

2024年5月16日

Rohde & Schwarz Technology Symposium 2024 Japan

muRata
INNOVATOR IN ELECTRONICS

ミリ波帯アンテナ一体型 モジュール技術

株式会社村田製作所
上田 英樹

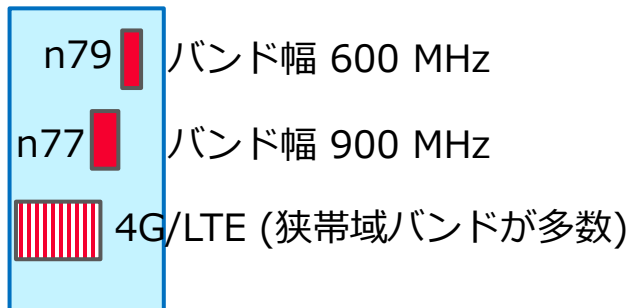


- ◆ はじめに
- ◆ パッケージング技術
- ◆ アンテナ技術
- ◆ 材料技術
- ◆ ミリ波帯を用いるメリット
- ◆ まとめ

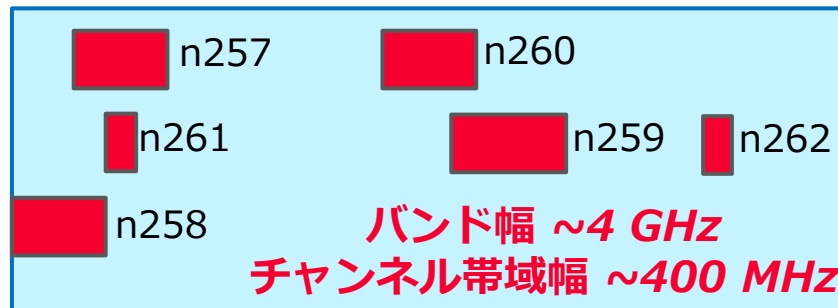
- ◆ はじめに
- ◆ パッケージング技術
- ◆ アンテナ技術
- ◆ 材料技術
- ◆ ミリ波帯を用いるメリット
- ◆ まとめ

5Gで使用されるRF周波数帯

Sub6



ミリ波帯



Frequency

6 GHz

24.25 GHz

52.6 GHz

ミリ波帯への期待

- ◆ 将来のトラフィック増加への対応
- ◆ 広帯域性を活かした革新的アプリケーション創出

5Gにおけるミリ波のトラフィック量

【参考】電波の利用状況調査の結果（帯域ごとの5G基地局の整備状況）

- 事業者ごとの5G基地局の整備状況は、NTTドコモや楽天モバイルはSub6やミリ波が中心となっており、KDDIやソフトバンクはローバンド・ミッドバンドの基地局数が多くなっている。
- 5Gの全国人口カバー率（2022年3月末時点で93.2%）はローバンド・ミッドバンドによる寄与が大きい。Sub6については、カバー率は限られているが、処理しているトラフィック量は最も多い。ミリ波帯については、局数も少なく、カバー率は0.0%、処理しているトラフィック量もほぼなく、限定的な利用にとどまっている。

帯域別の各社5G基地局数と人口カバー率

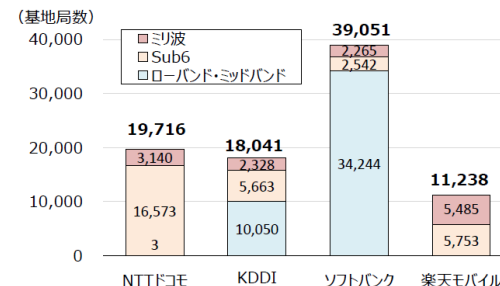
	5G基地局数（人口カバー率）			
	NTTドコモ	KDDI	ソフトバンク	楽天モバイル
700MHz	-	4,334 (55.5%)	12,174 (90.7%)	-
1.7GHz	-	7 (0.0%)	10,670 (83.9%)	-
3.4GHz/ 3.5GHz	3 (0.0%)	5,709 (30.1%)	11,400 (52.8%)	-
3.7GHz	7,895 (15.4%)	5,226 (2.4%)	2,542 (14.3%)	5,753 (12.6%)
4.0GHz/ 4.5GHz	8,678 (31.8%)	437 (0.0%)	-	-
28GHz	3,140 (0.0%)	2,328 (0.0%)	2,265 (0.0%)	5,485 (0.0%)

