

テラヘルツ調査研究会 報告書 —通信編—

千葉工業大学
枚田 明彦

調査研究会の目的

テラヘルツ調査研究会は、250GHzから1THzの帯域を中心とするテラヘルツの幅広い利用・応用分野と期待されるアプリケーション、システムを明らかにするとともに、開発課題、周波数要件、制度課題などを広く調査検討し、産業界におけるテラヘルツの研究開発と実用化を促進することを目的とする。2018年度は、通信分野に関する次の事項について調査研究を行った。

- (1) 開発の現状と動向
- (2) 期待される利用アプリケーションとシステム
- (3) 実用化に向けた開発課題、周波数要件、制度課題
- (4) 課題解決のための方策
- (5) その他

調査研究会のメンバー

国立研究開発法人情報通信研究機構

Apple Japan, Inc.

池上通信機株式会社

関西テレビ放送株式会社

電気興業株式会社

日本電業工作株式会社

パイオニア株式会社

パナソニック株式会社

株式会社日立国際電気

株式会社日立製作所

富士通株式会社

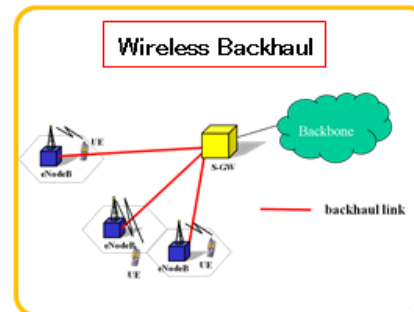
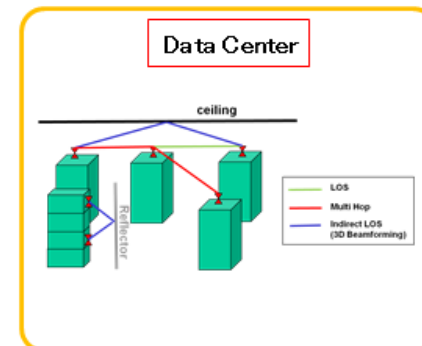
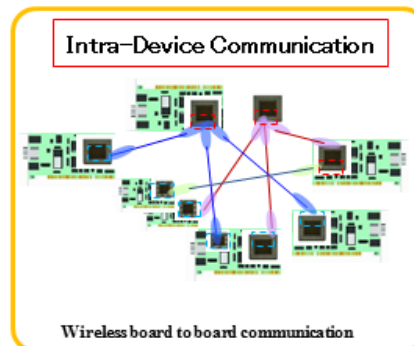
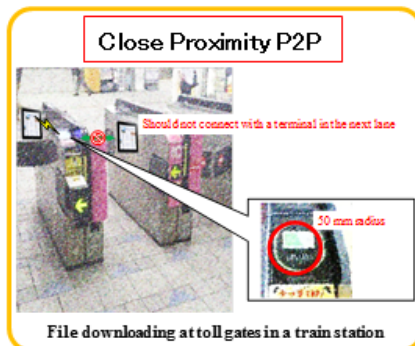
三菱電機株式会社

リーダー電子株式会社

IEEE Std 802.15.3dが想定する ユースケース

IEEE Std 802.15.3d (2017.9.28成立)が想定するユースケース

- ◆ 高い周波数と、広い周波数帯幅を活用した、100 Gbpsを想定した高速無線通信
- ◆ 通信距離は適用システムに応じて、近接から短・中距離までを想定

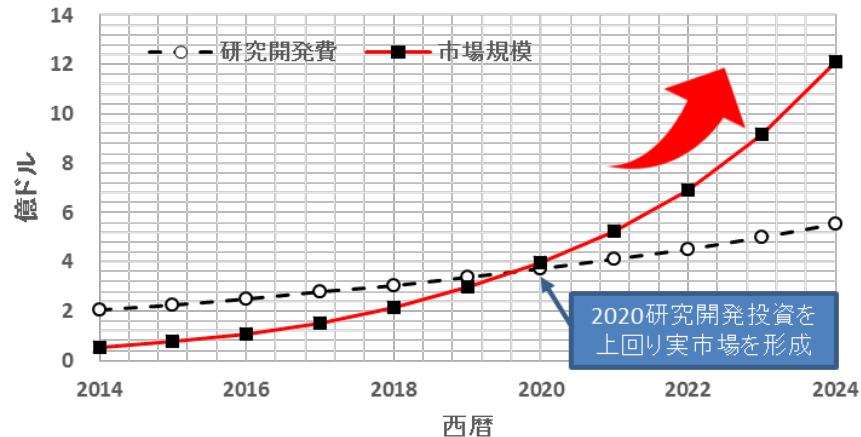


急成長する市場

研究開発費は論文数の伸び率および論文の生産性から推計

急成長する市場

- ・複数の市場レポートが急成長を予測
年間成長率(CAGR)は最大で40.4%
- ・市場規模は数十億円(2014)から1千億円超(2024)へ (BCC Research)



