

空中線電力の検討について

P1・・・クアルコムジャパン株式会社

インテル株式会社

P3・・・株式会社富士通研究所

60GHz帯 空中線電力の最大値の提案

2015年1月23日

クアルコムジャパン株式会社

インテル株式会社

最大空中線電力値の提案

第一希望： 27 dBm (500 mW)

グローバルハーモナイゼーションを考慮し、他システムへの干渉の問題がない限り米国や韓国と同等の値とする。

第二希望： 25 dBm (316 mW)

WiGig AllianceがARIBに送ったリエゾンで示された推奨値に基づく値とする。

第三希望： 24 dBm (250 mW)

WiFiの最大送信電力と同等レベルの値とする。このレベルは60 GHzの利用シーンを考慮した場合、最低でも担保されるべきと考える。次スライド以降、250 mWの場合のシミュレーション結果を示す（構成員限定資料）。

60GHz無線設備規格改定案

2015年1月23日

株式会社富士通研究所

- 無線LAN等の用途を考えると空中線利得15～25 *dB*i程度で空中線電力10 *dB*mを超えるシステムが必要であることは理解できる
- 国際協調を考えると「EIRP40 *dB*m以下」の規定を加えることが必然的と考える
 - ただしEIRP40 *dB*mで10 *dB*i未満のアンテナの場合では空中線電力が30 *dB*m(1 W)を超えてしまつて特定小電力機器の範疇を超えてしまうので、何等かの上限設定が必要
 - ・ 米国・Canadaでは空中線電力の上限は500 *mW* (27 *dB*m)、日本・中国は10 *mW* (10 *dB*m)
 - 特に空中線利得が22 *dB*iより小さいシステムでEIRP40 *dB*mを新たに適用する場合には、ビーム半値角が15°程度より大きい為に電波干渉の可能性が高くなるので慎重に考える必要がある
 - 空中線電力10 *dB*m以下・空中線利得47 *dB*i以下(EIRP57 *dB*m)の既存システムとの共存も考慮する必要がある
- 電波防護指針も配慮が必要
 - 特に携帯機器に内蔵される無線機については、身体に密着したり眼を近づけたりする可能性が高いので、一定の配慮が必要(距離を離す、Dutyを下げる等)

■ 電波防護指針 諮問第89号「電波利用における人体防護の在り方指針」平成9年4月24日

■ 電磁界強度指針

表1：管理環境（条件P）における電磁界強度（平均時間6分間）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]	電力密度 S [mW/cm ²]
10kHz~30kHz	614	163	/
30kHz~3MHz	614	4.9f[MHz] ⁻¹ (163-1.63)	
3MHz~30MHz	1842f[MHz] ⁻¹ (614-61.4)	4.9f[MHz] ⁻¹ (1.63-0.163)	
30MHz~300MHz	61.4	0.163	1
300MHz~1.5GHz	3.54f[MHz] ^{1/2} (61.4-137)	f[MHz] ^{1/2} /106 (0.163-0.365)	f[MHz]/300 (1-5)
1.5GHz~300GHz	137	0.365	5

表2：一般環境（条件G）における電磁界強度（平均時間6分間）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]	電力密度 S [mW/cm ²]
10kHz~30kHz	275	72.8	/
30kHz~3MHz	275	2.18f[MHz] ⁻¹ (72.8-0.728)	
3MHz~30MHz	824f[MHz] ⁻¹ (275-27.5)	2.18f[MHz] ⁻¹ (0.728-0.0728)	
30MHz~300MHz	27.5	0.0728	0.2
300MHz~1.5GHz	1.585f[MHz] ^{1/2} (27.5-61.4)	f[MHz] ^{1/2} /237.8 (0.0728-0.163)	f[MHz]/1500 (0.2-1)
1.5GHz~300GHz	61.4	0.163	1

■ 補助指針

(1) 人体が電磁界に不均一又は局所的にさらされる場合の指針

	10kHz-300MHz	300MHz-1GHz	1GHz-3GHz	3GHz-300GHz
電磁界強度の空間的平均値	管理環境：表1 適用 一般環境：表2 適用			
電磁界強度の空間的最大値	四肢以外： 管理：20mW/cm ² 一般：4mW/cm ²		頭部： 管理：10mW/cm ² 一般：2mW/cm ²	体表： 管理：50mW/cm ² 一般：10mW/cm ²
			眼： 管理：10mW/cm ² 一般：2mW/cm ²	
適用する空間	電磁放射源、金属物体から20cm以上離れた人体の占める空間	電磁放射源、金属物体から10cm以上離れた人体の占める空間		
平均時間	6分間			