↑
周波数：低
伝送情報量：小
カバーエリア：大

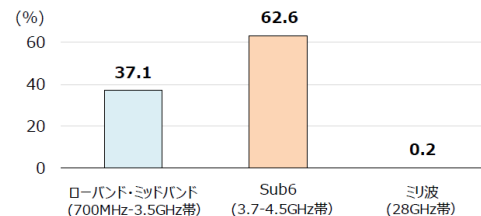
↓
周波数：高
伝送情報量：大
カバーエリア：小

（出典）総務省：令和4年度携帯電話及び全国BWAに係る電波の利用状況調査の調査結果の概要を基に作成（いずれも2022年3月時点の値）

事業者別の5G基地局整備状況

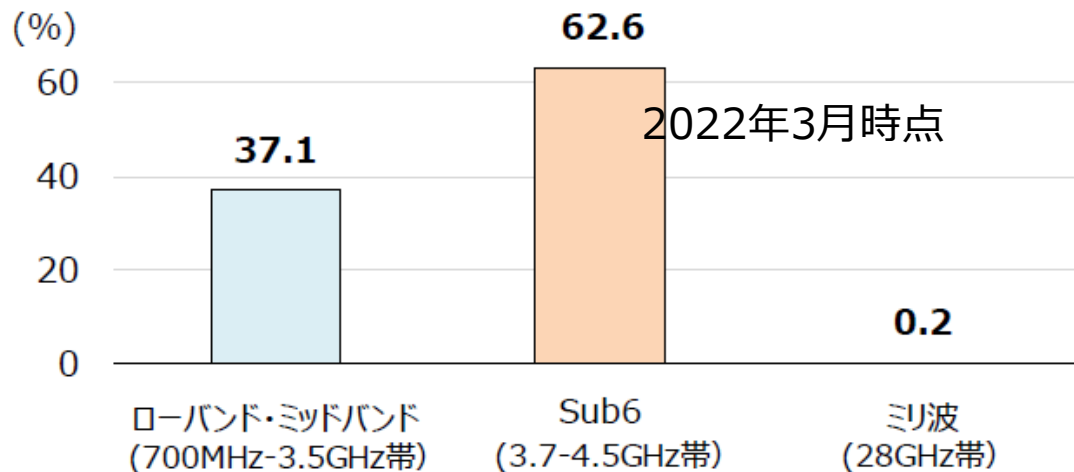


帯域別の5Gトラフィック量



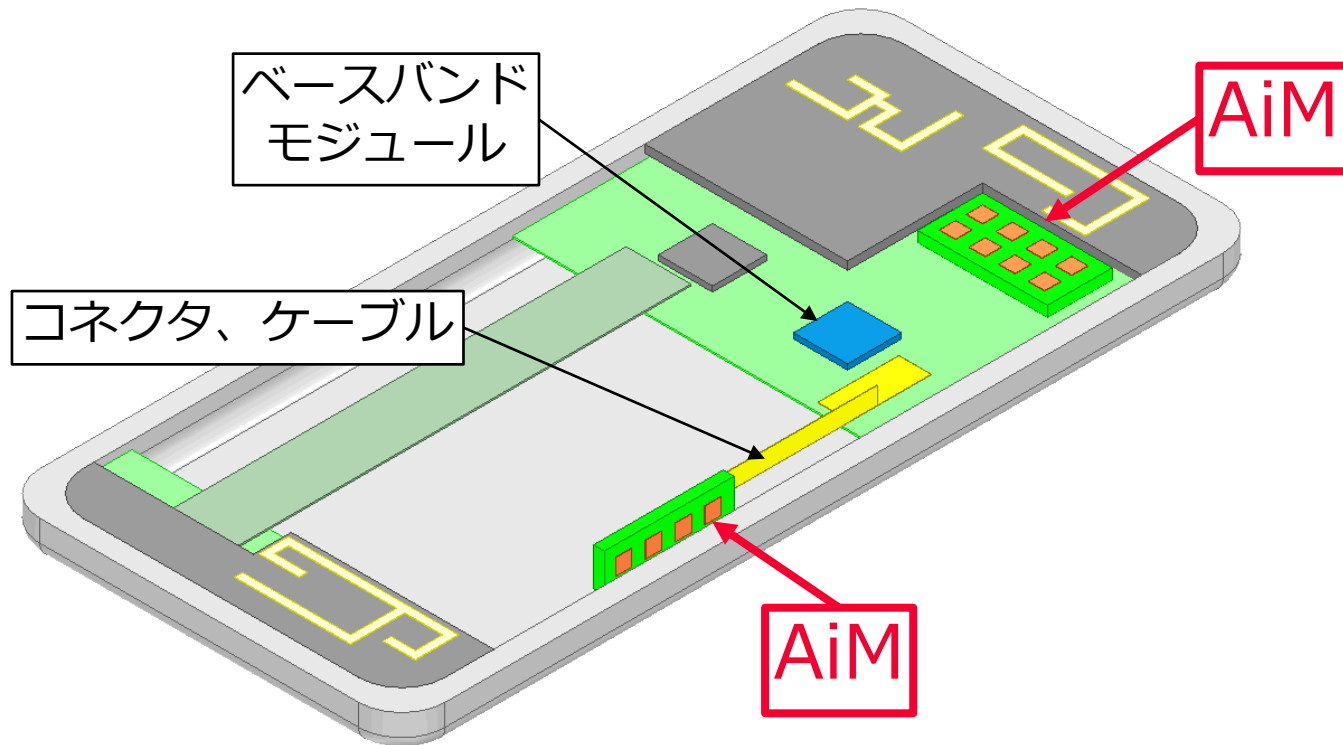
出典：総務省, 5Gビジネスデザインワーキンググループ（第3回）配布資料, 令和5年2月9日