テラヘルツ調査研究会のユースケース

本調査研究会では、比較的早期に実現可能で、かつ実用化のニーズが高いユースケースとして、特性が異なる下記の3種類を優先検討することとした。

- チップ間・ボード間(筐体内)通信(業務用映像機器)
- 映像・FA機器間(筐体間)通信
- ドローンー地上間通信

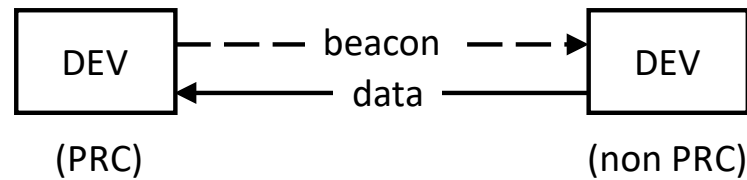
チップ間・ボード間(筐体内)通信 諸元

業務用映像機器では、4K/8K映像を低損失、低遅延で伝送できることが求められる。

- データレート 4K: 12Gbps, 8K: 48Gbps
- 伝送距離 数cm～数十cm
- 電波出力 外部からは遮蔽されているので特段の制限は無いが
筐体内の他の電子機器に影響を与えない程度
- モジュールサイズ ボード上の実装: 数mm角～数cm角、厚さ数mm
- アンテナサイズ ボード上の実装: 数mm～数cmの寸法規模
平面型が望ましい。
立体の場合でも極力薄いことが望ましい。
- チップ上の実装: 数mm～1mm以下、平面型が必須
- 消費電力 発熱・放熱により制限される。典型的には1W以下程度。

チップ間・ボード間(筐体内)通信 システムの構成

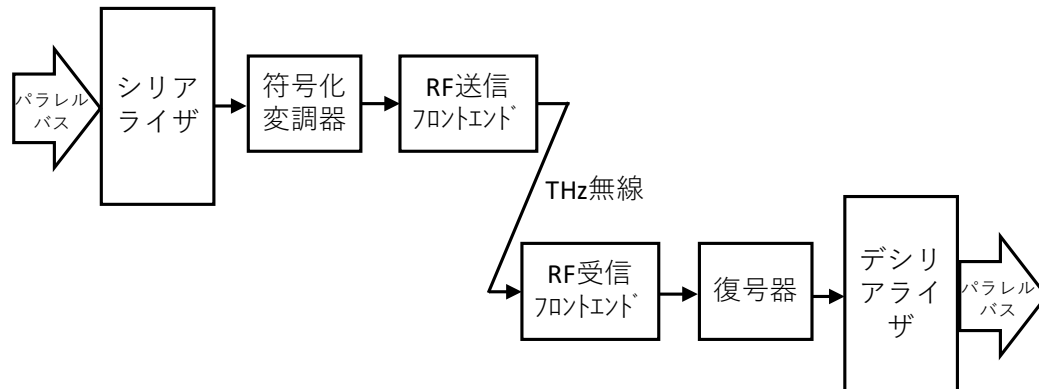
- IEEE std 802.15.3eで規定される1対1の「ペアネット」を想定



DEV: device

PRC: pairnet coordinator

- チップ間・ボード間通信のトランシーバ構成



チップ間・ボード間(筐体内)通信 市場規模

- テレビ受像機

4Kテレビの2020年における年間の出荷台数が全世界で1億1218万台と予想されている。ボード間通信に占める価格が1台あたり5000円と仮定し、仮に全ての製品のボード間通信に本技術が使用されたとすると、**約5000億円の市場規模**となる。

- 通信機器市場

日本国内の通信機器市場の2020年予測は3兆2,120億円。およそ1%がボード間通信の価格と予測される。これを通信機器市場総額の予測との比率に当てはめると、国内で321億円規模となる。世界では数兆円以上の規模になると予想される。

チップ間・ボード間(筐体内)通信 課題と対応

- 小型化
1チップ化が必要
- 相互干渉
 - (a) 相互のパスを分離するように適切なシールドを設ける
 - (b) 使用するチャンネル(周波数)を変える
 - (c) 指向性の強いアンテナを使用する

チップ間・ボード間(筐体内)通信 制度課題に対し必要な行動

- 同帯域を使用する外部の装置への影響は小さいと思われる。したがって、最大出力を限定するなどして、規制緩和されることが望ましい。また、ASKなどの簡易な変調方式を利用すれば、送受信機の構成が簡易になるため、WRC-23以降において、最大出力を限定して広帯域の使用を提案することが望ましい。