遠方における電力密度上限値

$$1 \text{ mW/cm}^2 \approx 0 \text{ dBm/cm}^2$$

$$2 \text{ mW/cm}^2 \approx 3 \text{ dBm/cm}^2$$

$$5 \text{ mW/cm}^2 \approx 7 \text{ dBm/cm}^2$$

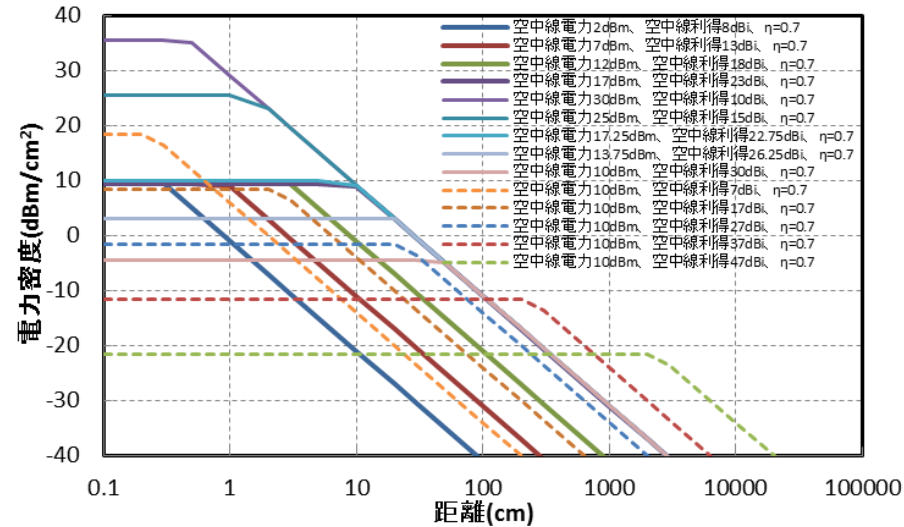
$$10 \text{ mW/cm}^2 \approx 10 \text{ dBm/cm}^2$$

近傍における電力密度上限値

アンテナ軸方向における距離と電力密度

■ アンテナ近傍は、アンテナ面における電力密度(参考1)と同等とし、遠方界の電力密度(参考2)とつながるようにグラフ化

■ ただし非常に単純化したモデルである為に、アンテナ近傍から遠方界への遷移領域は正確でないことに注意



空中線電力10 dBmの場合

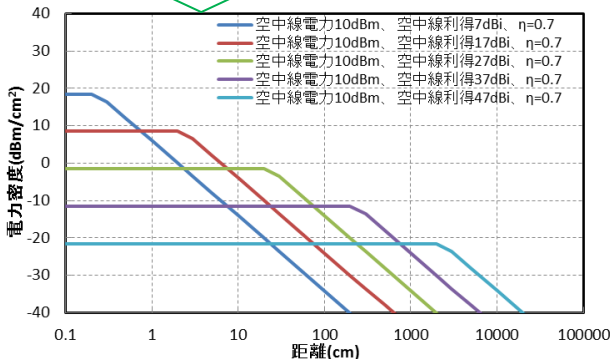
- 空中線利得が16 dBi未満だと、距離1 cm以下で10 dBm/cm²を超える場合がある
- 遠距離では空中線利得が高くなると電力密度が高くなる(実際には方位によって異なる)

EIRP40 dBmの場合

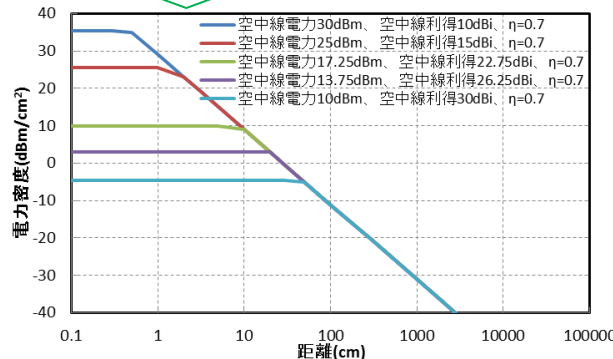
- 空中線電力が17 dBm未満だと、距離10 cm以下でも10 dBm/cm²を超えない
- 遠距離では空中線電力の値によらず電力密度は同じ(実際には方位によって異なる)