帯域別の5Gトラフィック量



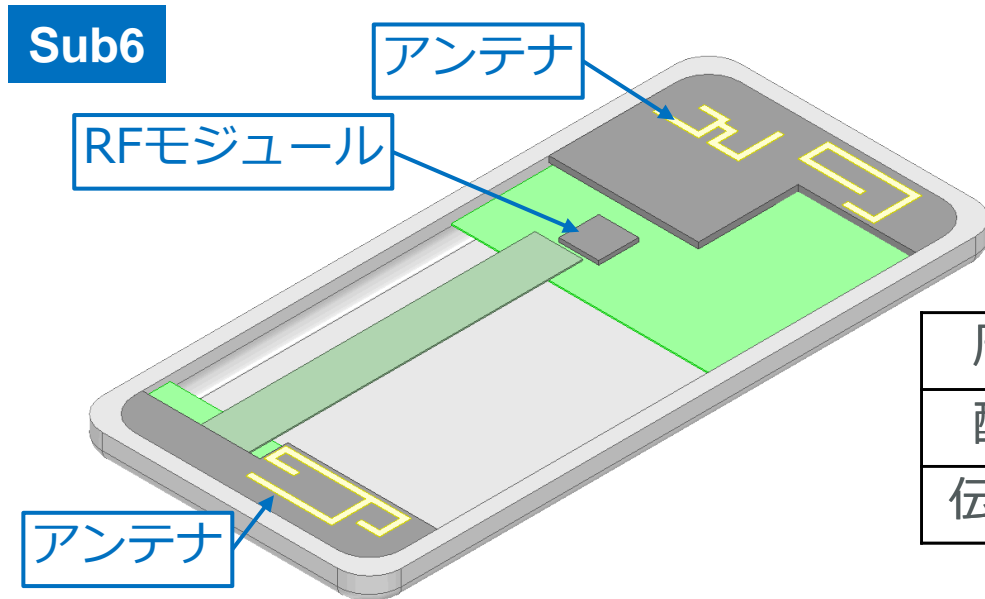
5Gにおけるミリ波のトラフィック量は
全体の0.2%に留まっている (2022年3月時点)

