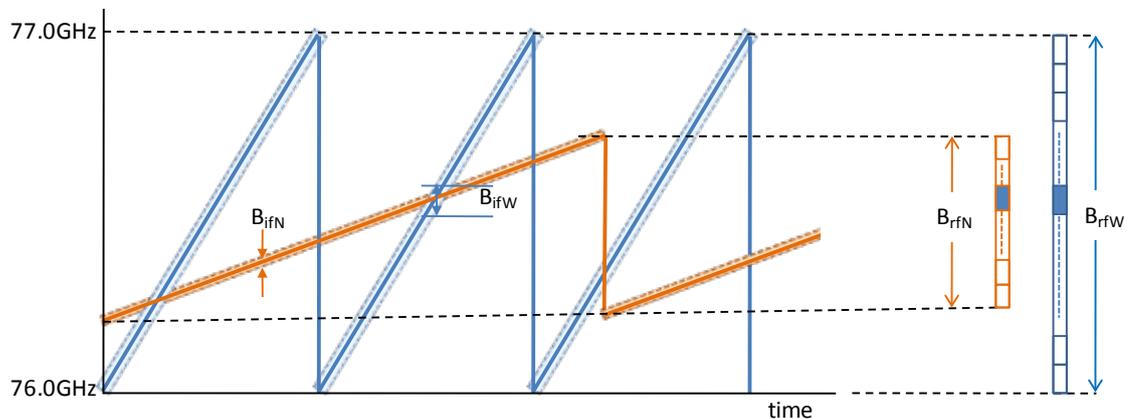


図2. NレーダーとWレーダーの周波数スイープ

例えば、Wレーダーの標的検知のための出力IF信号に対する干渉信号の出現は、干渉源レーダー（ここではNレーダー）の瞬時周波数が、Wレーダーの瞬時周波数 $f_0(t)$ とWレーダーのIF周波数帯域 B_{ifW} の範囲内で一致した時に起こる。（図2において、NレーダーとWレーダーの周波数が交差する周波数/時間区間）

両レーダーは、完全独立非同期系であるため、干渉波信号は、Wレーダーにおける検知すべき標的からの反射信号（Desired Signal）に対して、IF帯域内の雑音信号としてNoise Floorを上昇させるとするモデルが妥当である。

2. 干渉確率

干渉確率を概略計算するため、Wレーダーの周波数スイープ帯域 B_{rfW} 及びNレーダーの周波数スイープ帯域

B_{rfN} を各々のIF周波数帯域を単位とする周波数ブロックに分解して考える。更に、Wレーダーは、76.0-77.0 GHzの全帯域を占有すると仮定する。

2-1. W→N 干渉

Wレーダーの瞬時周波数がNレーダーのrf帯域外にある期間は干渉が生じず、また、Wレーダーの瞬時周波数がNレーダーのrf帯域内にある場合には、各IF周波数幅ブロック内に存在する確率は、完全独立非同期系のため一様となり、全体としての干渉確率は式(1)の様に表わされる。

$$P_{rob}^{W \rightarrow N} = \frac{B_{rfN}}{B_{rfW}} * \frac{B_{ifN}}{B_{rfN}} \quad (1)$$

2-2. N→W 干渉

Nレーダーの周波数スイープ帯域が、Wレーダーの周波数スイープ帯域に内包される場合、Nレーダーのスイープ周波数範囲では常に干渉の可能性があるが、その帯域外では干渉は存在しないため、全体としての干渉確率は式(2)のようになる。

$$P_{rob}^{N \rightarrow W} = \begin{cases} \frac{B_{ifW}}{B_{rfN}} & \text{when } f_{oW}(t) \text{ is within } B_{rfN} \\ 0 & \text{when } f_{oW}(t) \text{ is outside } B_{rfN} \end{cases} \quad (2)$$

2-3. N→N 干渉

Wレーダーの導入による干渉レベルを議論する場合に、その基準となる既存レーダー間(N→N)の干渉確率を参考として式(3)に示す。

$$P_{rob}^{N \rightarrow N} = \begin{cases} \frac{B_{ifN}}{B_{rfN}} & \text{in the overlapped frequency range within } B_{rfN} \\ 0 & \text{outside the overlapped range in } B_{rfN} \end{cases} \quad (3)$$

3. 干渉電力(密度)

干渉源レーダーが被干渉レーダーに与える干渉電力(密度) P_I は、式(1)(2)の干渉確率と干渉源レーダーからの送信電力の積として求められる。

3-1. W→N 干渉

$$P_I^{W \rightarrow N} = \alpha * \frac{P_{oW} * B_{if}}{B_{rfW}} * \left(\frac{B_{rfN}}{B_{rfW}} * \frac{B_{if}}{B_{rfN}} \right) \quad (4)$$

