

ミリ波帯センサーシステムとの干渉検討結果

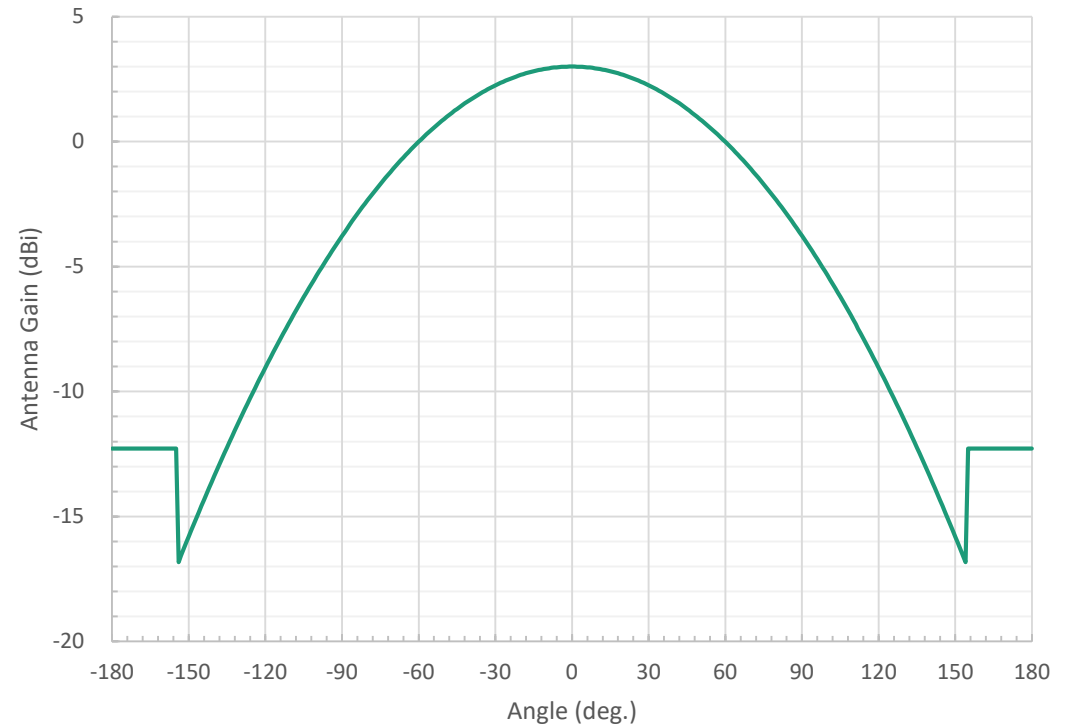
情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会
60GHz帯無線設備作業班（第3回）

2019.7.10 株式会社ディーエスピーリサーチ

与干渉側システム（ミリ波センサーシステム）の占有周波数帯幅について、7GHz以下とする要望があったため、シミュレーション結果の一部修正を合わせて実施した

与干渉側システムの諸元

電波の型式	F3N
変調方式	FMCW
周波数	57 ~ 64 GHz
占有周波数帯幅	7 GHz以下
空中線電力	10 mW
等価等方輻射電力	+13 dBm
空中線半値角	+ / - 60 deg.
デューティーサイクル	3.3 / 29.7 msec. (MAX.)
キャリアセンス機能	実装無し



ミリ波センサーシステムのアンテナパターン（シミュレーション）

Beam= 120 [deg.], G= 3 [dBi], Sidelobe= 154 [deg.], -16.83 [dBi]

本検討における与干渉側システムについては、特定小電力機器の種別に「ミリ波帯レーダー用」（60~61GHz帯）のカテゴリがあるため、区別するために「ミリ波センサーシステム」（57~64GHz帯を予定）と表記する

57.0～66.0GHz 小電力データ通信システム データ・画像伝送（WiGigなど）（屋内利用）の干渉検討手順等

ミリ波帯センサーシステムにはキャリアセンス機能の実装を想定していないため、他のデータ・画像伝送システムの状態（待機中、送受信中など）に関係なく、電波の発射を行う

一方、データ・画像伝送システムが送信を開始しようとする時又は通信終了後から次の通信開始の間に、自らが送信を行おうとする周波数に、他の無線設備からの電波の発射がないことを確認（キャリアセンス機能）してから通信を開始することとなっている

キャリアセンス機能を持たないミリ波帯センサーシステムが送信をした際、データ・画像伝送システムのキャリアセンス機能に影響を与え続ける懸念

複数台のミリ波帯センサーシステムが同時に動作した場合：

ミリ波帯センサーシステムの台数による影響及び所要離隔距離の算出
（連続、複数台の同時送信）



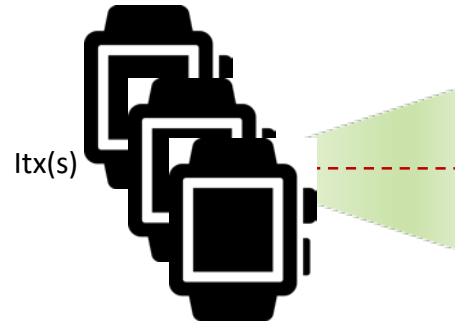
送信デューティサイクル、アンテナビーム幅の要因による所要離隔距離短縮のための検証
（複数台の送信）



データ・画像伝送システムの相互通信時距離対干渉波所要離隔距離の算出
（1対1）

被干渉装置受信アンテナ端での受信電力限度値をキャリアセンスレベル-48dBm に設定し評価

Specification of ITx	
f_{ITx}	60.48 GHz
P_{ITx}	10 dBm
G_{ITx}^{MAX}	3 dBi
Unit #	1, 5, 10



空中線端での受信電力: -48dBm

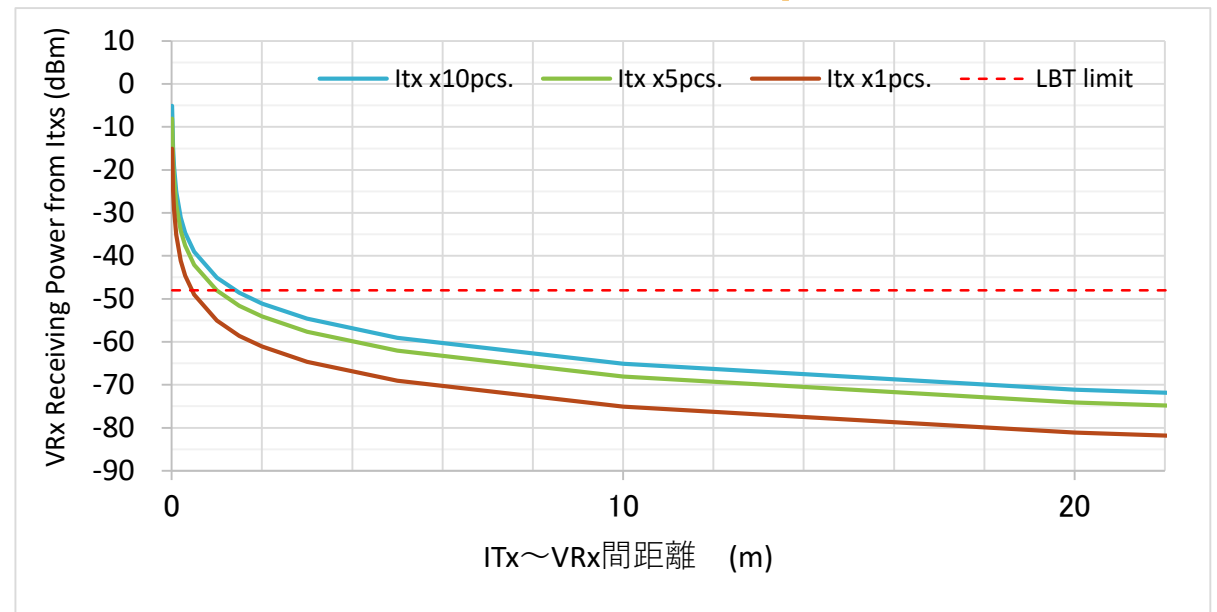
Distance (r)



Specification of VRx	
f_{VRx}	60.48 GHz
BW_{VRx}	2.16 GHz
G_{VRx}^{MAX}	0 dBi *
NF_{VRx}	10 dB
CN_{req}	8.5 dB

Friis Transmission Equation

$$P_r = G_t G_r P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$



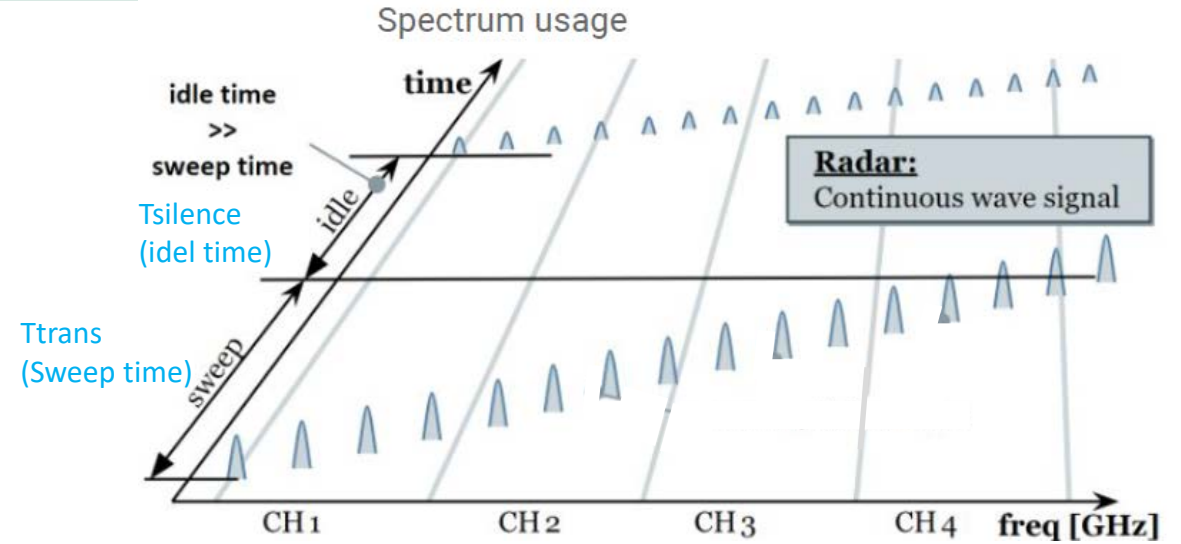
- Itx は、設置台数に限らず、送信電力を台数分積算した。
(各端末の送信タイミングについては考慮していない)

*: VRx のAntenna端面における電力を算出するため、 VRx のアンテナゲインは0dBiとして計算した

検討結果：

与干渉側装置が1台時 0.5m、5台時 1m、10台時 1.5mの離隔距離が必要との結果になったが、実運用では本シミュレーション条件の100%送信は行わないため、送信時間率等について検討を実施する。

- WiGigデバイス(DMG: Directional Multi Gigabit STA)はデバイス同士および他のシステムとの共用を図る為、パケットを送信する前にチャンネル内の信号電力レベルを一定時間 (T_{CCA}) 検知し、チャンネルが空いているかを確認するCCA (Clear Channel Assessment)という手順を実施する。
- 一方、同じ帯域において、Soliはレーダー信号を T_{trans} の間送信し、その後 $T_{silence}$ の間休止することを繰り返す。
- この時、WiGigデバイスはCCAの期間内にSoliの信号を検知して、CCAをクリアできない (CCAがブロックされる) 可能性がある。
- そこで、WiGigデバイスによるCCAがブロックされる確率 $P_{blockage}$ を検討する。検討には以下のパラメータを用いる：