アンテナ近傍での電力密度が10 dBm/cm²を超えないようにするには

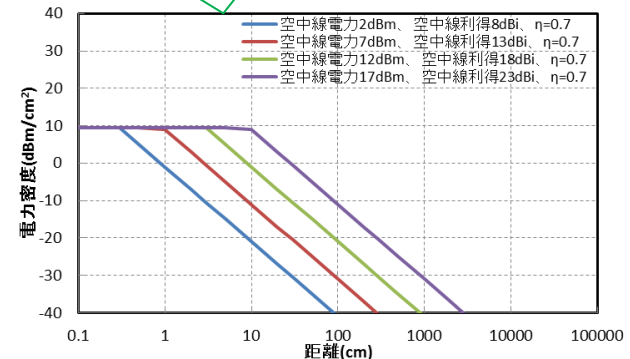
- 空中線利得が小さい場合にはアンテナ近傍で電力が集中するので空中線電力をより小さくする必要がある



空中線電力10 dBm



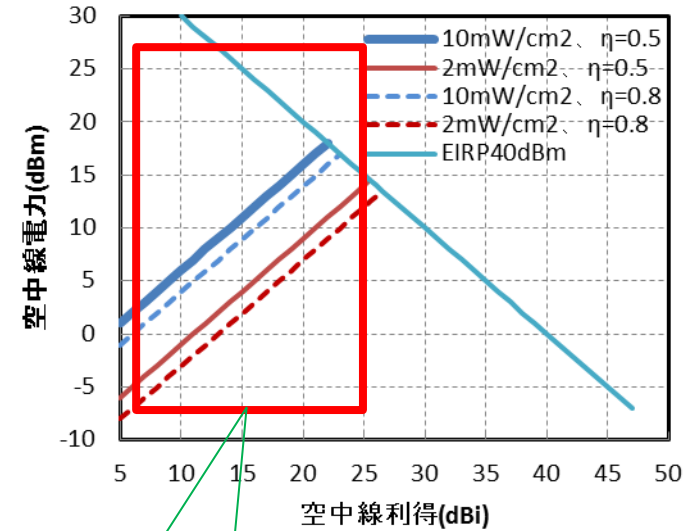
EIRP40 dBm



電力密度10 dBm/cm²以下₆

アンテナ近傍で電波防護指針を満たす条件

- 60GHz帯アンテナ近傍(10 cm以下)において、体表(10 mW/cm^2)および眼(2 mW/cm^2)における電波防護指針を満たす空中線利得および空中線電力の関係(参考1) ($\text{EIRP} \leq 40 \text{ dBm}$ の範囲のみ計算)は右記に示す通り
 - 空中線利得が低いアンテナ近傍で電波防護指針を満たすには、空中線電力の制限が必要になる