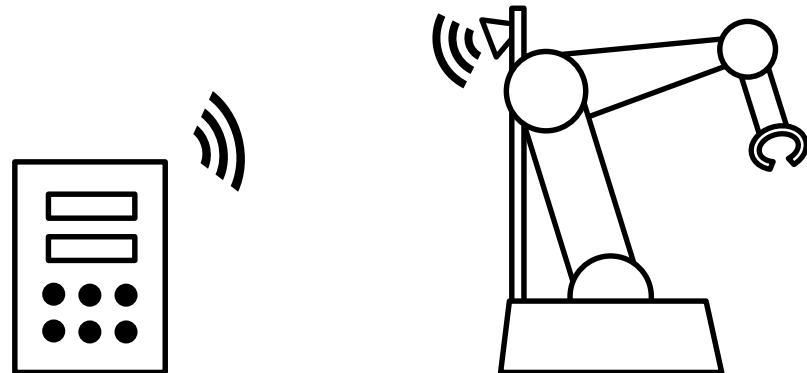
映像・FA機器間(筐体間)通信 適用分野と要求条件

業務用映像機器間通信 ⇒ 同軸・光ケーブルの代替

- 放送局内
- 放送中継車

FAにおける産業用ロボット

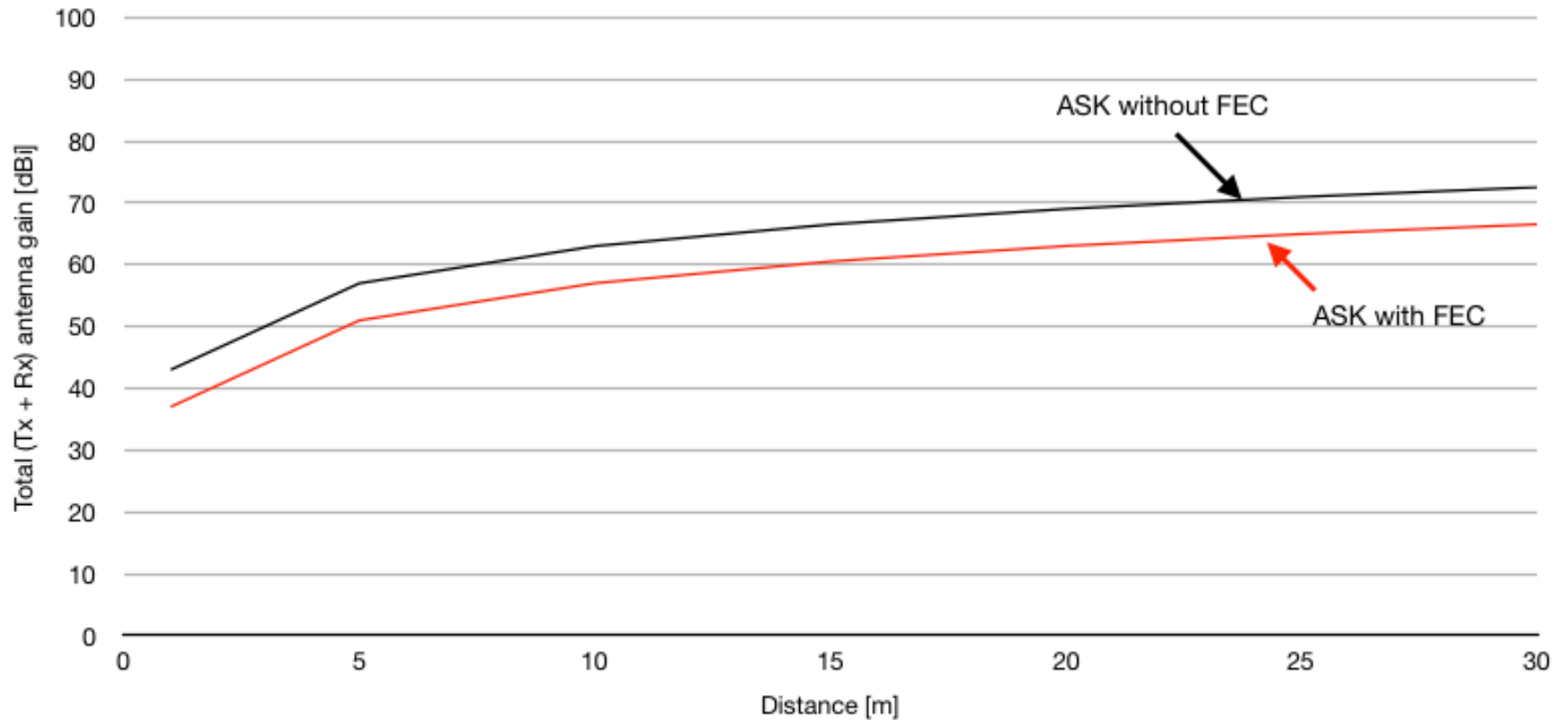
- ロボットで撮影された高精細映像等のデータを外部機器に取り出す通信



映像・FA機器間(筐体間)通信 諸元

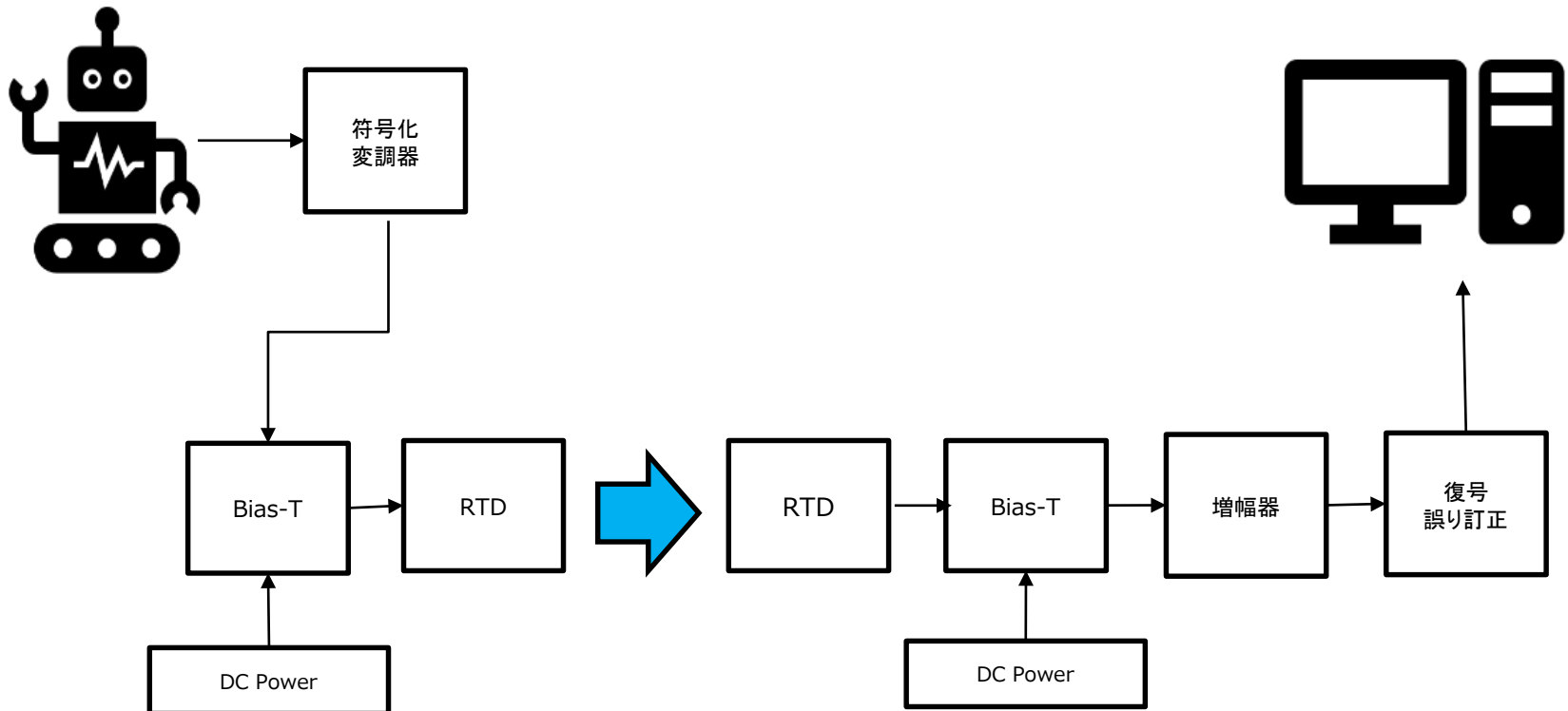
- データレート 4K: 12Gbps, 8K: 48Gbps
- 伝送距離 放送局・スタジオ: 20~30m(長くても50~60m)
医療映像用途: 数m
- 電波出力 アンテナ利得にもよるが、100mW (20dBm)程度
- モジュールサイズ 映像機器筐体内ではcmオーダーの寸法
現状機器のBNCコネクタにそのまま接続できる
形態の需要もあり
- アンテナサイズ ボード上の実装で数mm~数cmの寸法規模
平面型が望ましい
立体の場合でも極力薄いことが望ましい
- 消費電力 典型的には20W以下程度