例：Google Soli Radar System

WiGigデバイス(DMG STA)のパラメータ：

- $T_{CCA} = 3 \text{ us}$
- 1チャンネル(BW:2.16GHz)のエネルギーを測定する。

Soliのパラメータ：

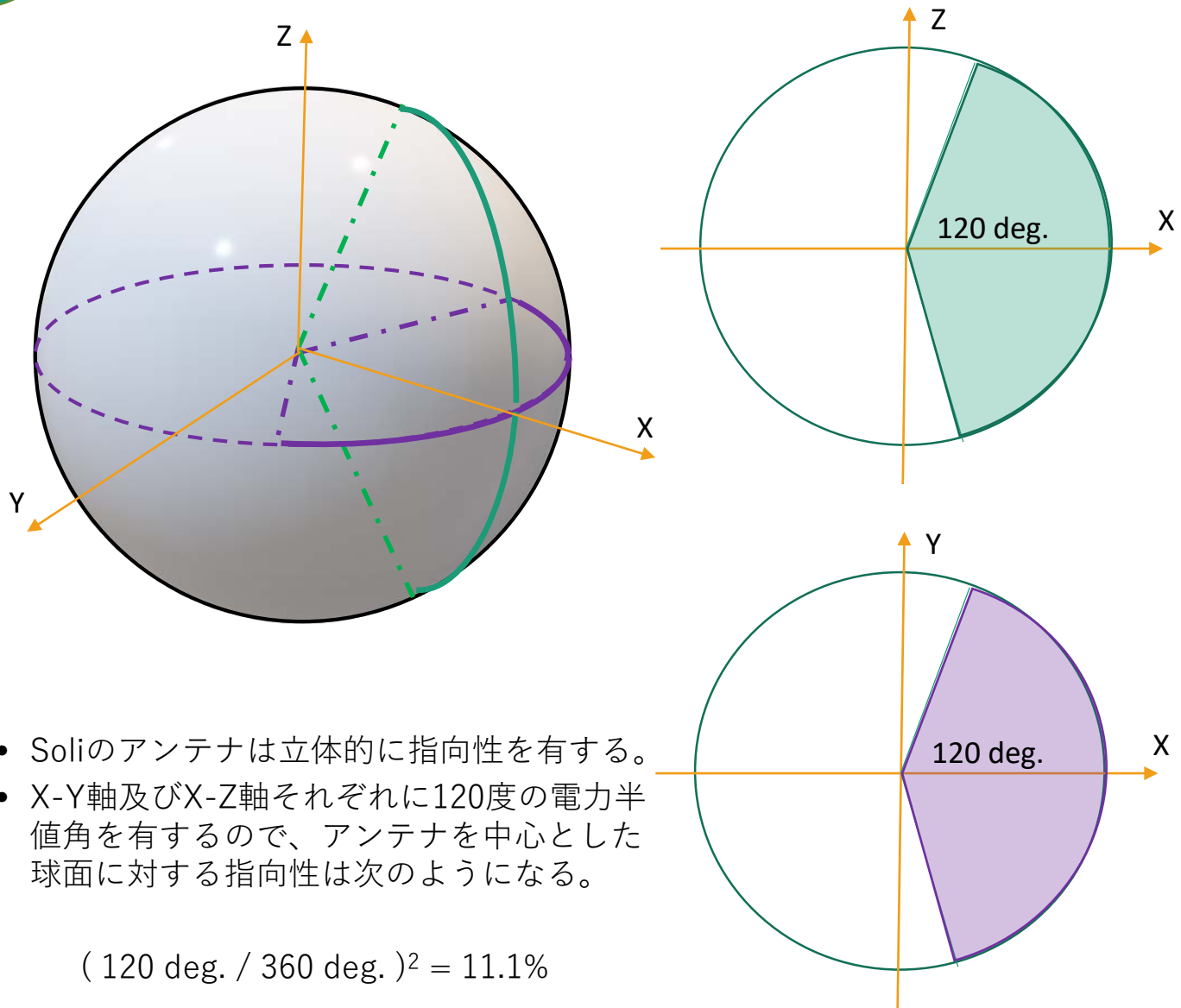
- 最大で57GHzから64 GHzまで (7GHz幅)を T_{trans} 時間でスweepする (FMCW)

- ここで、 T_{CCA} は $T_{trans} + T_{silence}$ より十分に短いので、WiGigデバイスがSoliが使用中のチャンネルを検知する (CCAがブロックされる) 確率は概ね以下の式で表す事ができる。

$$P_{blockage} = \frac{\text{Soli is transmitting in the channel}}{\text{Total interval}} = \frac{T_{trans}}{T_{trans} + T_{silence}} = \text{Duty Cycle}$$

以上から、WiGigデバイスはCCAのプロセスの間、Soliの信号がチャンネル内に存在するときは必ずその信号を検知できるため、CCAがブロックされる確率はDuty Cycleで決まる。

以降の干渉検討においては特に記載しない限り、Duty Cycleを10%として検証を実施する。



- Solaのアンテナは立体的に指向性を有する。
- X-Y軸及びX-Z軸それぞれに120度の電力半値角を有するので、アンテナを中心とした球面に対する指向性は次のようになる。

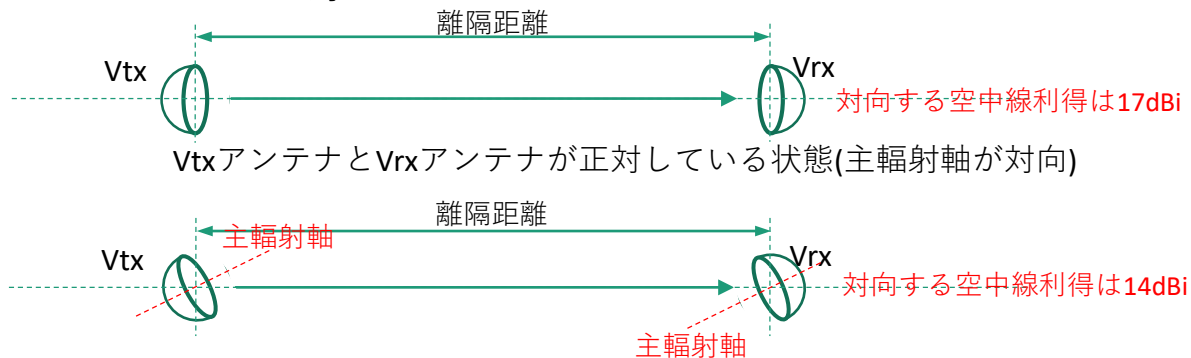
$$(120 \text{ deg.} / 360 \text{ deg.})^2 = 11.1\%$$

- WiGigのCCAがブロックされる確率は、Duty Cycleとアンテナの指向性特性により次のようになる。

$$\text{Duty Cycle} \times \text{アンテナ指向性} \\ = 0.1 \times 0.111 = 0.0111 \text{ より } 1.11\%$$

WiGig通信時における与干渉装置との離隔距離の評価

条件: VTx～VRx: 正対及び電力半値角分ずらした場合
ITx～Irx: 正対



VtxアンテナとVrxアンテナがずれている状態(主輻射軸が半値角分相互にずれ)

Specification of VTx

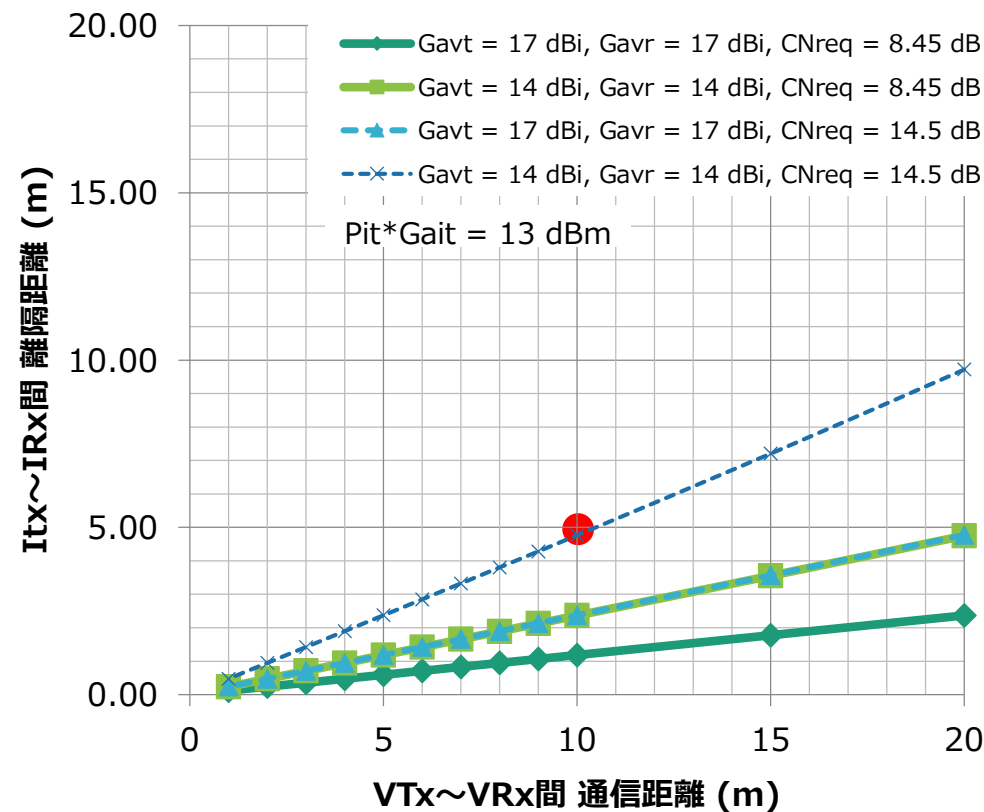
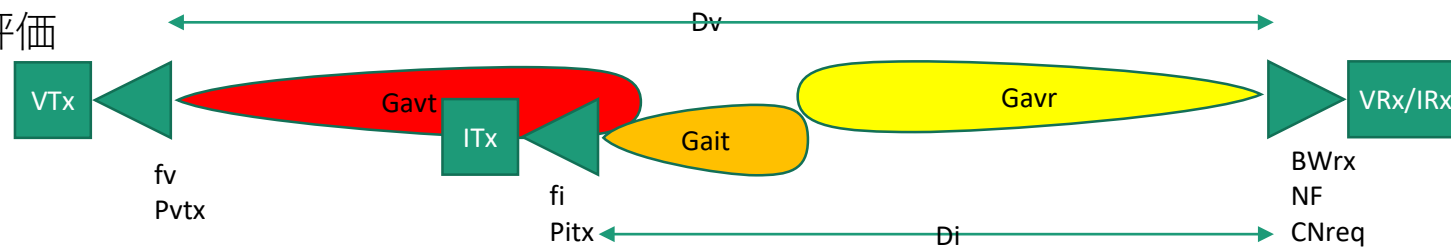
f_{VTx}	60.48 GHz
P_{VTx}	23 dBm
G_{vt}	17, 14 dBi

Specification of ITx

f_{ITx}	60.48 GHz
P_{ITx}	10 dBm
G_{it}	3 dBi

Specification of VRx / IRx

	VRx	IRx
f_{VRx}	60.48 GHz	
BW_{Rx}	2.16 GHz	
G_{vr}	17, 14 dBi	17 dBi
NF_{Rx}	10 dB	
CN_{req}	8.45 dB (16QAM) 14.5 dB (64QAM)	



WiGigの通信距離に対する与干渉装置との所要離隔距離

IEEE 802.11adの仕様

Channel bandwidth and center frequency	2160 MHz 60.48 GHz
Signal bandwidth (-17 dBm transmit mask)	1880 MHz
Symbol rate ("SC chip rate" in 802.11ad)	1760 symbol/s
Symbol duration ("SC chip time" in 802.11ad)	1/1760 MHz = 0.56818 ns
Modulation	$\pi/2$ -BPSK $\pi/2$ -QPSK $\pi/2$ -16QAM $\pi/2$ -64QAM
Physical layer bitrate (no coding)	1760 Mbps 3520 Mbps 7040 Mbps 10560 Mbps
LDPC code rates	1/2, 5/8, 3/4, 13/16, 7/8
LDPC code word size	672 bit
LDPC coding gain (approx.)	Rate 1/2: 6.0 dB 5/8: 4.0 dB Rate 3/4: 3.2 dB 13/16: 2.8 dB 7/8: 2.0 dB
Physical layer bitrate (LDPC encoded data)	1155 Mbps (MCS1) ... 8850 Mbps (MCS12.6)
Block size (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)	448 bit 896 bit 1792 bit 2688 bit
Block duration (encoded data only)	254.55 ns
Golay sequence preceding each block	64 BPSK symbols (64 bit) duration: 36.364 ns
Block duration (LDPC encoded data + Golay)	290.91 ns
Physical layer bitrate (LDPC encoded data + Golay)	385 Mbps (MCS1) ... 8085 Mbps (MCS12.6)

屋内利用のデータ伝送システム（WiGig等）への干渉検討結果

与干渉側装置が被干渉側装置のキャリアセンス時に与える影響： 被干渉側装置のアンテナ端においてキャリアセンスレベル閾値（-48dBm）以上の電力を受ける場合が示唆されるが、シミュレーションは100%連続送信を条件として実施しているため、実環境では送信時間率10%程度であり且つ、アンテナの指向性特性より11.1%程度であることから、実際にはキャリアセンスをブロックする可能性は1.11～11.11%程度となる。

