

レーダシステムの動向等と他の既存無線システム との周波数共用・共存に関する検討

1. レーダシステムに関する最近の動向

1-1 車載センシングシステムの動向

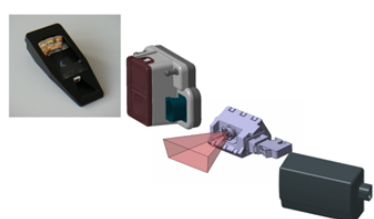
近年、ドライバーの高齢化などにより、安全運転に対する意識が高まっている。このような状況の中で、先進運転支援システムが低価格で提供されることとなり、急速に普及が進むきっかけとなった。先進運転支援システムの中でも特に先進緊急ブレーキシステム（AEBS: Advanced Emergency Braking System、以下 AEBS とする）および車間距離制御装置（ACC: Adaptive Cruise Control、以下 ACC とする）への関心が高い。この AEBS や ACC のセンサーとして、長い間使用されているのが 76GHz 帯ミリ波レーダである。近年はステレオカメラやレーザレーダ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下表の通りである。

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、ステレオカメラ、 レーザレーダ (30km/h 以下)
車間距離制御装置（ACC）	76GHz レーダ、ステレオカメラ、単眼カメラ
全車速域 ACC	76GHz レーダ+カメラ、ステレオカメラ
後側方障害物警報	24GHz レーダ、カメラ 79GHz レーダ (開発中)
歩行者認識	ステレオカメラ、76GHz レーダ+単眼カメラ 79GHz レーダ (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 帯ミリ波レーダ以外にカメラやレーザーレーダ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 帯レーダを採用している。

このような技術の核と言う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 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、レーダのみ、カメラとレーダの組み合わせ等、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 24/26GHz & 70GHzレーダ	長距離レーダ 76GHzレーダー	近赤外線センサー	超音波センサー	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

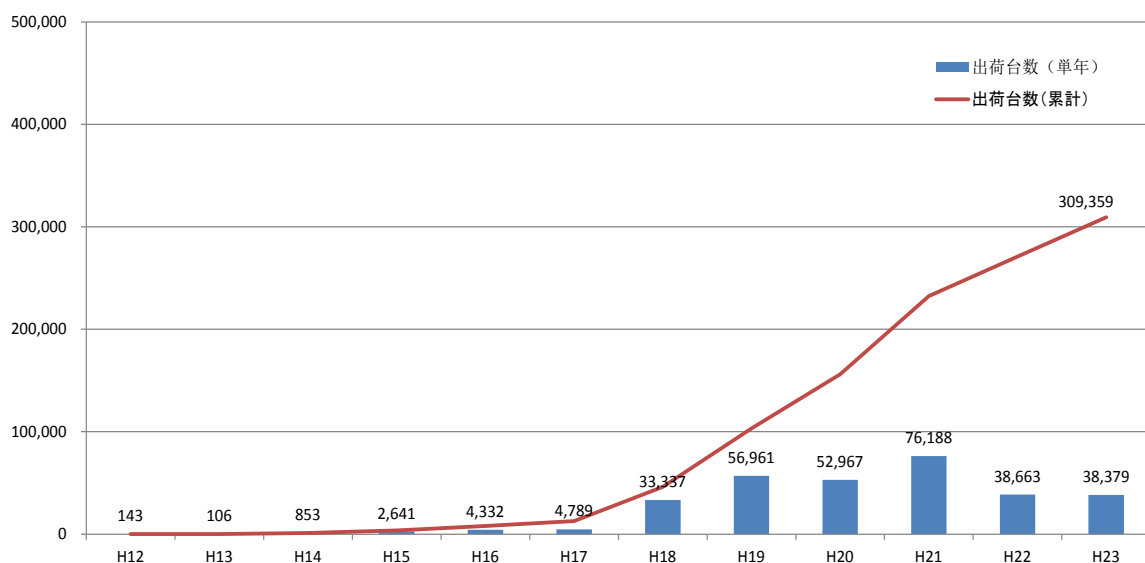
情報提供：独ダイムラー社

図 1 他の車載センサー技術との比較

1-2 電波によるレーダシステムの導入経緯、現状

日本における電波によるレーダシステムは、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で既に報告された 60GHz 帯の小電力ミリ波レーダに追加する形で、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は長距離（200m 超）車載レーダ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 2 に 76GHz 帯ミリ波レーダ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 2 76GHz 帯ミリ波レーダの普及状況

24GHz 帯（24.05-24.25GHz）も車載レーダ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、これまで無線標定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。

1-3 ミリ波レーダの技術動向

我が国で 76GHz 帯ミリ波レーダ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 帯ミリ波レーダの占有周波数帯幅を 500MHz から 1GHz に広げた場合、縦・横・高さの方向の物体検出の精度が倍増する。

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では、障害物検出の信頼度が上がり、AEBS が誤って作動してしまう可能性（誤作動の可能性）や作動すべきときに作動しない可能性（不作動の可能性）を減らすことができ、AEBS の予防安全効果の向上が期待される。