出典：総務省, 5Gビジネスデザインワーキンググループ (第3回) 配布資料, 令和5年2月9日



AiM: Antenna integrated module

Sub6のハードウェア構成とミリ波帯の伝送損失

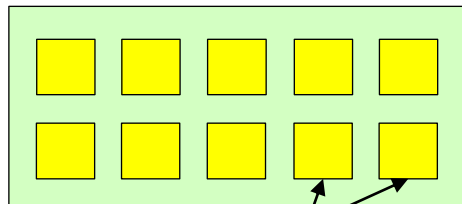


	Sub6	ミリ波帯
周波数	2 GHz	28 GHz
配線長	50 mm	50 mm
伝送損失	1.5 dB	7.5 dB

ミリ波帯でSub6と同じ配線長を用いた場合、伝送損失が増加する問題がある

AiM: Antenna integrated Module

Top view



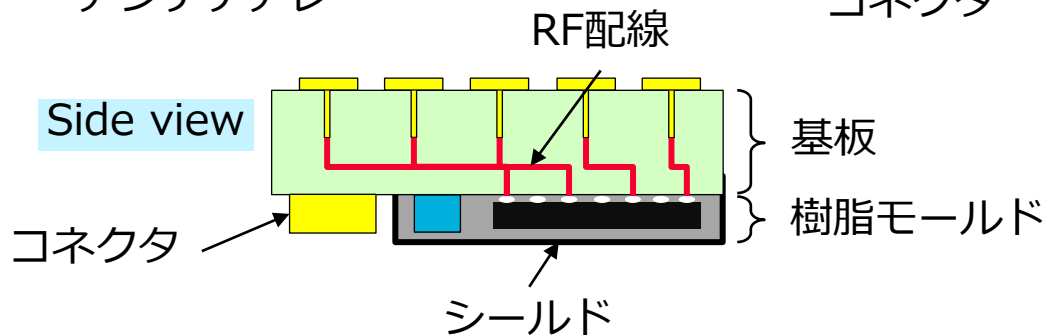
アンテナアレー

Bottom view



コネクタ

Side view

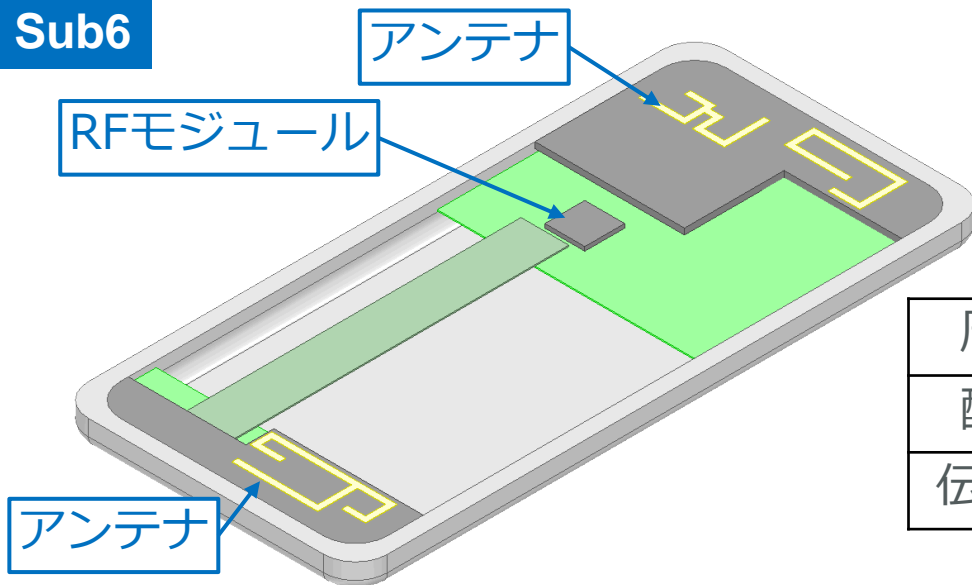


AiMはRFICからアンテナまでの配線長を最短化し、
伝送損失を最小化できるモジュール形態である

AiMを用いた低損失なミリ波帯のハードウェア構成

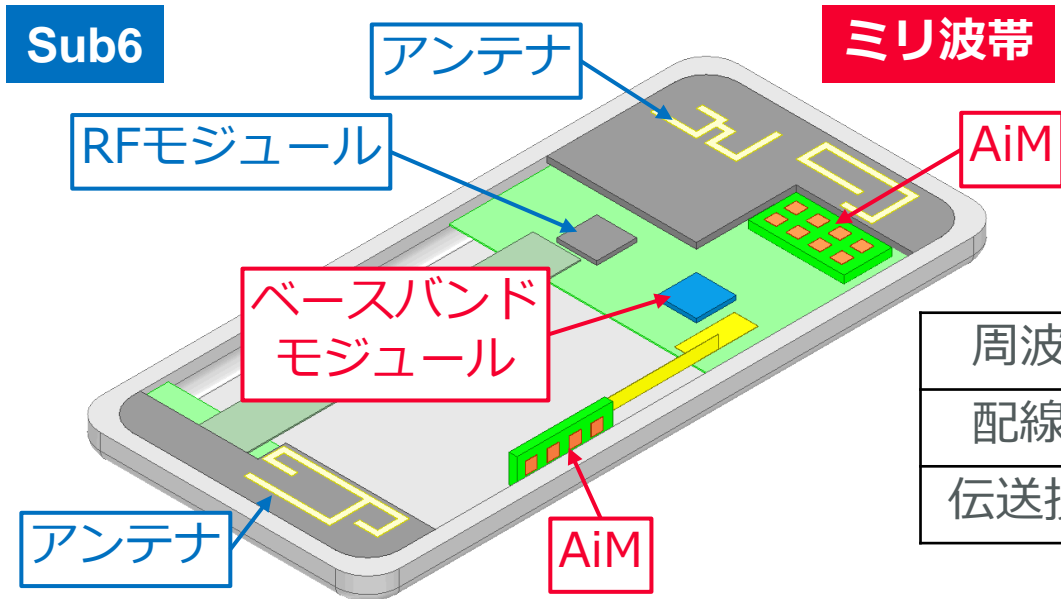


Sub6



	Sub6	ミリ波帯
周波数	2 GHz	28 GHz
配線長	50 mm	50 mm
伝送損失	1.5 dB	7.5 dB

AiMを用いた低損失なミリ波帯のハードウェア構成