被干渉側装置通信時における干渉の影響： 被干渉側装置が正対せずに通信を行っている状態でも、被干渉側装置の通信距離10m時に、5mの離隔距離が必要との結果となったが、送信時間率及びアンテナの指向性特性から離隔距離は更に短くなる。

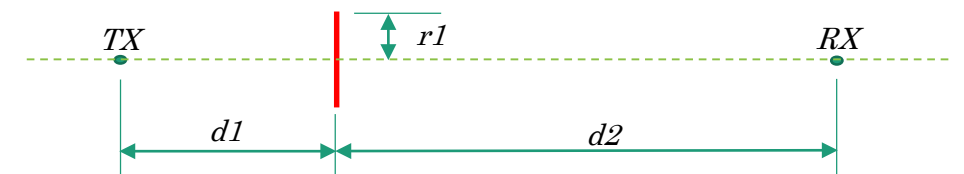
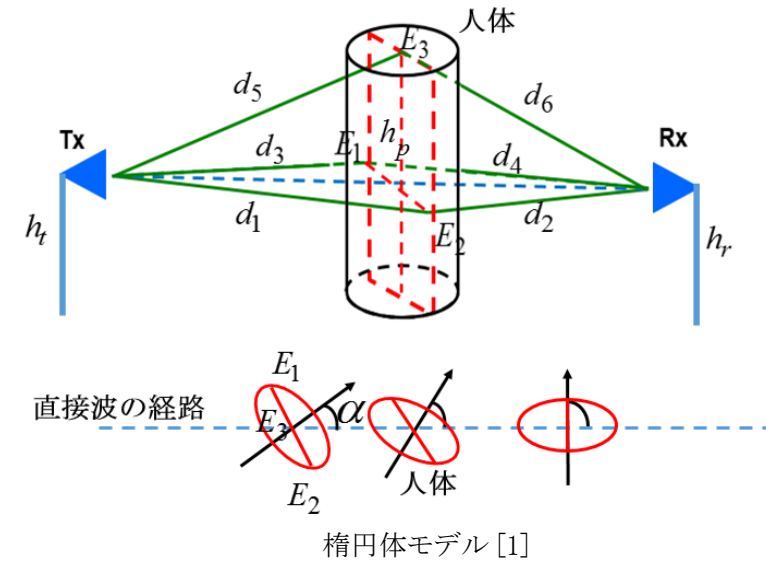
これらの結果から、屋内利用時のデータ伝送端末とは、共存可能と考えられる。

また、実際の通信状態では、ユースケースからも与干渉側装置から発射される電波は人体に向いており、与干渉側装置との間には人体によるシャドローイングの影響が発生する。よって、実際の通信状態では更に離隔距離を短縮することができるものと考えられる。

- ミリ波帯センサーシステムと被干渉側デバイス間に人体が介入することで伝搬損失が発生する。
- 人体によるシャドーイング特性について、人体を楕円体とし、一枚のナイフエッジとして回折損失を近似する計算モデルが提案されている[1]。
- ナイフエッジ回折損失は、フレネルゾーン内に遮蔽物が介入した際の回折損失と同等と考えられる。
- 第1フレネルゾーンが半分遮蔽された際の減衰量は約6dB、全遮蔽された際の減衰量は約16dB[2]。
- 表1にミリ波帯センサーシステム(TX)と人体の距離を20, 50, 100cmと可変した場合の、被干渉側システム(RX)との離隔距離を屋内環境(5, 10, 15, 20m)及び屋外環境(56, 100, 300, 500m)に設定した場合のフレネル半径(r_1)の計算結果を記載する。

設定離隔距離別のフレネル半径の計算結果 (Unit: cm, TX Freq. @ 60.5 GHz)

d1 (cm) \ d1 + d2 (m)	5	10	15	20	56	100	300	500
100	6.3	6.7	6.8	6.9	7.0	7.0	7.0	7.0
50	4.7	4.9	4.9	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0
20	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1



$$r_1 (m) = \sqrt{\lambda * ((d1 * d2) / (d1 + d2))}$$

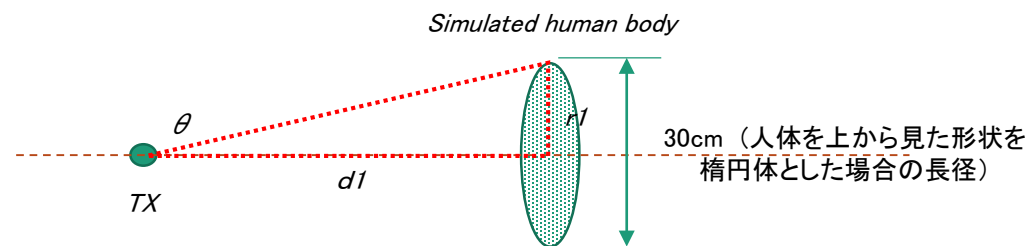
フレネルゾーン模式図

[1] 王挺, 梅比良正弘, 武田茂樹, 宮嶋照行, 鹿子嶋憲一, “60GHz帯における移動する人体によるシャドーイングの計算モデルと実験による検証”, 信学技報, RCS2014-211, pp.85-90, Nov. 2014

[2] 高田潤一, “電波伝搬の基礎理論”, 映像情報メディア学会誌, 2016, vol.70, no.1, pp.142-148, Jan. 2018

- 図3に示す $d1$ を1m、 $r1$ を15cmとすると、 θ は約8.5度となる。この角度の意味は、8.5度以内であれば人体による遮蔽が期待でき、8.5度より広い場合は人体による遮蔽効果が薄いことを示す。
- ミリ波帯センサーシステムのアンテナ半値角を120度とすると、 θ との間には次の関係がある。
 - 0~ θ (度): 人体による遮蔽効果あり
 - θ ~60(度): 人体による遮蔽効果が期待できない
- ミリ波帯センサーシステムに対する、人体遮蔽率を表2に示す。
- Google Soliのユースケースから、ミリ波センサーシステムを見ながら指によるジェスチャー操作を行うときの人体からの距離は、肩から肘までの長さに近似すると仮定すると、25cm程度と考えられる。
- $D1$ が25cmの時は表2より人体遮蔽率は50%程度である。
- Google SoliのDuty Cycleは、指の動作をセンシングしているHigh modeとStand-by状態のLow modeに分けられる。表3にDuty Cycleを含む送信時間率を示す。
- ミリ波帯センサーシステムは使用状況によっては被干渉側システムに干渉を与える可能性がゼロではないが、送信時間率及びアンテナ指向性による干渉軽減率にシャドーイング効果が加わることで、干渉影響が小さくなることが確認された。

送信時間率 \times 人体遮蔽率 = 1.11% \times 50% = 0.56%
- また、ミリ波帯センサーシステムのユースケースから、屋外においては固定設置される可能性は低く、移動するものとしてとらえれば、共有可能と考えることができる。

人体により遮蔽される面と遮蔽角(θ)の関係TX~人体間の距離の変化による人体遮蔽率 ($r1 = 0.15$ m)

$d1$ (m)	θ (deg.)	アンテナ半値角: 120度に対する人体遮蔽率 (%)
1	8.5	14
0.5	16.7	28
0.26	30	50
0.2	36.9	61
0.15	45.0	75

実動作状態におけるDuty Cycle別の送信時間率

	Duty Cycle High mode	Duty Cycle Low mode	Note
Transmission Duty (%)	10.0	1.8	
Antenna Directivity (%)	11.1	11.1	$(120 / 360 \text{ deg.})^2$
Total (%)	1.11	0.2	

ミリ波帯センサーシステムにはキャリアセンス機能の実装を想定していないため、他のデータ・画像伝送システムの状態（待機中、送受信中など）に関係なく、電波の発射を行う

データ・画像伝送システムが送信を開始しようとする時又は通信終了後から次の通信開始の間に、自らが送信を行おうとする周波数に、他の無線設備からの電波の発射がないことを確認（キャリアセンス機能）してから通信を開始することとなっている

- ・キャリアセンス機能を持たないミリ波帯センサーシステムが送信をした際、データ・画像伝送システムのキャリアセンス機能に影響を与え続ける懸念
- ・中・遠距離通信用高指向性・高利得アンテナを使用するシステムへのアンテナ軸外からの入射の影響に対する懸念

データ・画像伝送システムの設置地上高とアンテナ特性（軸外方向からの受信）の関係に係る検討



ミリ波帯センサーシステムの台数による影響及び所要離隔距離の算出（連続、複数台の同時送信）



データ・画像伝送システムの相互通信時距離対干渉波所要離隔距離の算出（1対1）

屋外利用用途のデータ伝送用アンテナには、平成27年度陸上無線通信委員会報告(35頁)のモデルを採用

(4) アンテナモデル

与干渉システムおよび被干渉システムのアンテナは、IEEE802.15.3cのミリ波WPANタスクグループのチャンネルモデリングの基準アンテナモデルとして採用されたアンテナモデル※を適用した。このモデルは、アンテナの電力半値ビーム幅を設定することにより、メインローブパターンと平均化されたサイドローブレベルを得ることができるものである。

※I.Toyoda and T.Seki, "Antenna Model and Its Application to System Design in the Millimeter-wave Wireless Personal Area Networks Standard" NTT Technical Review.

The developed antenna model is formulated in terms of directivity gain $G(\theta, \phi)$ as follows: [5]

$$G(\theta, \phi)[\text{dBi}] = G_0 - 3.01 \cdot \left(\frac{2\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad 0 \leq \theta \leq \theta_{ml}/2 \quad (2)$$

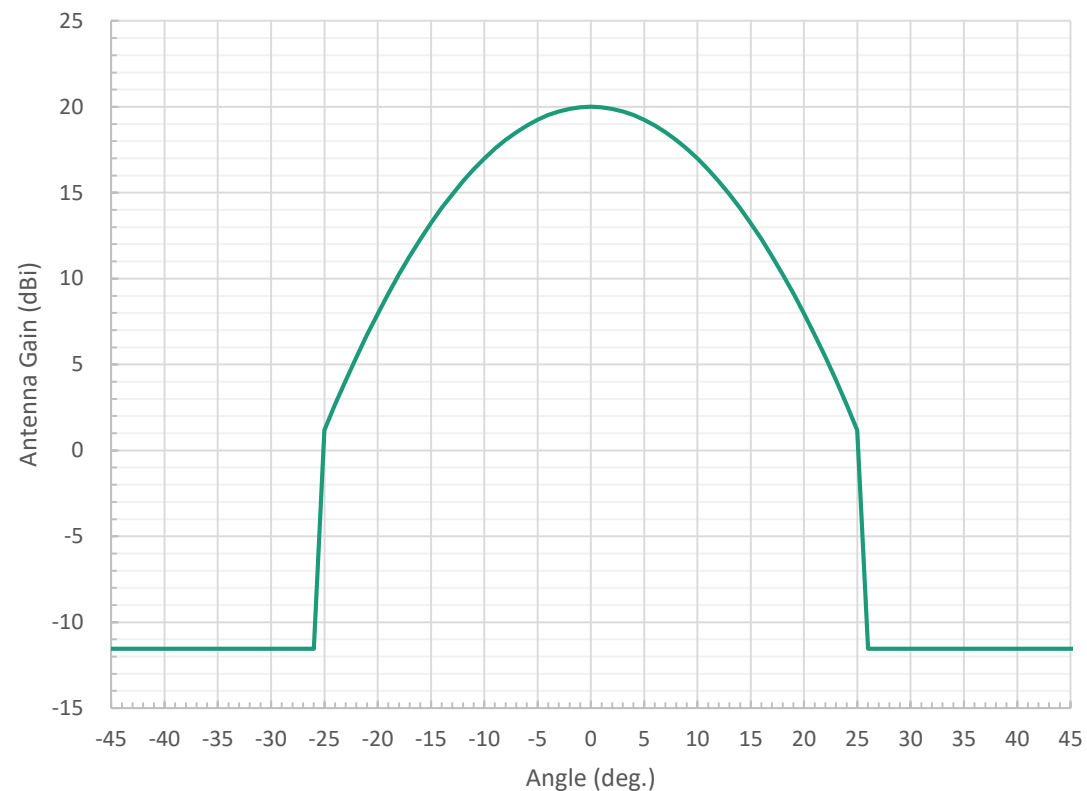
$$G(\theta, \phi)[\text{dBi}] = -0.411 \cdot \ln(\theta_{3dB}) - 10.6 \quad \theta_{ml}/2 < \theta \leq 180^\circ \quad (3)$$

$$\theta_{ml} = 2.58 \cdot \theta_{3dB} \quad (4)$$

$$G_0 = 20 \cdot \log \left(\frac{1.62}{\sin(\theta_{3dB}/2)} \right), \quad (5)$$

where θ_{3dB} is the antenna's half-power beamwidth and θ_{3dB} is in units of degrees. Equations (2) and (3) give the directivity gains of the main and side lobes, respectively. Here, the directivity gain is not a function of ϕ , which means that the antenna has a rotationally symmetric beam.