今回問題となる領域

■ 空中線利得とビーム半値角

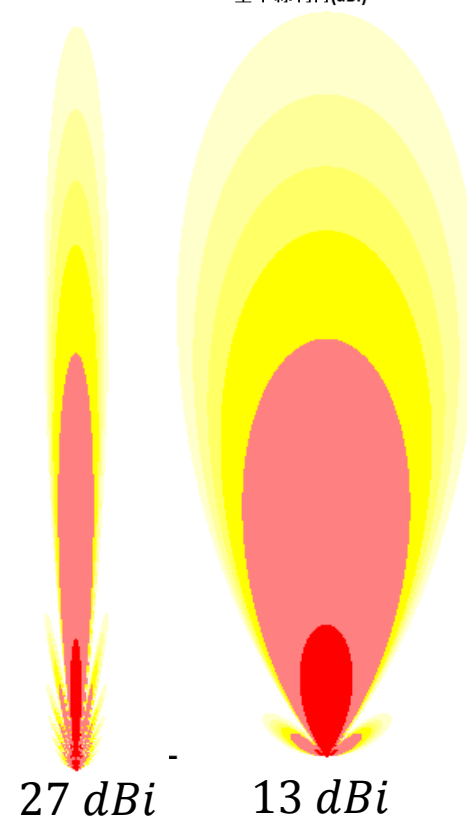
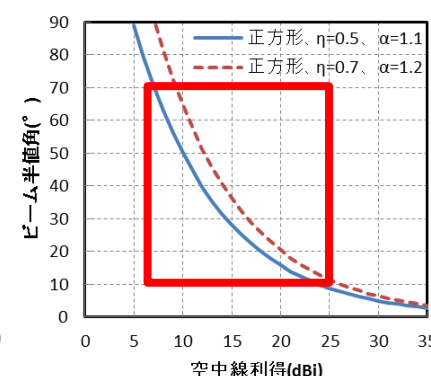
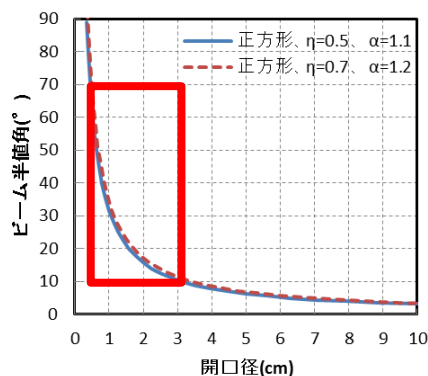
- $\theta_{hpbw} = \alpha \frac{\lambda}{D}$
 θ_{hpbw} : ビーム半値角(rad)
 α : 係数 $\alpha \geq 1$

- $D_{\square} = \sqrt{\frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}}$ なので(参考3)

$$\theta_{hpbw} = \alpha \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}}} = \alpha \sqrt{\frac{4\pi\eta}{G}}$$

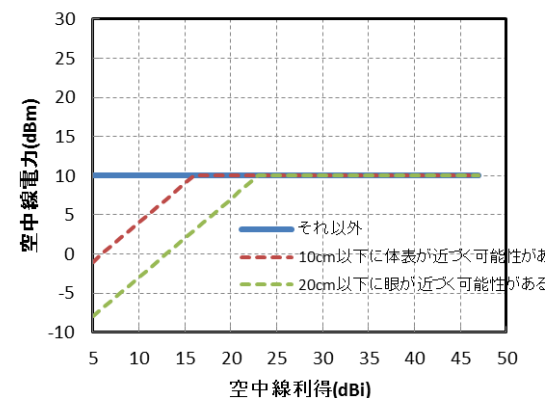
■ 同じEIRPだと、ビーム中心における電力密度は同じで、空中線利得が低いほど同じ電力密度の範囲が広がる

- 干渉する確率がそれだけ高くなる
- 空中線利得の高くしやすいミリ波通信においては、通信距離を稼ぐには空中線利得を高くし、通信エリア角を広げるにはビームフォーミングするのが本来の姿
- 低い(ビーム半値角が広い)システムにおいては、空中線電力の上限を設けるべき