映像・FA機器間(筐体間)通信 諸元



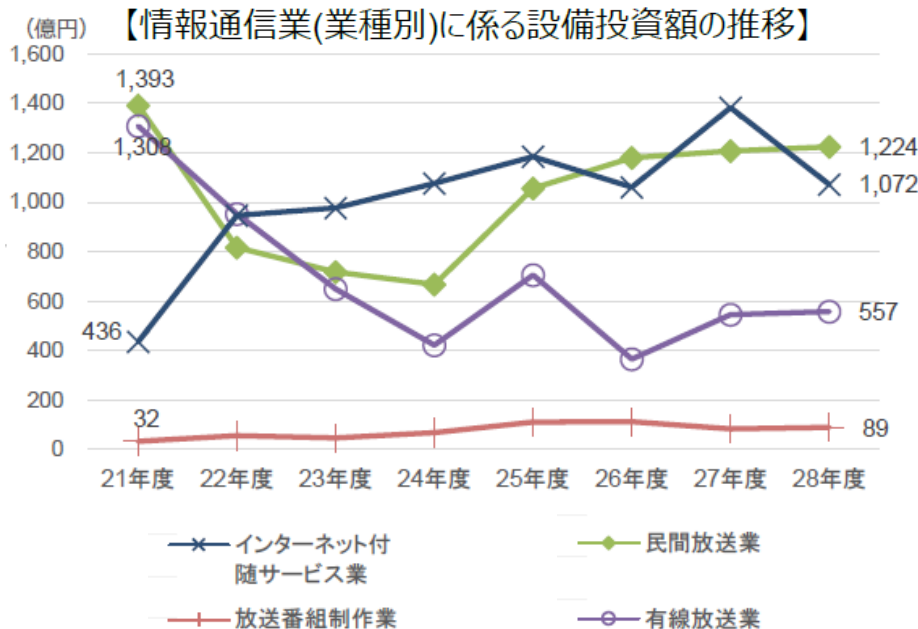
映像・FA機器間(筐体間)通信 システムの構成

- RTD を使用したシステム構成

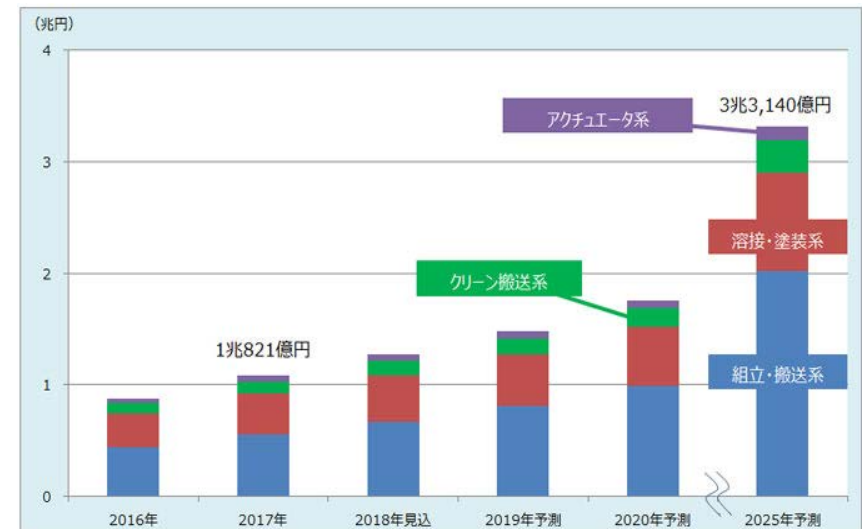


映像・FA機器間(筐体間)通信 市場規模

- ・放送用途：設備投資額の5%程度と仮定では、日本国内で約100億円程度、グローバルでは数千億円規模の市場規模が見込まれる
- ・FA機器：通信モジュールをシステム100万円だと仮定した場合、ロボットが2025年に全世界で30万台(1台1千万円と考えて算出)の販売数とし、その10%に搭載されたとすると、3万台となるため、300億円の市場規模が見込まれる。



製造業向けロボットの世界市場



映像・FA機器間(筐体間)通信 課題

- (1) 高出力化・高効率化
- (2) 高出力発振器
- (3) 高利得アンテナ
- (4) ビームフォーミング
- (5) ビームトラッキング
- (6) 8k対応ベースバンドチップ
- (7) 低コスト化(5G機器並み以下)