図3-1.8 適用したアンテナモデルの定式



FWAシステムのアンテナパターンシミュレーションの例

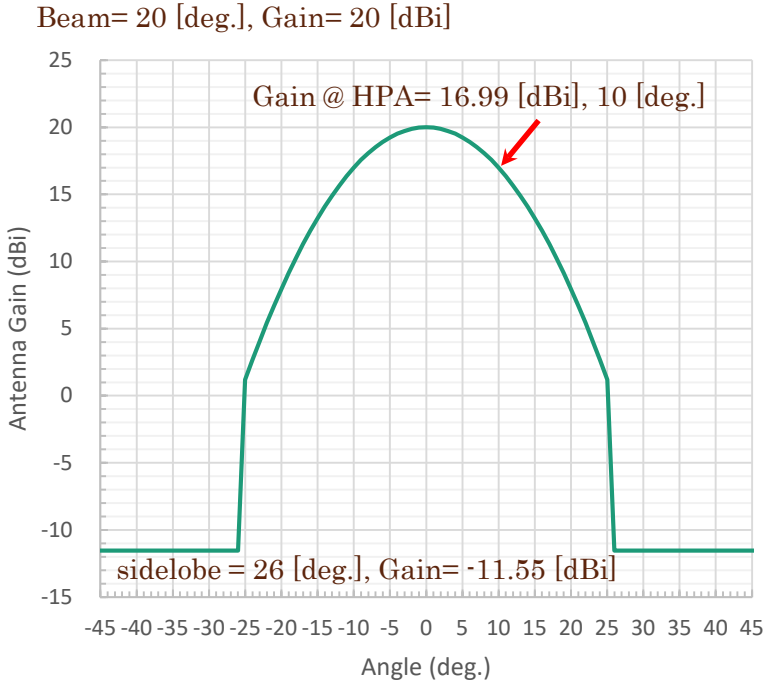
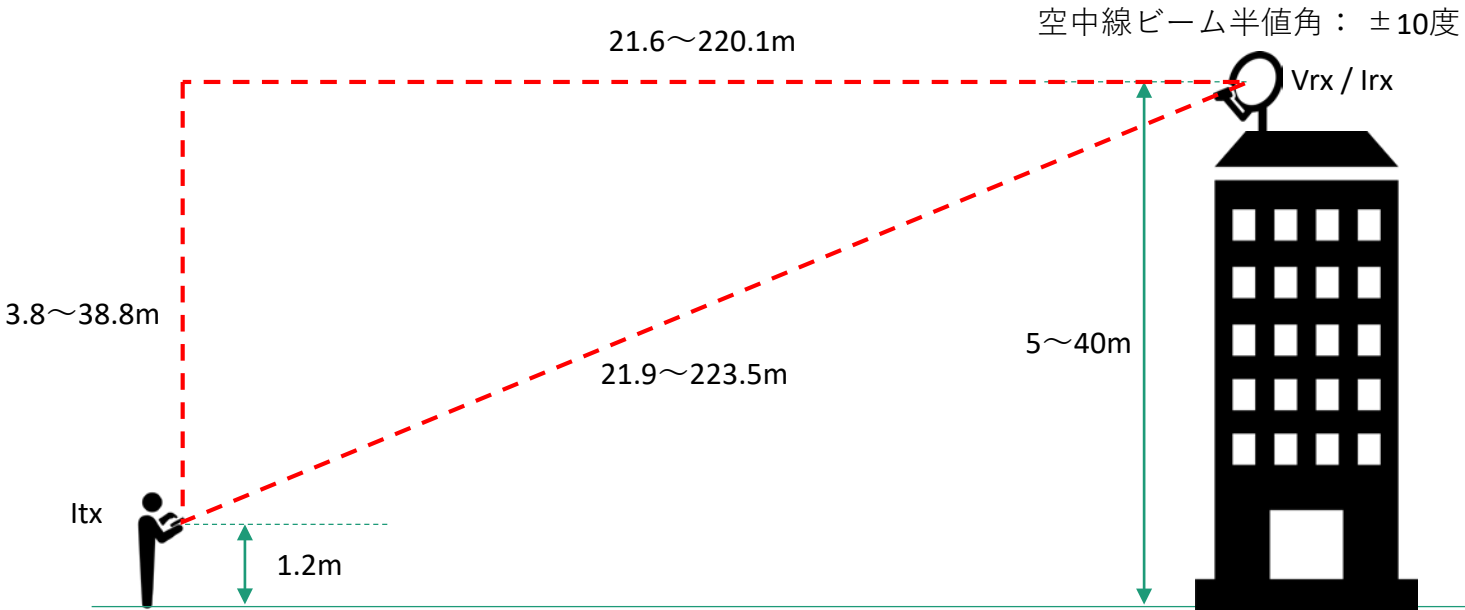
Beam= 20 [deg.], G= 20 [dBi], sidelobe= 26 [deg.], -11.55 [dBi]

(NTT Technical Review "Antenna Model and Its Application to System Design in the Millimeter-wave Wireless Personal Area Networks Standard" より引用)

小電力データ通信システム ～ 画像・データ伝送 (屋外利用)

被干渉装置送受信 Vtx/Vrx	周波数	fv	60.48	GHz
	送信電力	Pvt	20	mW
	送信アンテナ利得	Gavt	20	dBi
	送信空中線電力半値角	HPAVtx	20	deg.
	受信アンテナ利得	Gavr	20	dBi
	受信アンテナ利得 (10度)	Gavr10	16.99	dBi
	受信空中線電力半値角	HPAVrx	20	deg.
	帯域幅	Brx	2.16	GHz
	受信機雑音指数	NF	10	dB
	所要C/N	CNreq	8.5	dB

シミュレーションに用いたパラメータを示す。
 なお、被干渉装置のパラメータは平成27年陸上無線通信委員会報告書に記載の値を元に、屋外画像・データ伝送に採用されている標準的な値とした。

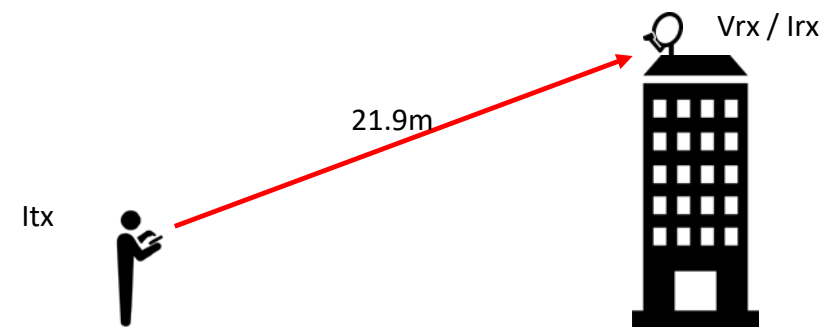
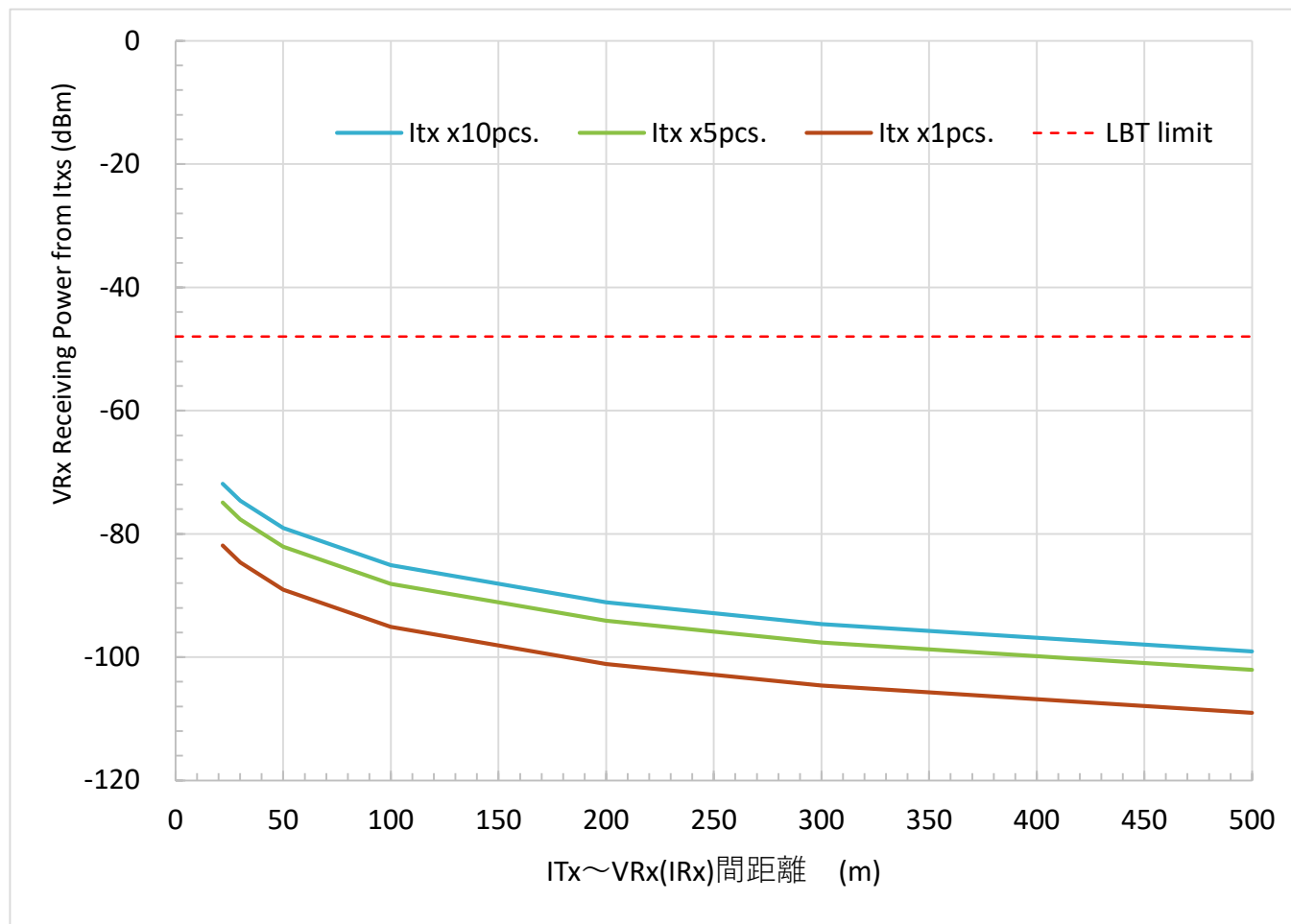