1-4 各国の76GHz帯レーダの制度化状況

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帯レーダが長距離（200m超）車載レーダの国際標準となっている。図3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3 76GHz帯ミリ波レーダを利用可能な地域

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

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)	75	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 帯レーダが導入されてきたため、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。

2. 占有周波数帯幅拡張後の 76GHz 帯レーダと他システムとの関係

2-1 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。

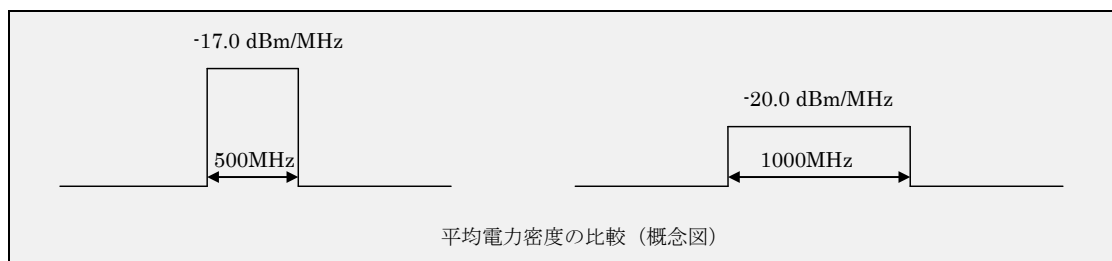
ここで、レーダから発射される総電力の最大値（空中線電力 0.01W）の 99%（9.9mW）が 500MHz の占有周波数帯幅に一樣に分散していると仮定すると、1MHz 当りの与干渉電力（平均電力密度）は、

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

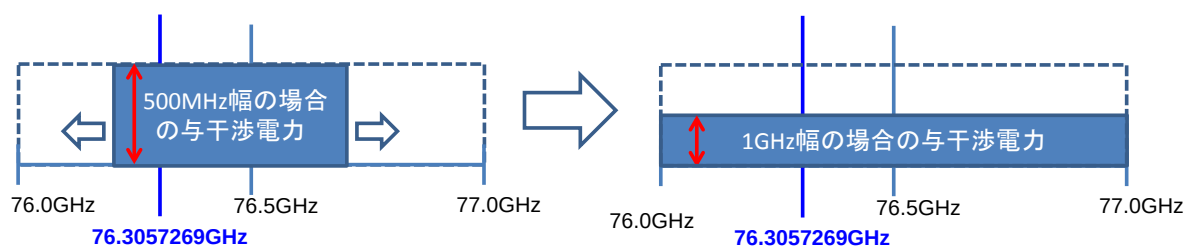
となる。一方、レーダから発射される総電力の最大値（空中線電力 0.01W）の 99% が 1000MHz の占有周波数帯幅に一樣に分散していると仮定すると、1MHz 当りの与干渉電力（平均電力密度）は、

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

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 の占有帯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。



2-2 高度化による帯域外の与干渉

76GHz 帯レーダ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（昭和二十五年十一月三十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。

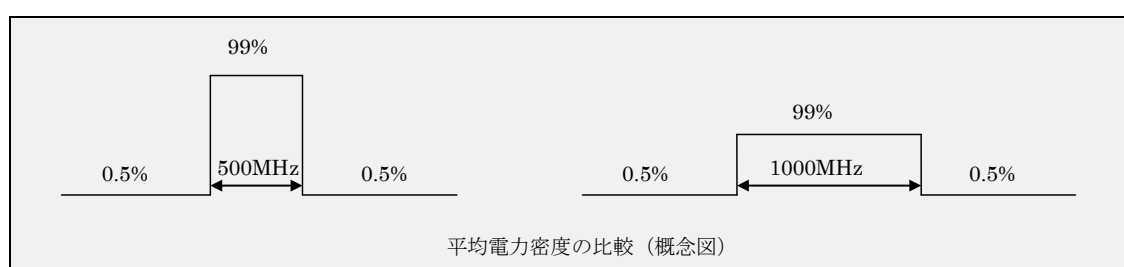
帯域外領域およびスプリアス領域の範囲も同別表第三号（第7条関係）に定められている。

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
$f_c > 26\text{GHz}$	$BN < 1\text{MHz}$	$f_c \pm 2.5\text{MHz}$
	$1\text{MHz} \leq BN \leq 500\text{MHz}$	$f_c \pm 2.5BN$
	$BN > 500\text{MHz}$	$f_c \pm (1.5BN + 500\text{MHz})$

「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 帯レーダと共存可能との結論が出ている（次頁参照）。

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 帯レーダが国内にも導入されるものと考えられる。図 4 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
スプリアス領域 -13dBm	帯域外領域 -10dBm	-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% = 50 μW)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 4 76GHz 帯レーダの国内法の技術基準と国際規格との比較

2-3 76GHz 帯レーダ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 帯レーダへの干渉は特段問題にならないとの結論が出ている。(11 頁参照)

参考：車載レーダから 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) 車載レーダから 80GHz 帯高速無線伝送システムへの干渉

① 76GHz 帯レーダの 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への干渉

以上のように、76GHz 帯あるいは 79GHz 帯レーダ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で対応できると考えられる。また、車載レーダは、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。