映像・FA機器間(筐体間)通信 制度課題に対し必要な行動

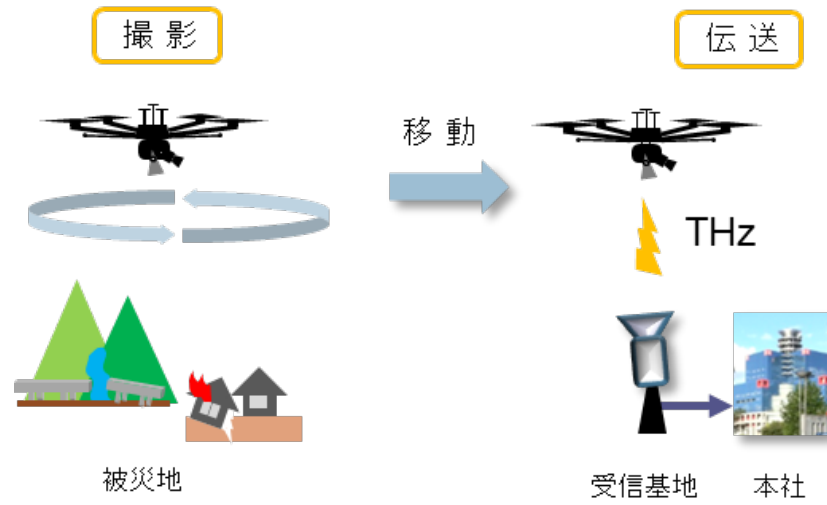
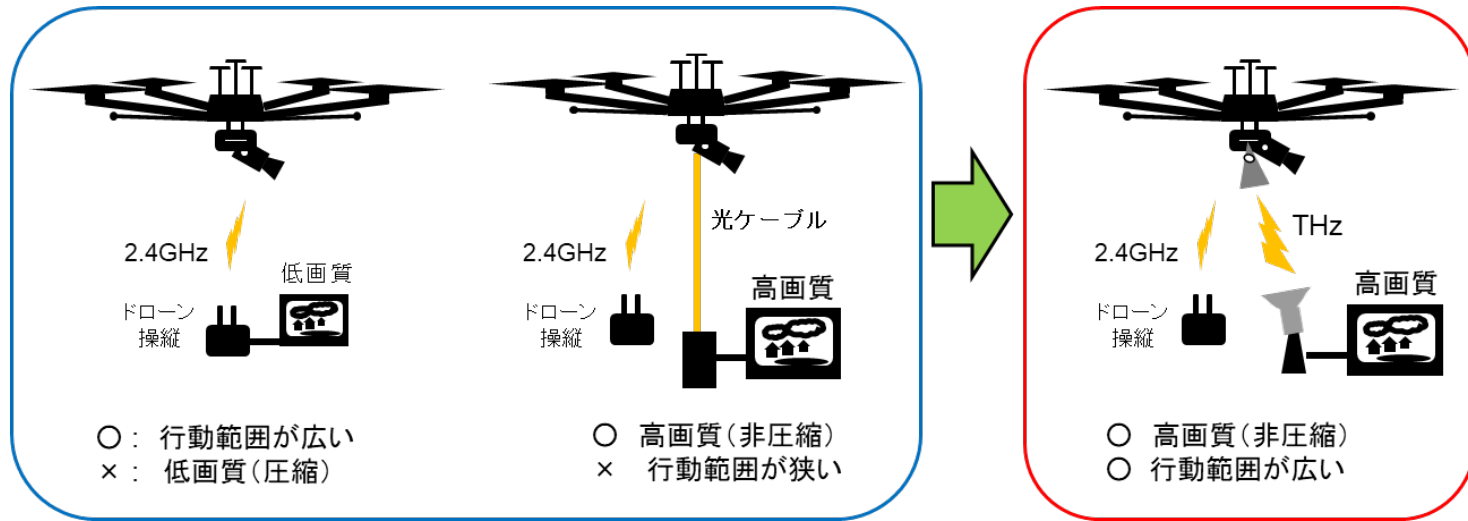
屋内用と屋外用に分け、屋内用では高出力・広帯域の使用できるように規制緩和されることが望ましい。

現時点ではWRC-19での周波数確保は450GHz以下では広帯域の確保が難しい状況にあることから、転送レートがあまり高くできないと予想される。

WRC-23以降において、屋内通信用のLMSの帯域拡大を提案していくことが望ましい。

また、周波数割当や送信電力の制限など、WRCでの議論含めて諸外国の状況も鑑み、可能な限り諸外国との協調を図っていくことが重要である。

ドローンー地上間通信 適用分野と要求条件



ドローンー地上間通信 諸元

(1) 必要な伝送速度

- ・映像圧縮装置を用いる場合 : 50Mbps ~ 200Mbps

- ・映像圧縮装置を用いない(非圧縮伝送)の場合 :

HD (60i) → 1.5Gbps

HD (60P) → 3Gbps

4K (60P) → 12Gbps

8K (60P) → 48Gbps

(2) 伝送装置(エンコーダ・変調器・送信機)に使用できる電力

- ・10W ~ 30W程度(普及機の中型ドローンの場合)