アンテナモデルの利得パターン

アンテナ設置高を一般的な電柱の架線高(5m)から10階建てのオフィスビル相当(40m)と仮定

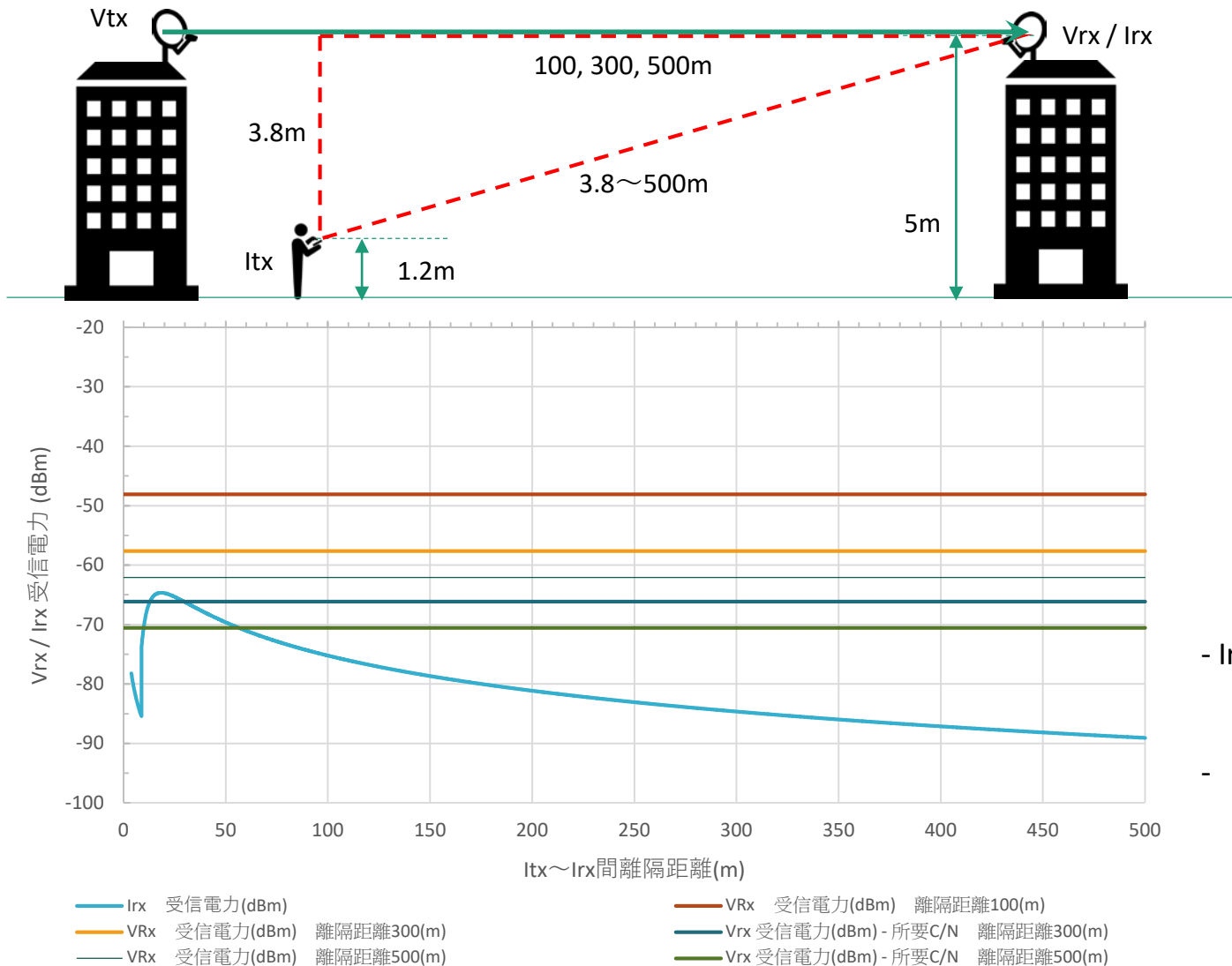
3-1 小電力データ通信システム ～ 画像・データ伝送 (屋外利用) キャリアセンス機能への検討

被干渉装置受信アンテナ端での受信電力限度値をキャリアセンスレベル-48dBm に設定し評価



Vrx / Irxの地上高5m時の離隔距離21.9mにおいては、Itx 10台の場合でも受信電力 -71.9dBmとなり、キャリアセンス許容値-48dBm以下となった
 よって、被干渉装置受信アンテナ端でのキャリアセンスに問題ないことを確認した

被干渉側装置と与干渉側装置の離隔距離可変時の受信電力への影響



被干渉装置送信 V_{tx}	周波数	f_v	60.48	GHz
	送信電力	P_{vt}	20	dBm
	送信アンテナ利得	G_{avt}	20	dBi
	距離	D_v	100, 300, 500	m
	アンテナ地上高	H_{vt}	5	m
被干渉装置受信 V_{rx}	受信アンテナ利得	G_{avr}	20	dBi
	帯域幅	B_{rx}	2.16	GHz
	受信機雑音指数	NF	10	dB
	所要C/N	CNreq	8.5	dB
	アンテナ地上高	H_{vr}	5	m
与干渉装置送信 I_{tx}	周波数	f_i	60.48	GHz
	送信電力	P_{it}	10	dBm
	送信アンテナ利得	G_{ait}	3	dBi
	距離	D_i	3.8 ~ 500	m
	アンテナ地上高	H_{it}	1.2	m
I_{rx}	受信アンテナ利得	G_{air}	~ 20	dBi

- $I_{rx} \sim I_{tx}$ 間離隔距離を3.8~500m可変した際の I_{rx} の受信電力は、離隔距離約19m、受信アンテナ利得約16dBi(輻射軸との狭角約11.5度)の時、受信電力約-64.7dBmで最大となる。
- $V_{tx} \sim V_{rx}$ 間通信距離300m時の受信電力約-58dBm、同500m時約-62dBmに所要CN 8.5dBを加算すると、離隔距離約56mまでは影響がある。

屋外利用のデータ・画像伝送システムの干渉検討結果

被干渉側装置の設置高と与干渉側装置との関係

FWAやWi-FiバックホールとしてのWiGigの屋外利用を想定。屋外でのネットワーク構築を想定しているため、アンテナの設置高は5m以上を想定。アンテナの電力半値角を±10度とし、地上1.2mで与干渉側装置が使用されると想定の上離隔距離を算出。

与干渉側装置が被干渉側装置のキャリアセンス時に与える影響： 被干渉側装置と与干渉側装置の最低離隔距離は21.9mとなるが、この離隔距離において複数（最大10台と想定）の与干渉側装置から電波の発射を行っても、被干渉側装置アンテナ端においてキャリアセンスレベル閾値（-48dBm）を超える電力を受信することはないため、キャリアセンスへの影響はないと言える。

被干渉側装置通信時における干渉の影響： 被干渉側装置のアンテナ主輻射軸を正対した条件で通信距離を100、300、500mに固定設定し、与干渉側装置と被干渉側装置の離隔距離を3.8~500m可変した際の被干渉側装置が受ける受信電力を評価。

結果、被干渉側装置の所要C/Nを加算した受信電力に対し、通信距離500mで離隔距離約56m以下の場合、影響のあることが確認された。

(1) しかしながら、シミュレーションは100%連続送信を条件として実施しており、実環境では送信時間率は1.11%程度となるため、影響は限定的と考えられる。

	Duty Cycle High mode	Duty Cycle Low mode	Note
Transmission Duty (%)	10.0	1.8	
Antenna Directivity (%)	11.1	11.1	(120 / 360 deg.) ²
Total (%)	1.11	0.2	

(2) 影響のある離隔距離 56m 以内のアグリゲーション条件は、単位面積当たりの普及台数×(56×56×π)×(アンテナビーム幅÷360) で求められ、単位面積当たりの普及台数 0.015(台/m²)(16ページ参照)、アンテナビーム幅 20度から、約 8台となる。

(3) 前述の人体遮蔽率約50%及び送信時間率1.11%から、人体遮蔽率を含む送信時間率は0.56%となり、約8台の送信時間率を求めると、0.44台となる。

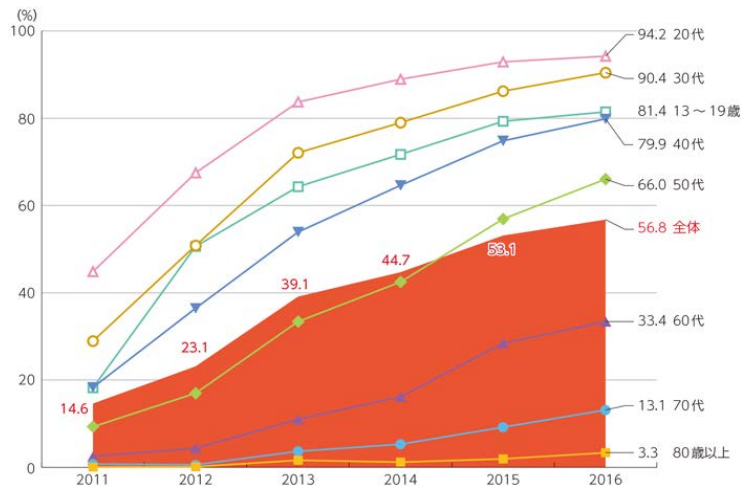
これらの結果、影響のある台数は実質的に1台以下となるため、屋外利用時のデータ伝送端末との共存は可能と考えられる。

普及密度

普及密度算出の前提

総務省統計局発行の平成27年度国勢調査人口等基本集計結果から、人口密度の最も高い東京都の値 6,168.7(人/km²)に昼間の人口密度が3倍と仮定した値を適用し、普及率を一般社団法人電気通信事業者協会の「携帯電話の契約者数(2019年3月 第4四半期)」の値 175,363(千台)と当該国勢調査の全国総人口 127,095(千人)から一人当たり所有台数 1.38(台/人)を算出、平成29年版 情報通信白書の「スマートフォン個人保有率の推移」普及率約60%から一人当たりのスマートフォン所有台数 0.83(台/人)とし、15,321(台/km²)を算出した。

$$\begin{aligned}
 \text{単位面積当たりのスマートフォン普及台数} &= (\text{携帯電話の契約数} \div \text{全国総人口}) \times \text{スマートフォン個人保有率} \times (\text{人口密度} \times 3) \\
 &= (175,363 \div 127,095) \times 0.6 \times (6,168.7 \times 3) \\
 &= 15,321 \text{ (台/km}^2\text{)} \\
 &= 0.015 \text{ (台/m}^2\text{)}
 \end{aligned}$$



図表1 スマートフォン個人保有率の推移

平成29年版 情報通信白書より抜粋

Reference:

携帯電話・PHS契約数 事業者別契約数 2018年度 (一般社団法人 電気通信事業者協会)

<https://www.tca.or.jp/database/>

平成27年国勢調査人口等基本集計 結果の概要 (総務省統計局)

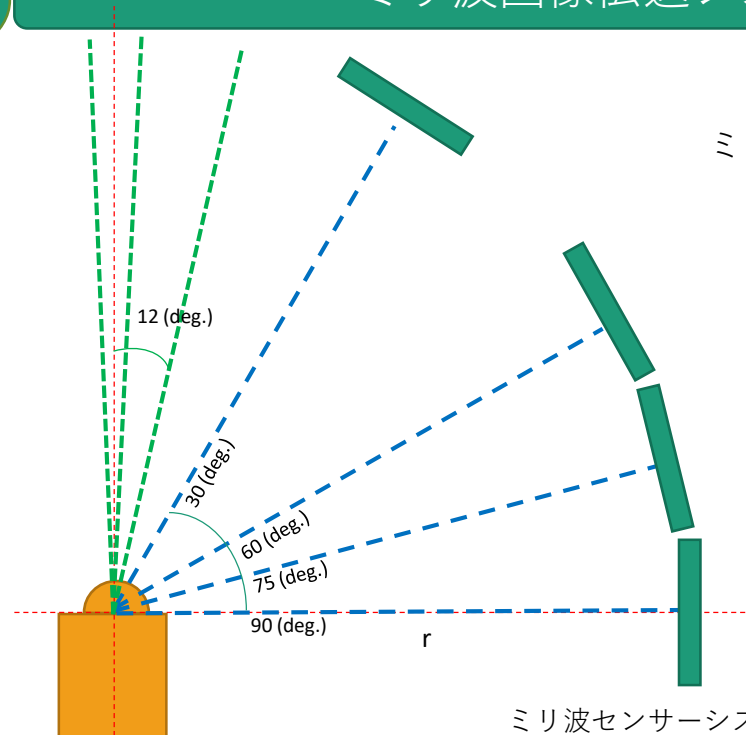
<https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka/kihon1/pdf/gaiyou1.pdf>

ミリ波帯センサーシステムを、ミリ波画像伝送システムが設置されているマンション等の屋内（ベランダを含む）で使用した場合、ベランダの外に設置されているミリ波画像伝送システムの受信アンテナに対し干渉を与える可能性が示唆される。