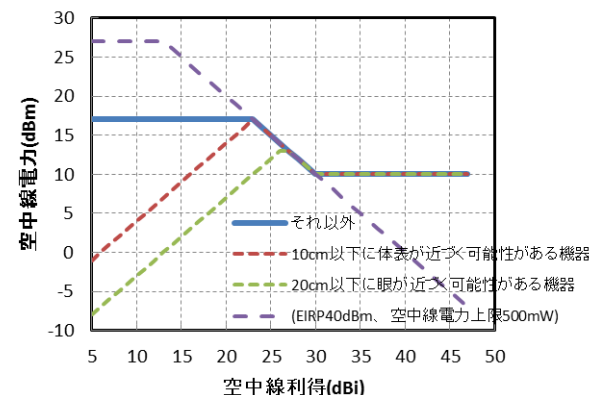


規格改定案

- 空中線利得 30dBi 以上の無線設備の場合
 - 空中線電力 10dBm 以下、空中線利得 47dBi 以下とする
- 空中線利得 30dBi 未満の無線設備の場合
 - EIRP 40dBm 以下とする
 - ただし 10cm 以下に体表、 20cm 以下に眼が近づく可能性がある機器の場合、「電波防護指針を超える電力密度とならないように注意する」旨の注記をする
 - 6分間で平均した空中線電力密度が $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下の条件を満たすには、例えばアンテナ効率 0.8 の場合、空中線利得 22dBi で 17dBm 、 20dBi で 15dBm 、 18dBi で 13dBm 、 16dBi で 11dBm 、 14dBi で 9dBm 、 12dBi で 7dBm 、 10dBi で 5dBm 、 8dBi で 3dBm 以下の必要がある
 - 眼が近づく可能性がある機器の場合は、さらに 7dB のマージン確保が必要
 - 空中線電力の上限値を 17dBm (50mW) とする
 - ビーム角が広がると干渉の懸念が高まるので、干渉の検討をより詳細に行う必要があるが、当面は 10cm 以下に体表が近づく可能性がある場合の上限である 17dBm (50mW)を空中線電力の上限値とするのが妥当ではないか
 - CMOS等で実現可能な飽和出力電力レベルは現状 $10\sim 16\text{dBm}$ 程度であり、 $4\sim 16$ 素子のアンテナの空間合成($+6\sim +12\text{dB}$)、リニアリティ確保の為にバックオフ($-4\sim -8\text{dB}$)、消費電力等を考慮すると、 17dBm を大きく超える値は不要



従来の規格



改定案

(参考1)送信アンテナ面における電力密度

■ 送信アンテナ面における電力密度は下記のように表される

$$\blacksquare S_t = \frac{P_t}{A_t} = \frac{P_t}{\frac{G_t \lambda^2}{4\pi\eta_t}} = 4\pi\eta_t \frac{P_t}{G_t \lambda^2} = 4\pi\eta_t \frac{P_{EIRP}}{G_t^2 \lambda^2}$$

S_t : 送信アンテナ面における電力密度
(一様な電力分布の場合)

P_t : 送信電力

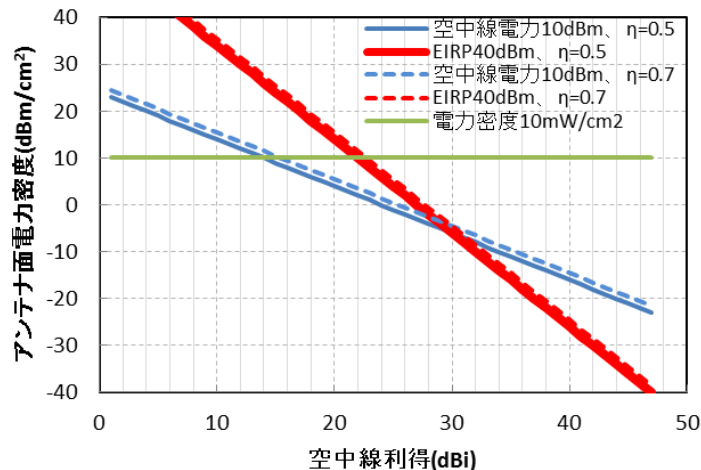
A_t : 送信アンテナの面積

G_t : 送信アンテナの空中線利得

η_t : 送信アンテナの開口効率

λ : 波長

P_{EIRP} : 等価等方輻射電力 $P_{EIRP} = P_t G_t$



■ 電波防護指針に従って60 GHz帯で10 dBm/cm² (体表、6分間の平均値)以下の電力密度となる空中線利得は

■ $S_t = 10 \text{ mW/cm}^2 = 10 \text{ dBm/cm}^2$, $\lambda = 0.5 \text{ cm}$, $\eta = 0.5$, $P_t = 10 \text{ dBm}$ とすると

$$G_t = 4\pi\eta_t \frac{P_t}{S_t \lambda^2} \approx 4 \times 3.14 \times 0.5 \times \frac{10^{\frac{10-10}{10}}}{0.5^2} \approx 14 \text{ dBi}$$

■ $S_t = 10 \text{ mW/cm}^2 = 10 \text{ dBm/cm}^2$, $\lambda = 0.5 \text{ cm}$, $\eta = 0.5$, $P_{EIRP} = 40 \text{ dBm}$ とすると

$$G_t = \sqrt{4\pi\eta_t \frac{P_{EIRP}}{S_t \lambda^2}} \approx \sqrt{4 \times 3.14 \times 0.5 \times \frac{10^{\frac{40-10}{10}}}{0.5^2}} \approx 22 \text{ dBi}$$

■ 上記の値より小さい空中線利得を持つ無線機の場合は、電波防護指針に適合するように配慮が10必要である

(参考2)遠方界における電力密度

■ 遠方界における電力密度は下記のように表される

$$\blacksquare S_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} = \frac{P_{EIRP}}{4\pi R^2}$$