伝送装置に要する消費電力が小さいほど長時間の飛行が可能になる。

ドローンー地上間通信 諸元

(3) 伝送装置(エンコーダ、変調器・送信機)の重量目安

・2.5kg ~ 3.5kg

*ドローンの最大積載量6kg、カメラ500g~1.5kg、防振装置2kgとした場合

(4) 必要なアンテナゲイン

・必要なアンテナゲインは以下の通り。

Tx: 25dBi、Rx: 50dBi

ドローンー地上間通信 システムの構成

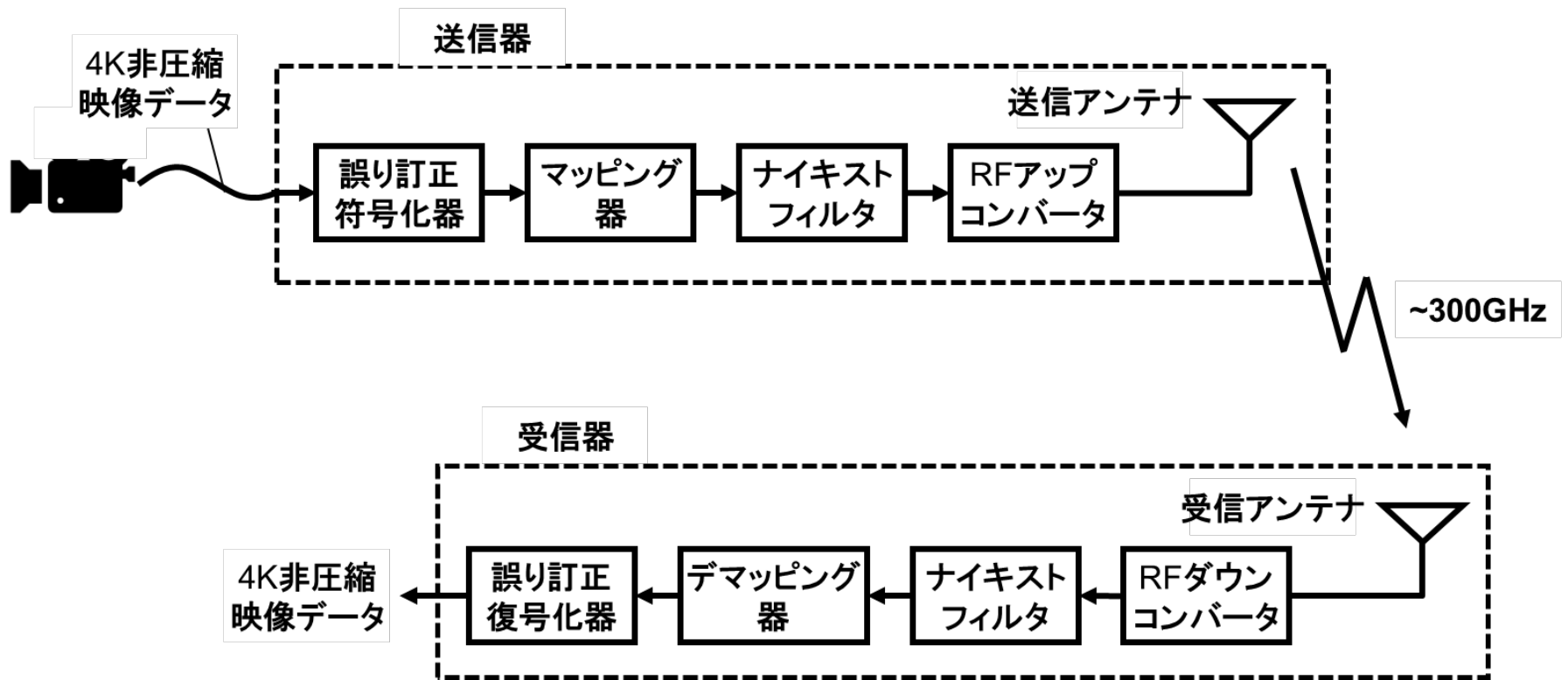
周波数帯域	252GHz～1THz：
電波出力	約100mW（InPは30mWまで、GaNが必要←電圧10V程度） * 伝送距離～ \sqrt{P} となる、10倍のパワーで約3.16倍の距離
アンテナ仕様	Tx：25dBi、Rx：50dBi（詳細は2.x節アンテナ仕様参照）
帯域幅	周波数の10%程度（搬送波300GHzだと30GHz）
モジュールサイズ	150mm角以内が望ましい
消費電力	< 10Wが望ましい（カメラ30W、バッテリー12V, 100Wh程度）
重量	< 2～3Kgが望ましい（大型ドローンなら< 5Kg）
価格	< 500万円（初期値）→ < 100万円台（量産後）
防水性	通常の防滴仕様を満足
防塵性	ドローン飛行環境での防塵性能を満足
温度環境	-10°C < 使用温度 < 50°C

ドローンー地上間通信

目標スペック

パラメータ	仕様	備考
通信距離	～150m	ドローンの上空規制による
伝送速度	50Gbps以上	8K非圧縮伝送に対応
周波数	252.72～321.84GHz	IEEE Std 802.15.3dに準拠
占有帯域幅	8.64/12.96/17.28/25.92GHz等	IEEE Std 802.15.3dに準拠
変調方式	ASK、BPSK、QPSK、16QAM等	
送信出力	100mW 10mW以下	免許必要 免許不要
送信アンテナ利得	24dBi	標準ホーン(市販)を想定
モジュールサイズ	T.B.D	ドローン、ジンバルサイズによる
消費電力	20W以下	
重量	1kg以下	ドローンのペイロード:6.7kg