ミリ波帯センサーシステムによる影響を所要改善量を算出し評価する



画像伝送システムの所要C/Nに対する影響を、実機を用いて評価する



ミリ波画像伝送システムの受信機

ミリ波センサーシステム

画像伝送システムとミリ波センサーシステム間の離隔距離 r は10cm~10m可変

ミリ波画像伝送システムに対するミリ波センサーシステムの成す角は、90度、75度、60度、30度で検討

ミリ波画像伝送システムのアンテナは ± 12 度以上はサイドローブ値であるので、-13dBiをすべての成す角で採用

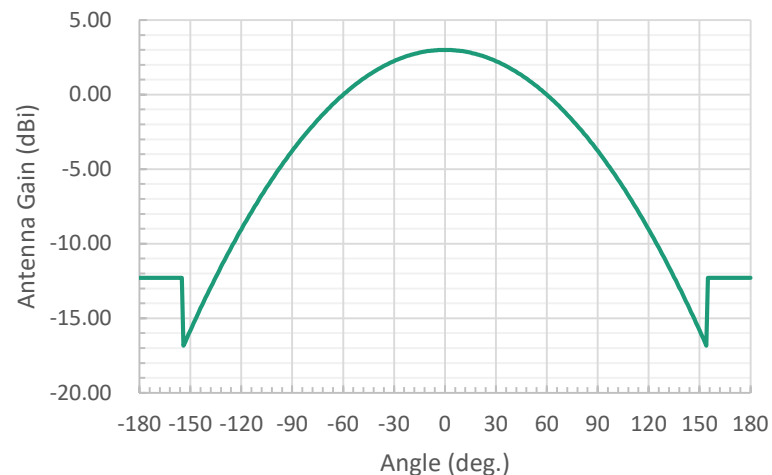
ミリ波画像伝送システムのアンテナ半値角 6.71 deg.に対するミリ波センサーシステムのアンテナ半値角 120 deg.との受信有効面積比は；

受信面積比(%) = $6.71 / 120 = 5.59$ となり、ミリ波センサーシステムから放射される電力の5.59%がミリ波画像伝送システムによって受信される。

受信面積比を対数で表すと、 $20\log(6.71/120) = -25.0$ dB となる。

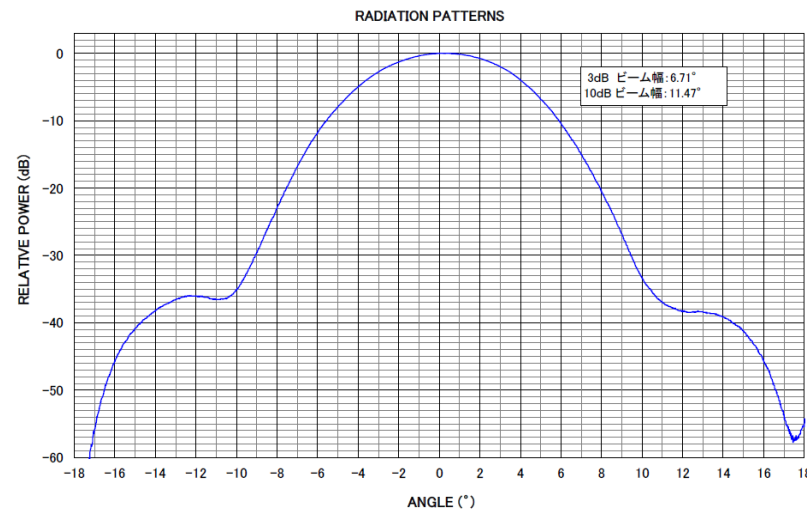
ミリ波画像伝送システムのアンテナ利得

Angle (deg.)	left (dBi)	right (dBi)
0	23.0	23.0
1	22.5	22.9
2	21.7	22.2
3	20.2	21.0
4	18.0	19.0
5	15.0	16.0
6	11.5	12.5
7	6.0	8.0
8	2.2	2.2
9	-6.5	-4.0
10	-12.0	-10.5
11	-13.6	-14.0
12	-13.0	-15.2



ミリ波センサーシステムのアンテナパターン（シミュレーション）

Beam= 120 [deg.], G= 3 [dBi], Sidelobe= 154 [deg.], -16.83 [dBi]



ミリ波画像伝送システムのアンテナパターン

Beam= 6.71 [deg.], G= 23 [dBi]

ミリ波帯画像伝送システムの諸元

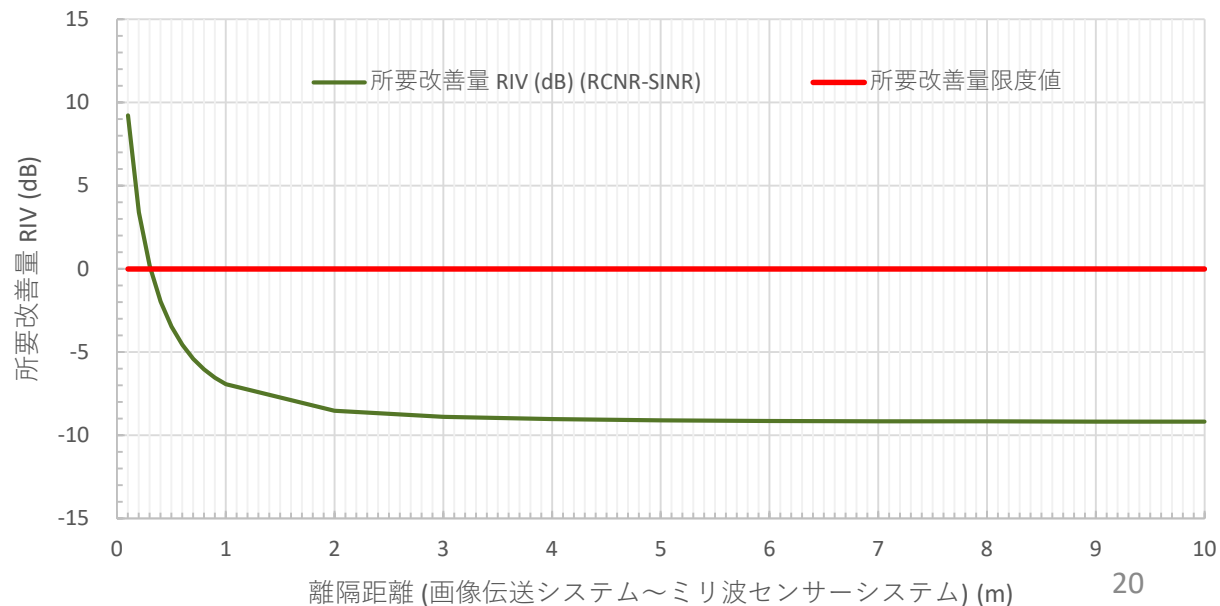
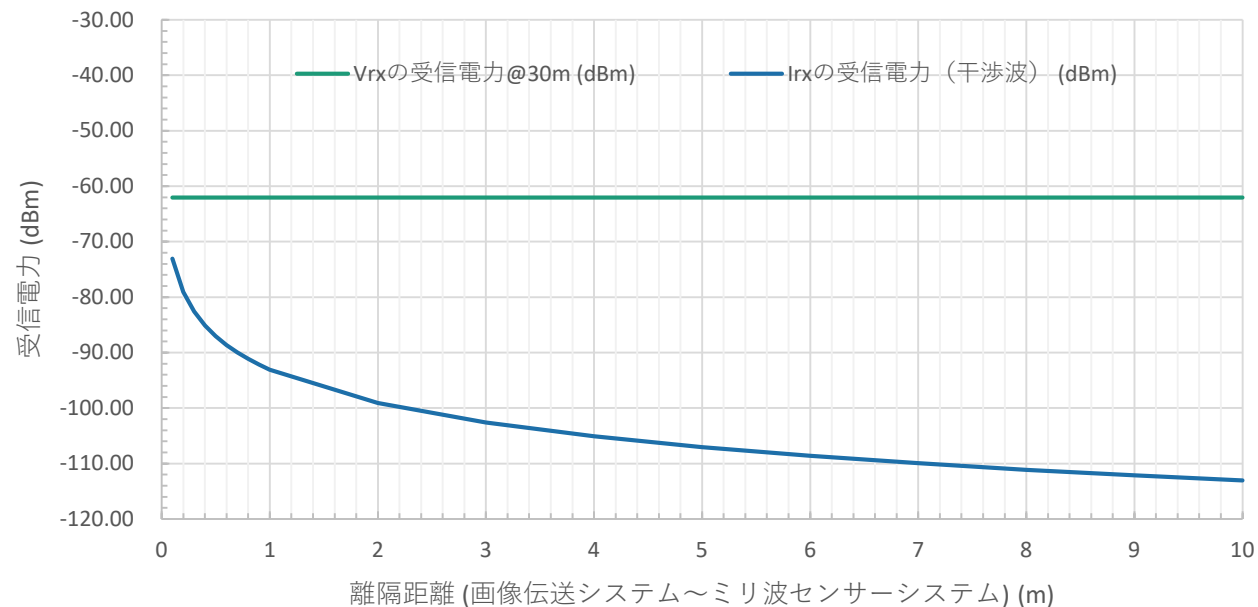
周波数(中心周波数)	58.8 ~ 61.3 GHz (60.05 GHz)
占有周波数帯幅	0.0345 GHz/CH
空中線電力	0.04 mW/CH (-14dBm/CH)
空中線利得	23 dBi
等価等方輻射電力	+9 dBm
空中線半値角	+ / - 3.355 deg.
NF	7 dB
所要CNR	20.2 dB
信号伝送距離	20 m
90° 方向利得	-13 dBi以下

与干渉側システムの諸元

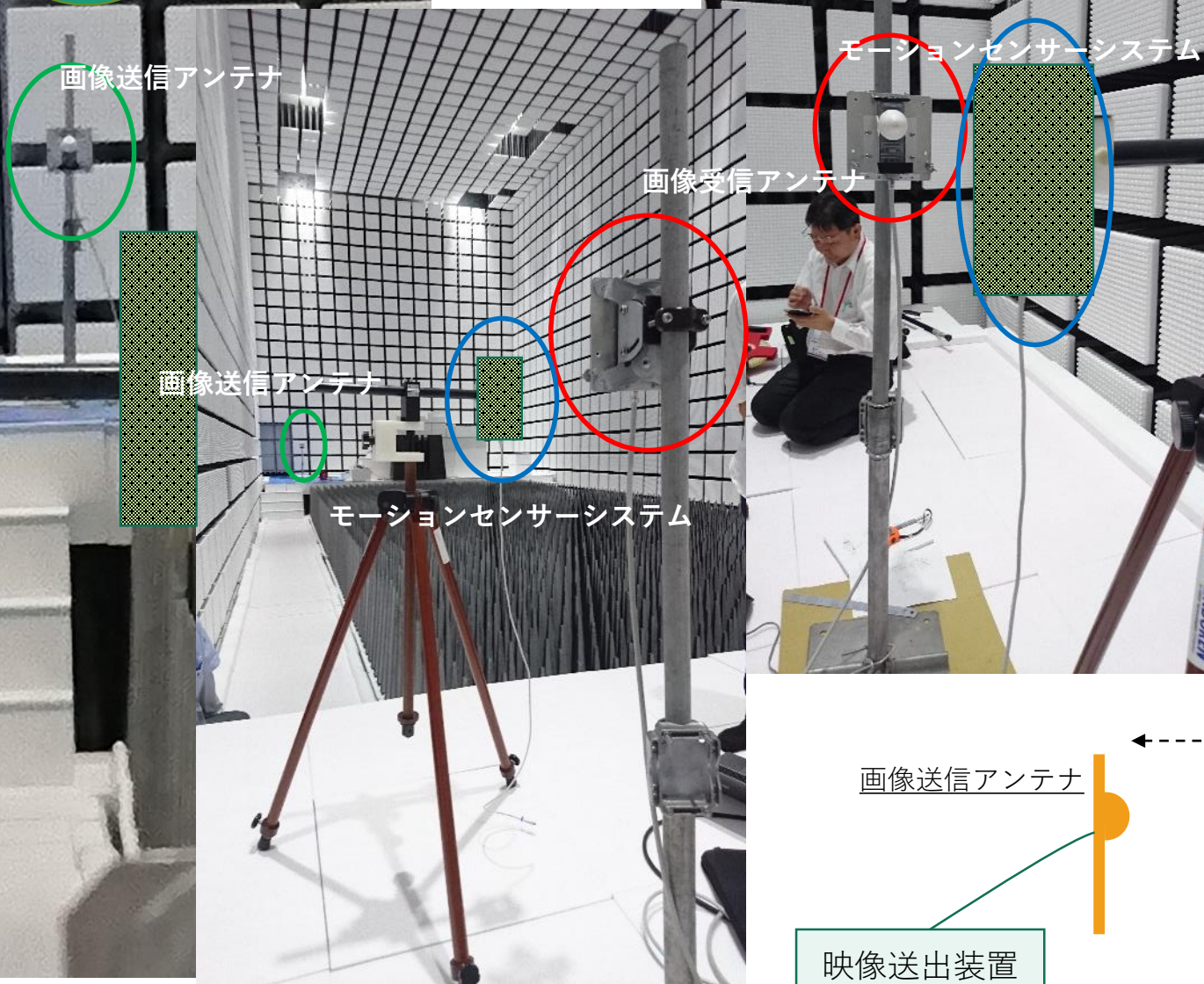
電波の型式	F3N
変調方式	FMCW
周波数	57 ~ 64 GHz
占有周波数帯幅	7 GHz
空中線電力	10 mW
等価等方輻射電力	+13 dBm
空中線半値角	+ / - 60 deg.
受信有効面積比	24.5 dB
デューティサイクル	3.3 / 29.7 msec. (MAX.)