P_t : 送信電力

G_t : 送信アンテナの空中線利得

P_{EIRP} : 等価等方輻射電力 $P_{EIRP} = P_t G_t$

S_r : 電力密度

R : 距離

■ 電波防護指針に従って60 GHz帯で0 dBm/cm² (全体、6分間の平均値)以下の電力密度となる距離は

■ $S_r = 0 \text{ dBm/cm}^2$, $P_{EIRP} = 40 \text{ dBm}$ のとき

$$R = \sqrt{\frac{P_{EIRP}}{4\pi S_r}} \approx \sqrt{\frac{10^{\frac{40-0}{10}}}{4 \times 3.14}} \approx 28 \text{ cm}$$

■ $S_r = 0 \text{ dBm/cm}^2$, $P_t = 10 \text{ dBm}$, $G_t = 47 \text{ dBi}$ のとき

$$R = \sqrt{\frac{P_t G_t}{4\pi S_r}} \approx \sqrt{\frac{10^{\frac{10+47-0}{10}}}{4 \times 3.14}} \approx 200 \text{ cm}$$

(参考3)空中線利得とアンテナサイズ

■ 空中線利得とアンテナサイズの関係は下記のように表される

$$■ G = 4\pi\eta \frac{A}{\lambda^2} = 4\pi\eta \frac{D_{\square}^2}{\lambda^2} = 4\pi\eta \frac{D_l D_w}{\lambda^2} = \pi^2 \eta \frac{D_o^2}{\lambda^2}$$

G : 空中線利得

η : 開口効率

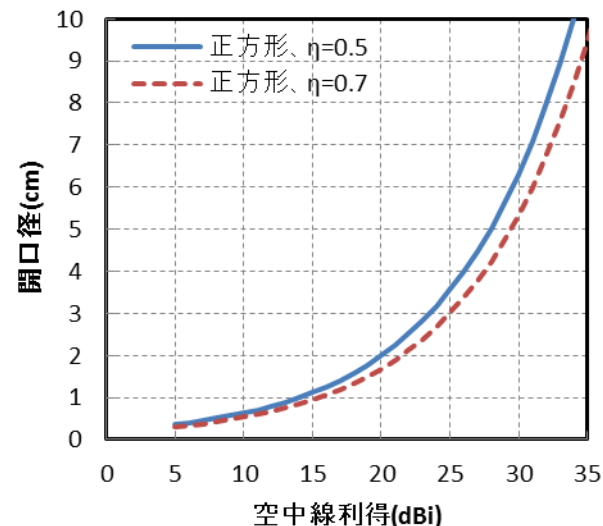
A : アンテナ面積

λ : 波長

D_{\square} : 正方形アンテナの1辺の長さ

D_l, D_w : 長方形アンテナの各辺の長さ

D_o : 円形アンテナの直径



■ 60GHz帯の正方形アンテナの場合のサイズは

- $\lambda = 0.5 \text{ cm}(60\text{GHz})$, $G = 14 \text{ dB}$, $\eta = 0.5$ の正方形アンテナの場合

$$D_{\square} = \sqrt{\frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}} \approx \sqrt{\frac{14}{4 \times 3.14 \times 0.5} \times 10^{\frac{14}{10}} \times 0.5^2} \approx 1.0 \text{ cm}$$

- $\lambda = 0.5 \text{ cm}(60\text{GHz})$, $G = 22 \text{ dB}$, $\eta = 0.5$ の正方形アンテナの場合

$$D_{\square} = \sqrt{\frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}} \approx \sqrt{\frac{22}{4 \times 3.14 \times 0.5} \times 10^{\frac{22}{10}} \times 0.5^2} \approx 2.5 \text{ cm}$$

- $\lambda = 0.5 \text{ cm}(60\text{GHz})$, $G = 47 \text{ dB}$, $\eta = 0.5$ の正方形アンテナの場合

$$D_{\square} = \sqrt{\frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}} \approx \sqrt{\frac{47}{4 \times 3.14 \times 0.5} \times 10^{\frac{47}{10}} \times 0.5^2} \approx 45 \text{ cm}$$