ドローンー地上間通信 システム構成



ドローンー地上間通信

4K(12Gbps) 伝送回線設計例

ドローンと基地局の距離を100m、キャリア周波数285.5GHzの場合、パスロス L は約121.6dB、**送信電力 10mW**、送信／受信アンテナ 25/50 dBi、角度ずれ 3 dB

$$\begin{aligned} S &= P_t + (G_t - C) - L + (G_r - C) \\ &= 10 + 25 - 3 - 121.6 + 50 - 3 = -42.6\text{dBm} \end{aligned}$$

雑音指数 $F = 10\text{dB}$ 、動作温度を $T = 300\text{K}$ 、**12 Gbps 伝送 QPSK R=1/2(畳み込み符号想定)** の場合の、等価雑音帯域幅 B は12 GHz

$$N = F \cdot kTB = -63.0\text{dBm} \quad \frac{S}{N} = 20.4\text{dB}$$

熱雑音環境下でのQPSK R=1/2(畳み込み符号想定)の所要S/Nは約8dB弱

送受信バックオフ(一般的にQPSKであれば2~3dB程度)、回線マージン(~3dB)を考慮しても、回線設計は成り立つ

ドローンー地上間通信

8K(48Gbps) 伝送回線設計例

ドローンと基地局の距離を100m、キャリア周波数285.5GHzの場合、パスロス L は約121.6dB、**送信電力 100mW**、送信／受信アンテナ 25/50 dBi、角度ずれ 3 dB

$$\begin{aligned} S &= P_t + (G_t - C) - L + (G_r - C) \\ &= 20 + 25 - 3 - 121.6 + 50 - 3 = -32.6\text{dBm} \end{aligned}$$

雑音指数 $F = 10\text{dB}$ 、動作温度を $T = 300\text{K}$ 、**48 Gbps 伝送 16QAM R=3/4(畳み込み符号想定、誤り率 10^{-6})** の場合の、等価雑音帯域幅 B は18 GHz

$$N = F \cdot kTB = -61.3\text{dBm} \quad \frac{S}{N} = 28.7\text{dB}$$

48 Gbps 伝送 16QAM R=3/4(畳み込み符号想定、誤り率 10^{-6}) の場合の
所要 S/N は約 14 dB 弱

送受信バックオフ(一般的にQPSKであれば2~3dB程度)、回線マージン(~3dB)を考慮しても、回線設計は成り立つ

ドローンー地上間通信 ユースケース

- 放送局(民放、NHK)、映像制作会社
- 有人ヘリへの転用(高画質伝送、高速ファイル転送)
- 測量分野
- 上空監視(防衛、警察、セキュリティ)

ドローンー地上間通信 市場規模予測

- 送受信機各100万円(送信機:ドローン、地上:受信機 一式200万円)と仮定した場合
- 2020年にドローンに搭載されるテラヘルツ送受信機の市場予測は、ドローン総数の1%が送受信機を利用する場合として300億円以上
- 2025年には技術が成熟しドローン総数の10%が送受信機を利用する場合として8600億円の市場が予測できる。

ドローンー地上間通信 課題

(1) アンテナに関する技術課題

(a) 送信アンテナに関する課題

- ① 軽量化
- ② ジンバル技術によるビーム方向調整

(b) 受信アンテナに関する課題

- ① 円偏波の実現
- ② 反射鏡の鏡面精度の向上
- ③ ビームスキャンの実現

(2) 高精度なアンテナ防振装置(方向調整機能)の開発

(3) 送受信増幅器の開発

ドローンー地上間通信

制度課題に対し必要な行動

高精細映像の無線伝送アプリケーションを想定した場合、占有帯域が数十GHz(例えば帯域幅17.28GHz、25.92GHz等)に達することから他ユーザとの周波数分割、時間分割によるシステム共存は難しい。

運用中は単一ユーザの占有使用が求められる。従来の無線システムでは複数システム間で周波数を共用するために、簡易な手法としてキャリアセンスや連続送信パケット長の制限が適用されているが、本アプリケーションでは必ずしも適切な手法とはならない可能性がある。

ここで検討しているシステムは、占有帯域幅は広いものの、見通し通信で、尚且つ半値角0.5度といった極端に細いビームで運用されることから、同じ周波数帯を使用しているシステムが偶然接近したとしても、システム間で継続的に与干渉／被干渉が生じる可能性は極めて低い。

一定時間継続して干渉が生じる場合にのみ発信を停止するなど、周波数共用ルールを検討、整備する必要があると考えられる。