	Sub6	ミリ波帯	
周波数	2 GHz	28 GHz	
配線長	50 mm	50 mm	10 mm
伝送損失	1.5 dB	7.5 dB	1.5 dB

AiMの利用

AiMを用いてRFの配線長を最短化することで、
ミリ波帯でもsub6と同等の伝送損失を実現できる

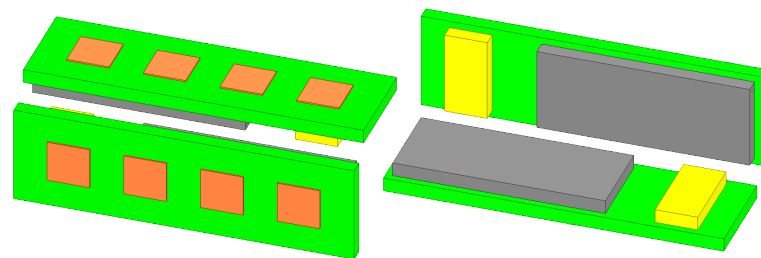
- ◆ はじめに
- ◆ パッケージング技術
- ◆ アンテナ技術
- ◆ 材料技術
- ◆ ミリ波帯を用いるメリット
- ◆ まとめ

L-shape AiM

L-shape AiM

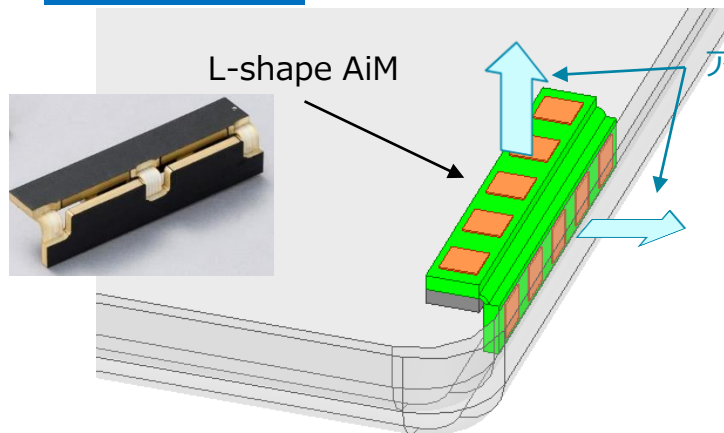


Flat-shape AiM

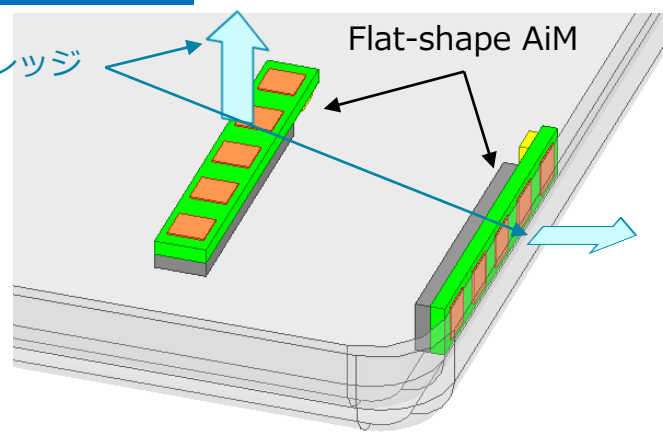


メトロサーク™の形状自由度の活用でL-shape AiMを実現し、より少ないRFICの数でより広いカバレッジを実現できる

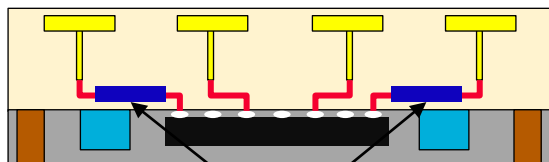
L-shape AiM



Flat-shape AiM

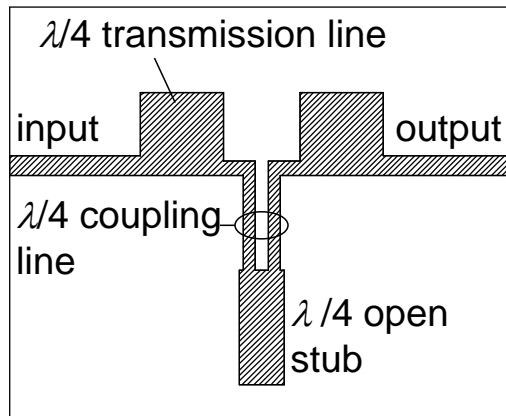


L-shape AiMは、異なる方向に2つのFlat-shape AiMを配置した場合と同等のアンテナカバレッジを実現でき、占有体積の低減とシステムの低コスト化に貢献できる