(参考3)遠方界となる距離

■ 遠方界とみなすことができる距離 R は、一般に $R > \frac{\lambda}{2\pi}$ および $R > \frac{2D^2}{\lambda}$ (アンテナサイズが波長に比べて大きい場合) である必要があると言われている

■ 60GHz帯で遠方界となる距離は

■ $\lambda = 0.5 \text{ cm}$ (60 GHz) のとき

● $\frac{\lambda}{2\pi} \approx \frac{0.5}{2 \times 3.14} \approx 0.08 \text{ cm}$

■ $\lambda = 0.5 \text{ cm}$ (60 GHz), $G = 14 \text{ dB}$, $\eta = 0.5$ の正方形アンテナの場合、 $D = 1.0 \text{ cm}$

● $\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}}{\lambda} = \frac{G\lambda}{2\pi\eta} \approx \frac{10^{\frac{14}{10}} \times 0.5}{2 \times 3.14 \times 0.5} \approx 4.0 \text{ cm}$

■ $\lambda = 0.5 \text{ cm}$ (60 GHz), $G = 22 \text{ dB}$, $\eta = 0.5$ の正方形アンテナの場合、 $D = 2.5 \text{ cm}$

● $\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}}{\lambda} = \frac{G\lambda}{2\pi\eta} \approx \frac{10^{\frac{22}{10}} \times 0.5}{2 \times 3.14 \times 0.5} \approx 25 \text{ cm}$

■ $\lambda = 0.5 \text{ cm}$ (60 GHz), $G = 47 \text{ dB}$, $\eta = 0.5$ の正方形アンテナの場合、 $D = 45 \text{ cm}$

● $\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \frac{G\lambda^2}{4\pi\eta}}{\lambda} = \frac{G\lambda}{2\pi\eta} \approx \frac{10^{\frac{47}{10}} \times 0.5}{2 \times 3.14 \times 0.5} \approx 8100 \text{ cm} = 81 \text{ m}$

(参考5)時間率に関する考察

- 電波防護指針は、6分間の電力密度の平均値で規定しているので、通信時間率を下げることで出力電力を上げることが可能である
- ただしミリ波通信のそもそもの目的は数Gbps以上の高いスループットにあるので、定常的に時間率を下げる方法は目的と相反する
- 数GB以下のデータを送信するのであれば、1分以内で通信が完結するので時間率を下げることは可能であるが、数100GBのデータを伝送する場合には6分以上の時間が必要になる場合もあるので、この場合は時間率を下げることは有効では無い

■ ARIB-STD-T69v3.0

■ http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T69v3_0.pdf

■ ARIB STD-T74v1.1

■ http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T74v1_1.pdf

■ ETSI EN 302 567 V1.2.1

■ http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302567/01.02.01_60/en_302567v010201p.pdf

■ FCC 13-112

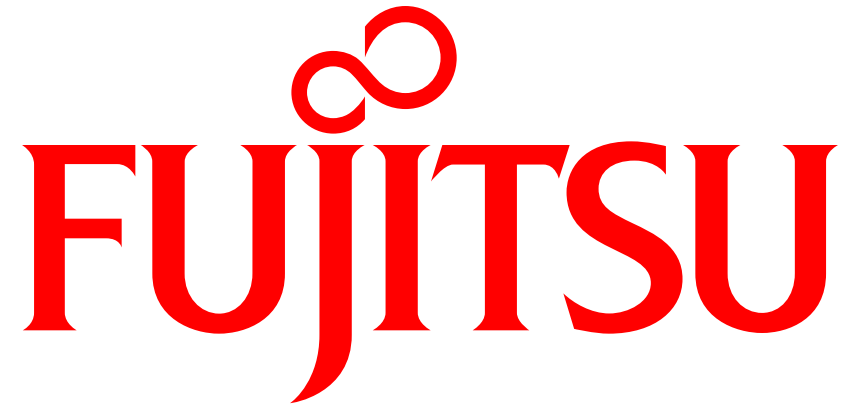
■ https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DA-13-2403A1.pdf

■ 信无函[2006]82 号

■ <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11505629/n11506593/n11960250/n11960606/n11960700/n12330791.files/n12330790.pdf>

■ DGTP-001-01

■ [https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/sp47ghz.PDF/\\$FILE/sp47ghz.PDF](https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/vwapj/sp47ghz.PDF/$FILE/sp47ghz.PDF)



shaping tomorrow with you