ここで、 α は干渉源レーダーと被干渉レーダーとの相対位置などで決まる定数であり、また、単位帯域あたりの電力とするため $B_{ifW} = B_{ifN} = B_{if}$ とした。

3-2. N→W 干渉

$$P_I^{N \rightarrow W} = \begin{cases} \alpha * \frac{P_{oN} * B_{if}}{B_{rfN}} * \frac{B_{if}}{B_{rfN}} & \text{when } f_{oW}(t) \text{ is within } B_{rfN} \\ 0 & \text{when } f_{oW}(t) \text{ is outside } B_{rfN} \end{cases} \quad (5)$$

実際のレーダーにおける信号処理は、周波数1スweepまたはその整数倍を単位として行われるため、周波数スweepあたりの平均干渉電力(密度)は式(5)となる。

$$\text{avrg}(P_I^{N \rightarrow W}) = \alpha * \frac{P_{oN} * B_{if}}{B_{rfN}} * \frac{B_{if}}{B_{rfN}} * \frac{B_{rfN}}{B_{rfW}} \quad (6)$$

今、 $B_{rfN} = 500\text{MHz}$, $B_{rfW} = 1\text{GHz}$, $P_{oW} = P_{oN} = 10\text{mW}$ と仮定すると、式(4)、(5)、(6)より以下のことがわかる。

- 1) NレーダーよりWレーダーへの干渉電力は、Nレーダーの周波数帯域と重なるWレーダーの周波数スweep期間では、WレーダーよりNレーダーへの干渉に比べて、統計的に6dB高くなる。(式5と式4)
- 2) Wレーダーの全周波数スweep期間でのNレーダーからの平均干渉電力は、WレーダーよりNレーダーへの干渉に比べて、統計的に3dB高くなる。(式6と式4)

4. N→N 干渉を基準とした干渉電力(密度)

ここでは、干渉電力(密度)がより高くなるN→W干渉電力を、 $B_{rfN} = 500\text{MHz}$ の場合の既存のNレーダー間の干渉(N→N)と比較する。

式(3)を用いて、式(5)の導出と同様の議論により、N→N干渉電力は式(7)となる。

$$P_I^{N \rightarrow N} = \begin{cases} \alpha * \frac{P_{oN} * B_{if}}{B_{rfN}} * \frac{B_{if}}{B_{rfN}} & \text{in the overlapped frequency range within } B_{rfN} \\ 0 & \text{outside the overlapped range in } B_{rfN} \end{cases} \quad (7)$$

従って、周波数がオーバーラップする帯域内をスweep期間中の干渉電力は、N→Wの場合と同じとなる(式5)。全周波数スweep期間での平均干渉電力は、オーバーラップ周波数帯域 ΔB_{rfN} の関数となり、式(8)となる。

$$\text{avrg}(P_I^{N \rightarrow N}) = \alpha * \frac{P_{oN} * B_{if}}{B_{rfN}} * \frac{B_{if}}{B_{rfN}} * \frac{\Delta B_{rfN}}{B_{rfN}} \quad (8)$$

今、 $\Delta B_{rfN} = 250\text{MHz}$ (オーバーラップ率 50%)の平均的な場合を考えると、平均電力は式(6)で $B_{rfN}/B_{rfW} = 500\text{MHz}/1\text{GHz} = 1/2$ とした場合と同じになる。

従って、N→W干渉電力は、N→Nの場合に比べて高くなるとは言えない。

また、第3節で述べた如く、W→N干渉電力はN→W干渉電力より3dB低いいため、W→N干渉の問題はより小さい。

5. Wレーダーの被干渉率の低減法

上記の議論より、N→W干渉電力は、N→Nの場合に比べて高くなるとは言えないが、Wレーダーの被干渉率の低減方法として以下が考えられる。

- 1) 干渉信号雑音が存在する周波数スweep区間を除いたFFT信号処理:

実用状態では、Wレーダーの周波数スweep全区間で干渉を受けないので、劣化区間の信号を廃棄してS/N改善。

- 2) 周波数スweepのタイミングまたはスロープのシフト:

干渉源レーダーと周波数スweepのスロープが近い時に有効。干渉源レーダー信号との瞬時周波数差を

常に IF 帯域以上離す方向。

(W レーダーでは、周波数シフトは規定周波数内できにくいので時間軸でずらす)

3) 積分効果による S/N 比改善 (\sqrt{n} 倍効果):

3-1) 複数(n)の周波数スイープ周期にわたる FFT

3-2) Grid mapping

4) 検知処理アルゴリズムの改善:

Detect/Qualify/Tracking による false 信号除去と精度向上

その他の従来より使われているハード・ソフト面での干渉低減法、S/N 向上手法も適用可能である。

以上