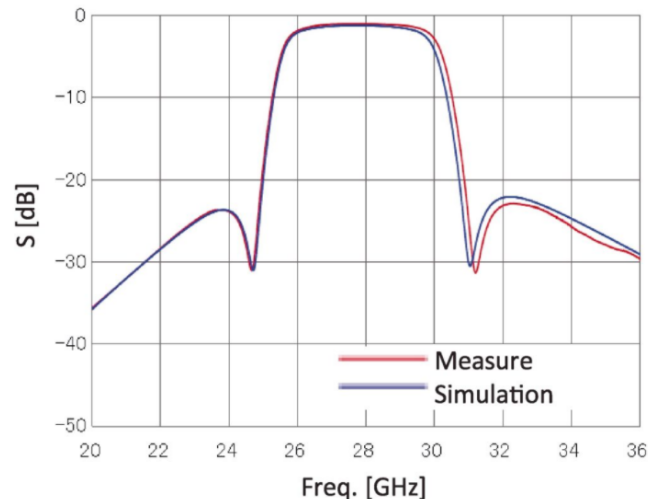


パターンフィルタ

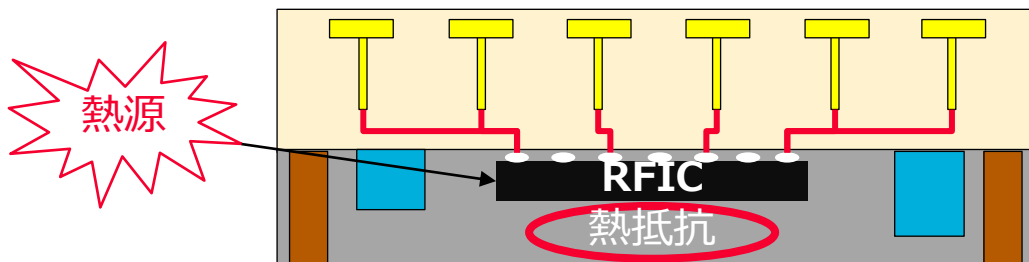
ローパスフィルタの構成の例



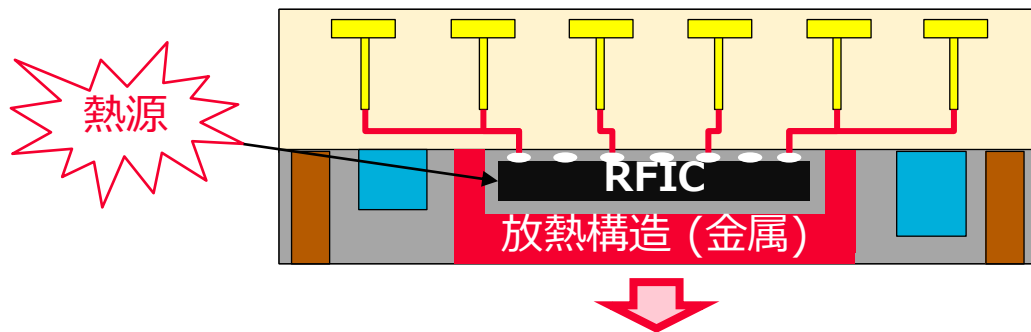
バンドパスフィルタ特性の例



不要放射抑圧のため、フィルタが必要になる場合がある
波長が短いので、基板内の伝送線路を用いてフィルタを内蔵できる



アンテナアレー面には放熱構造を配置できない
RFIC下部の樹脂層が厚いため、放熱性が悪い

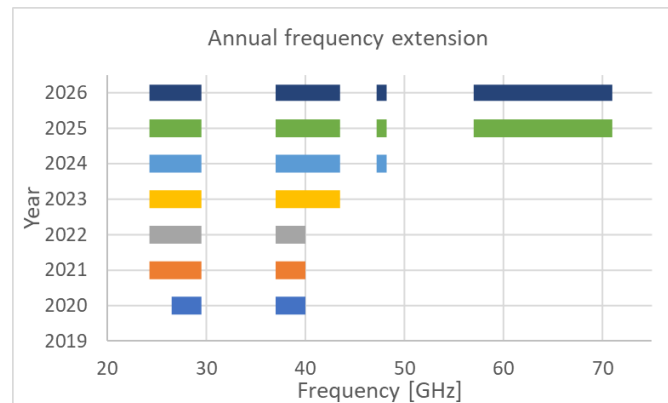
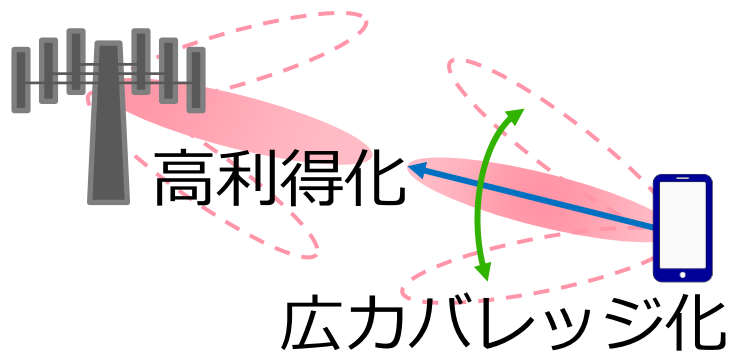