画像伝送システムとミリ波センサーシステム間の離隔距離は10cm～10m可変

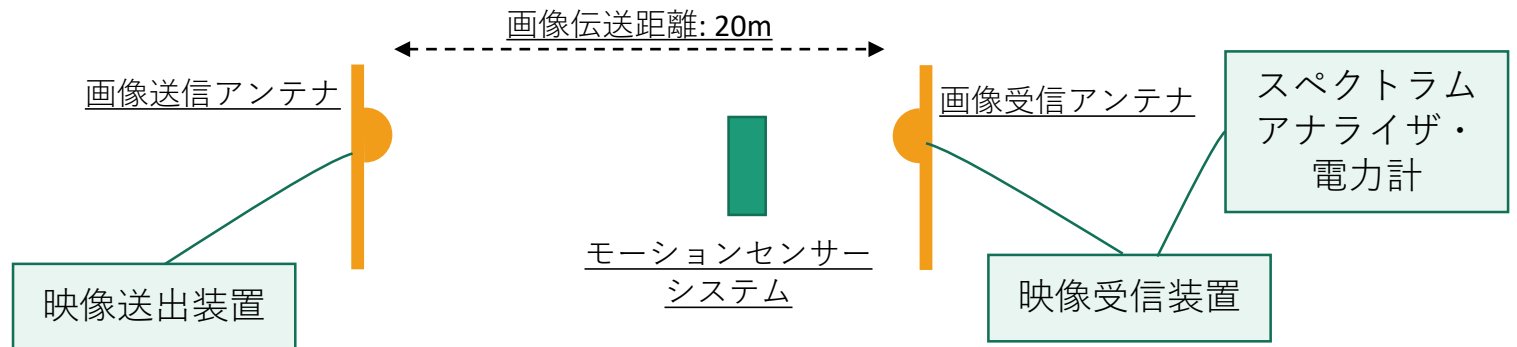
40cm以上の離隔距離で共用は可能との結果となった

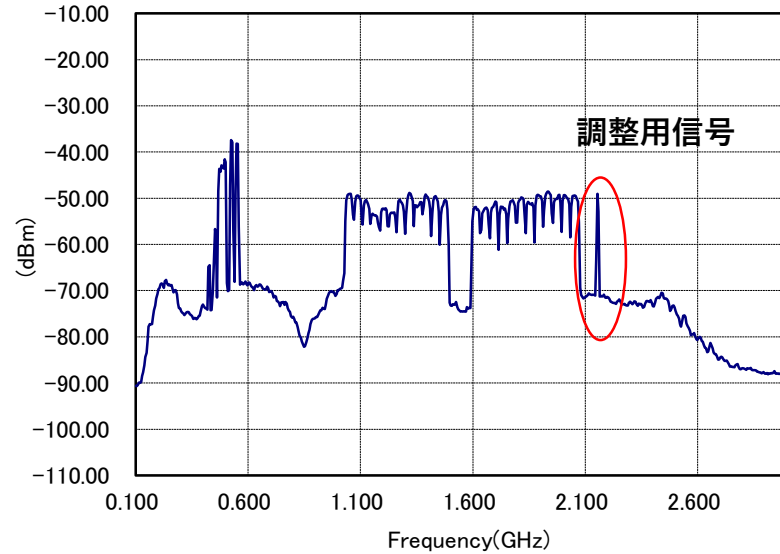


ミリ波画像伝送システム（共同住宅共聴システム）実機評価結果

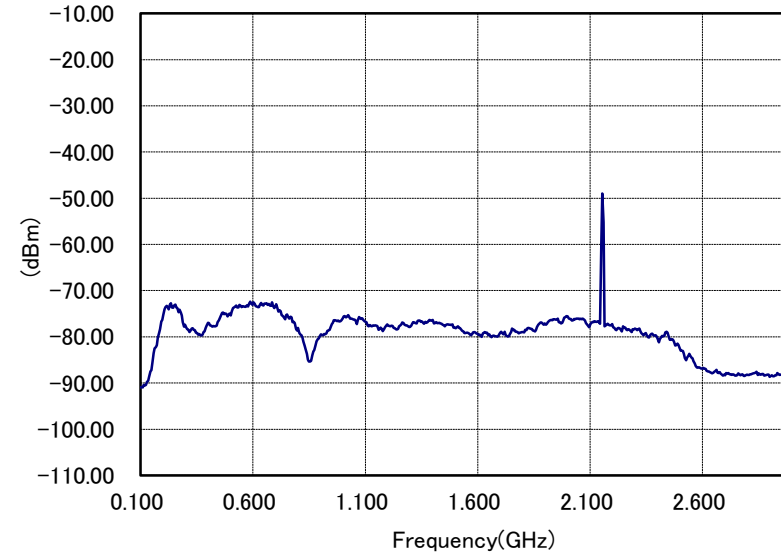


画像送信アンテナより、地デジ、BS及びCS放送波を送信し、受信アンテナで受信、映像受信装置にてブロッキングノイズ等の発生を確認するとともに、スペクトラムアナライザで受信電力を観測、電力計でC/Nを確認する。

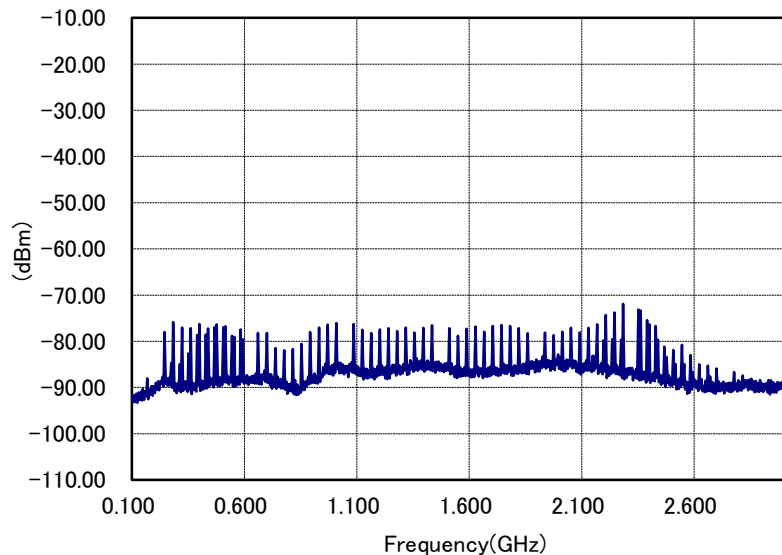




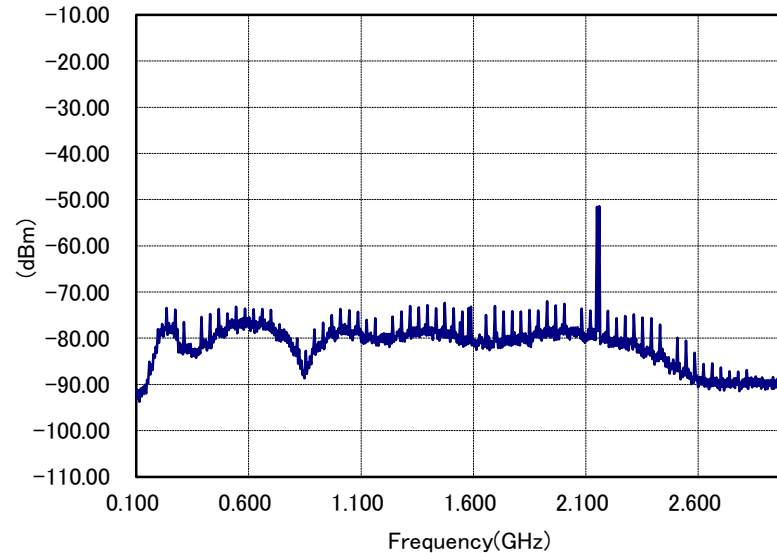
伝送距離20mにおける受信信号(妨害無し・基準)



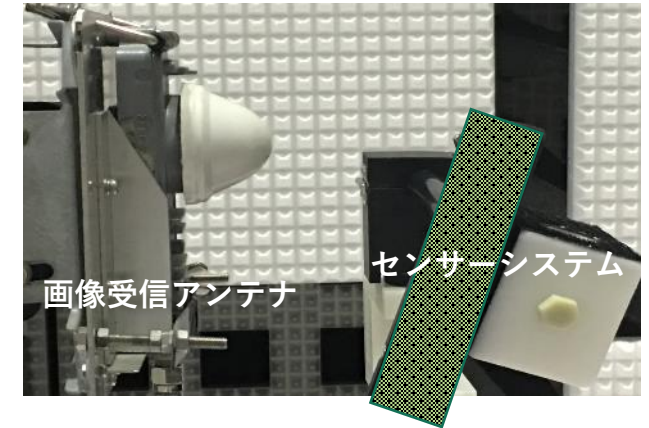
画像送出無し、妨害無し

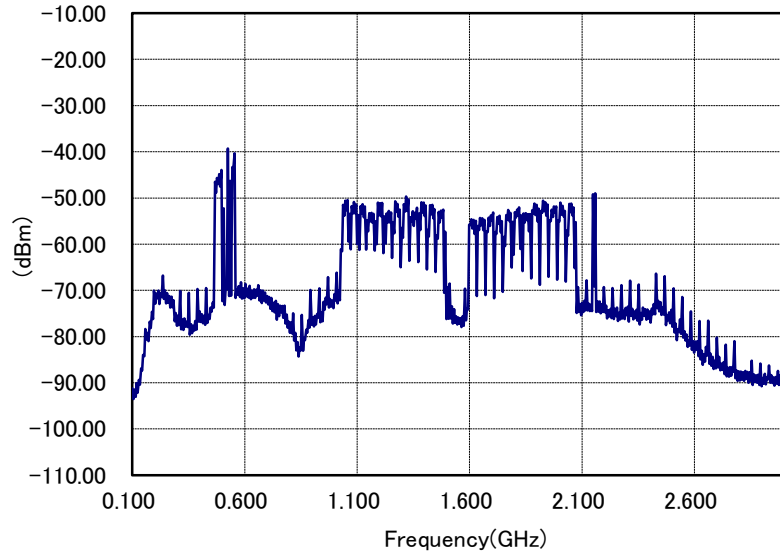


センサーシステムによる妨害波(画像受信できない状態)
 離隔距離10cm、受信アンテナを半分遮蔽



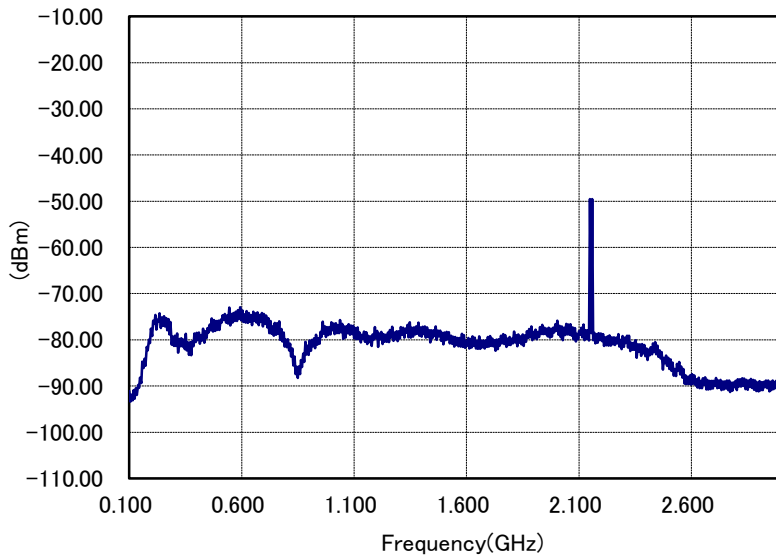
センサーシステムによる妨害波(放送波無し)
 離隔距離8.7cm、受信アンテナを半分遮蔽