ヒートシンクや実装先の基板に放熱

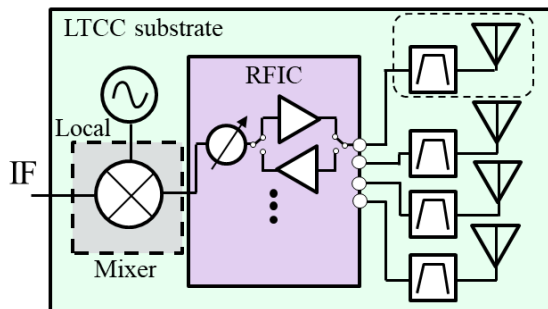
アンテナアレー面には放熱構造を配置できない
RFIC下部の樹脂層が厚いため、放熱性が悪い
→ 放熱構造を内蔵し、RFICの発熱対策を行う

- ◆ はじめに
- ◆ パッケージング技術
- ◆ アンテナ技術
- ◆ 材料技術
- ◆ ミリ波帯を用いるメリット
- ◆ まとめ

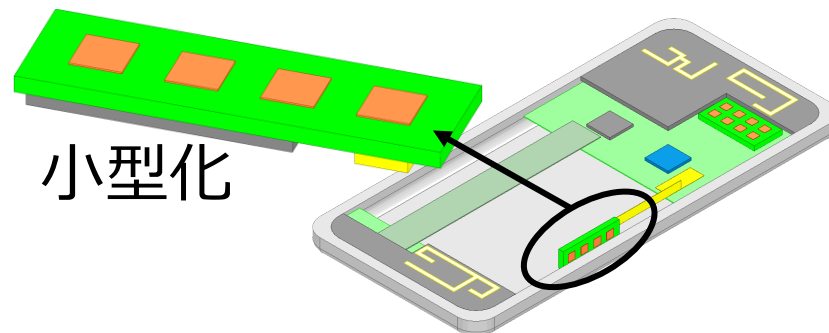
ミリ波帯におけるアンテナの課題



広帯域化・マルチバンド化

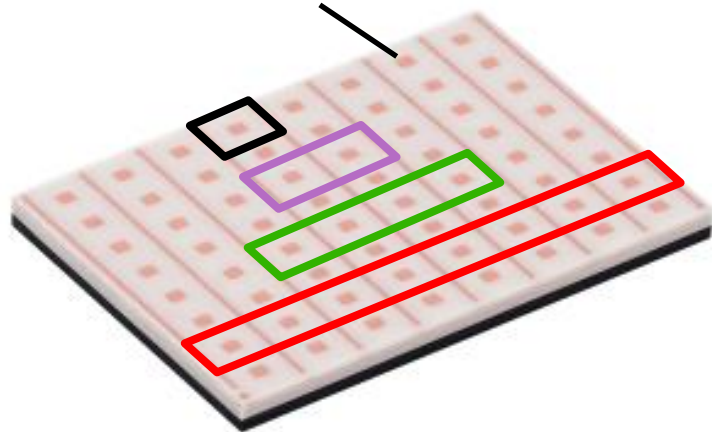


フィルター体化

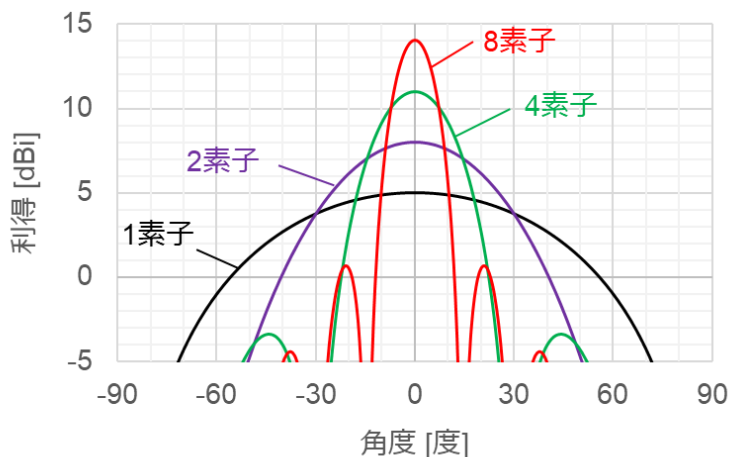


パッチアンテナをアレー化

パッチアンテナ



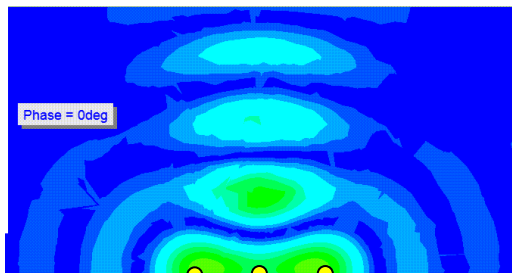
素子数と利得・放射パターンの関係



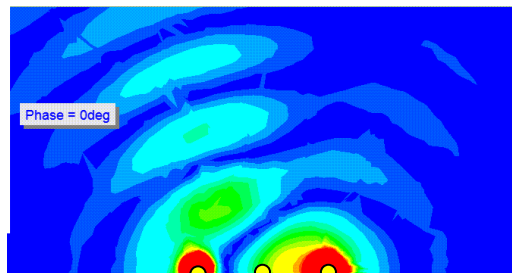
アレー化により面積を増加し、高利得化を実現する

素子間位相差とステアリング角 (素子間隔 = 1/2波長)