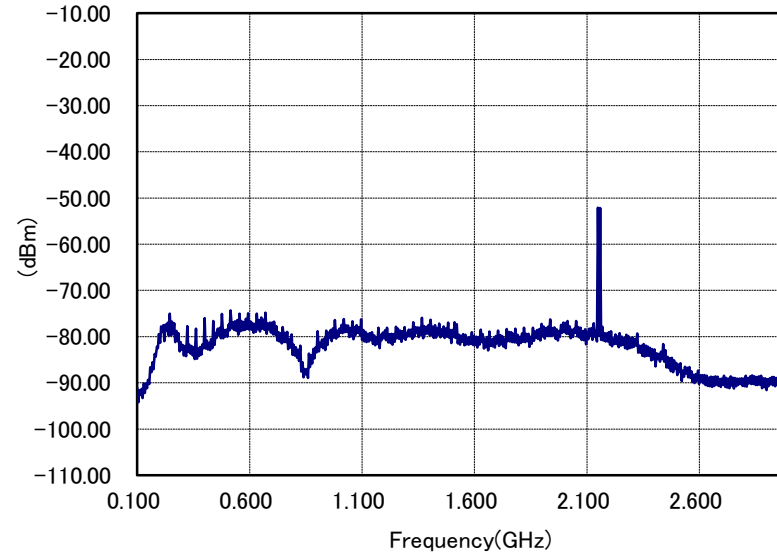


モーションセンサーの遮蔽による影響が少なく（調整用信号レベルが適正）
受信機に妨害波を与えた状態。
地デジ、2K衛星放送とも所要C/N*が確保されているため画像への影響なし

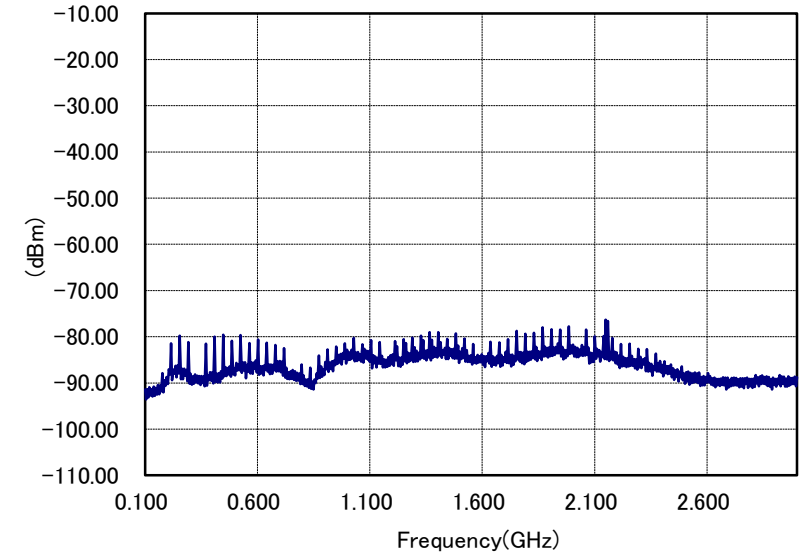
* 所要C/N 地デジ: 20.2dB, 2K衛星放送: 10.7dB



離隔距離 1m 正対



離隔距離 50cm 正対 ~ 調整用信号3dB低下



離隔距離 25cm 正対 ~ 調整用信号を遮蔽

シミュレーションの結果：

- ・ミリ波画像伝送システムで送出されているBS/CS衛星放送の信号について評価を実施（帯域幅34.5MHz/CH）
- ・チャンネルあたりの送信空中線電力 0.04mW/CH、送信及び受信アンテナ利得23dBiとし、ミリ波画像伝送システムが正対した状態に対するミリ波センサーシステムの対向する角度を90度、75度、60度及び30度について検討
- ・ミリ波画像伝送システムの受信アンテナのサイドローブ角12度よりもミリ波センサーシステムの設置位置が外側となるため、受信機アンテナ利得を-13dBiと設定
- ・ミリ波画像伝送システムの受信アンテナ電力半値角とミリ波センサーシステムの送信アンテナ電力半値角との受信有効面積比を求め、干渉受信電力及び所要改善量を算出
- ・ミリ波画像伝送システム受信機とミリ波センサーシステム間の離隔距離40cm以上で共用が可能である結果となった

ミリ波センサーシステム実機によるミリ波画像伝送システムへの干渉評価の結果：

- ・ミリ波画像伝送システムを20mの離隔距離で対向させた状態で、当該受信機とミリ波センサーシステムとの離隔距離及びミリ波画像伝送システムの対向軸に対する角度を可変し、ミリ波画像伝送システム間で伝送される地デジ、BS/CS衛星放送波を受像機で受信するとともに、スペクトラムアナライザで受信信号を観測。
- ・ミリ波画像伝送システムのアンテナ指向性が鋭いため、ミリ波センサーシステムの送出電波をミリ波画像伝送システムの正対軸上で受信できる位置に設置し離隔距離を縮めてゆくと、25cm以内でミリ波画像伝送システムの第1フレネルゾーンを100%遮蔽してしまうため、離隔距離25cm以内では、第1フレネルゾーンを50%遮蔽する位置を最も正対軸に近い場所として設定
- ・第1フレネルゾーン50%遮蔽の条件にて離隔距離8.5cmを確保すれば、伝送画像信号の所要CNを満足する結果となった。

地球探査衛星業務は、日本での運用は行われていないが、米国NOAA（海洋大気庁）やEUMETSAT（欧州気象衛星機関）が運用する低軌道衛星が日本上空を通過するため、ミリ波帯センサーシステムがこれらに与える影響について干渉検討を実施。

東京都の昼間人口密度からミリ波帯センサーシステムの普及密度を算出し、地球探査衛星の可視範囲内台数を算出



ミリ波帯センサーシステム1台あたりの衛星空中線入力端干渉電力を求め、最大可視範囲内の総干渉電力を算出



衛星の干渉許容レベルと総干渉電力から所要改善量を算出

Sat. Name	Orbital altitude (km)	Received Freq. (GHz)
DMSF-F16	833	50.3, 52.8, 53.596, 54.4,
DMSF-F17	850	55.5, 57.29, 59.4,
DMSF-F18	850	60.792668 ± 0.357892, 63.283248 ± 0.285271

受信周波数は60GHz付近を抜粋。平成27年陸上無線通信委員会報告書より抜粋。

- 普及密度を東京都の昼間人口密度を元にした 15,321 (台/km²) にマージンを加えた20,000 (台/km²) と仮定。
- SSMIS(Special Sensor Microwave Imager Sounder)の最大可視範囲は75km × 75km
- 上記、1及び2より、最大可視範囲内に存在するデバイス数は、1,125 × 10⁵台
- 1台のミリ波帯センサーシステムから衛星側アンテナが受ける電力 P₀は;

$$P_0 = P_t + G_t + G_i - L$$

P_t: ミリ波帯センサーシステムの空中線電力、G_t: ミリ波帯センサーシステムの空中線利得、G_i: 衛星の空中線利得、L: 伝搬損失

- 集合干渉電力 P_{aggregate}は;

$$P_{\text{aggregate}} = P_0 + 10\log(N)$$

N: ミリ波帯センサーシステムの最大可視範囲内に存在する台数

- 伝搬損失 Lは;

$$L = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) + L_1 \quad *$$

$$= 32.4 + 20\log(60 \times 10^3) + 20\log(833) + 160$$

$$= 346.38 \text{ dB}$$

f: freq. [MHz]、d: distance [km]、L₁: 大気減衰

ただし、大地を平面とみなし、デバイス～衛星間の距離を一律833km、酸素吸収損を160dB **

- ミリ波帯センサーシステムのEIRPは13dBmであることから、衛星側の空中線利得を考慮しない1デバイスからの干渉電力は、4項より;

$$P_0 = 13 - 346.38 = -333.38 \text{ dBm}$$

- 5項及び7項より、最大可視範囲内から受信する総電力は;

$$P_{\text{aggregate}} = -333.38 + 10\log(1,125 \times 10^5) = -252.87 \text{ dBm}$$

- ミリ波帯センサーシステムの実効帯域幅を500kHzとすると;

$$-252.87 - 10\log(0.5) = -249.86 \text{ dBm/MHz}$$

- 衛星の空中線利得が不明のため、NOAA NPOESSの54dBiを採用した場合の干渉量は、-195.86 dBm/MHzとなる

- EESS(PASSIVE)の60GHz帯における保護基準***は、-169 dBW/100MHzであり、10項の干渉量 -205.86 dBW/100MHzとの所要改善量は-36.86 dBとなり、保護基準を満足する

* Rec. ITU-R P. 525-2 "Calculation of free-space attenuation"

** Rec. ITU-R P. 676-10 "Attenuation by atmosphere gases"

*** Rec. ITU-R RS. 2017 "Performance and interference criteria for satellite passive remote sensing"

ミリ波帯センサーシステムの周波数と重複している、地球探査衛星業務の受動センサーの周波数範囲内で酸素吸収量が最低となる周波数57.29GHz * に対して、当該衛星に対する保護基準を満足するかを確認。

- 1 普及密度を東京都の昼間人口密度を元にした 15,321 (台/km²) にマージンを加えた20,000 (台/km²) と仮定。
- 2 SSMIS(Special Sensor Microwave Imager Sounder)の最大可視範囲は 25.8km × 17.5km *
- 3 屋外での滞在時間率が10%以下 ** のデータを元に、最大可視範囲内に存在するデバイス数を903,000台と算出
- 4 1台のミリ波帯センサーシステムから衛星側アンテナが受ける電力 P₀は;

$$P_0 = P_t + G_t + G_i - L$$

P_t: ミリ波帯センサーシステムの空中線電力、G_t: ミリ波帯センサーシステムの空中線利得、G_i: 衛星の空中線利得、L: 伝搬損失

- 5 集合干渉電力 P_{aggregate}は;

$$P_{\text{aggregate}} = P_0 + 10\log(N)$$

N: ミリ波帯センサーシステムの最大可視範囲内に存在する台数

- 6 伝搬損失 Lは;

$$\begin{aligned} L &= 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) + L_1 \quad *** \\ &= 32.4 + 20\log(57.29 \times 10^3) + 20\log(833) + 100 \\ &= 285.97 \text{ dB} \end{aligned}$$

f: freq. [MHz]、d: distance [km]、L₁: 大気減衰

ただし、大地を平面とみなし、デバイス～衛星間の距離を一律833km、酸素吸収損を100dB

- 7 ミリ波帯センサーシステムのEIRPは13dBmであるが、衛星センサー指向角前方50度を考慮し受信空中線利得から-2dB減算するため、11dBmとして計算、衛星側の空中線利得を考慮しない1デバイスからの干渉電力は、4項より;

$$P_0 = 11 - 285.97 = -274.97 \text{ dBm}$$

- 8 5項及び7項より、最大可視範囲内から受信する総電力は;

$$P_{\text{aggregate}} = -274.97 + 10\log(903,000) = -215.42 \text{ dBm}$$

- 9 ミリ波帯センサーシステムの実効帯域幅を500kHzとすると;

$$-215.42 - 10\log(0.5) = -212.41 \text{ dBm/MHz}$$

- 10 衛星の空中線利得をアンテナ径0.6m * からMTVZA-OKの51dBi ***** とした場合の干渉量は、-161.41 dBm/MHzとなる

- 11 EESS(PASSIVE)の57.29GHz帯における保護基準*****は、-169 dBW/100MHzであり、10項の干渉量 -171.41 dBW/100MHzとの所要改善量は-2.41 dBとなり、保護基準を満足する

* <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dmsp-block-5d>

** 塩津弥佳, 吉澤晋, 池田耕一, 野崎淳夫, “生活時間調査による屋内滞在時間量と活動量: 室内空気汚染物質に対する曝露量評価に関する基礎的研究 その1”, 日本建築学会計画系論文集, 1998-63-511, pp. 45-52, Feb. 2017

*** Rec. ITU-R P. 525-2 “Calculation of free-space attenuation”

**** Rec. ITU-R P. 676-10 “Attenuation by atmosphere gases”

***** Rec. ITU-R RS. 1861 “Typical technical and operational characteristics of Earth exploration-satellite service (passive) systems using allocations between 1.4 and 275 GHz”の表14のSensor K4

***** Rec. ITU-R RS. 2017 “Performance and interference criteria for satellite passive remote sensing”