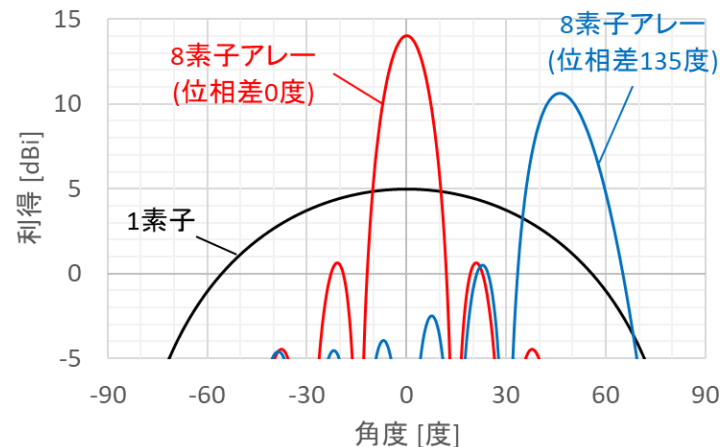
3素子アレーの例



位相差無し

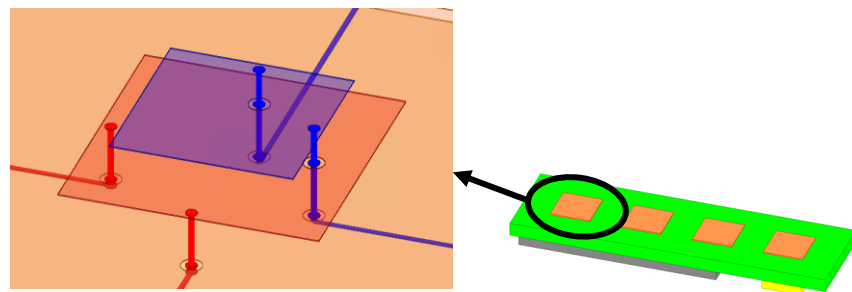
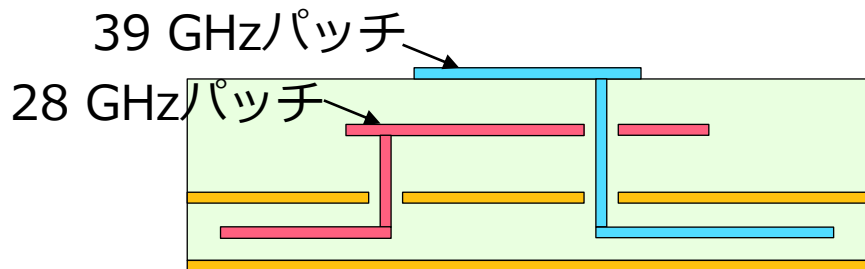


位相差有り



アレーの素子間に位相差を与えることで、ビームステアリングができる
1素子の指向性をアレー数で増幅するため、広角での高利得化には限界がある

アンテナスタックによる 小型マルチバンドアンテナ

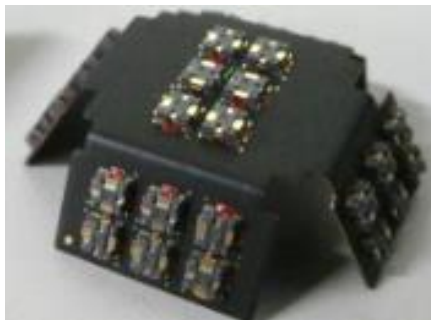


同一領域で2周波・2偏波の
アンテナを実現する

動作周波数帯が異なるパッチアンテナをスタックし、
小型かつマルチバンドのアンテナを実現する

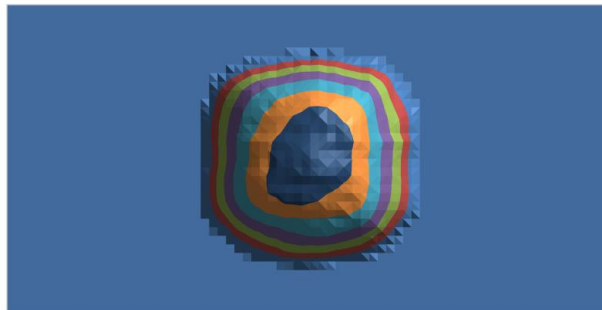
広カバレッジ化：多面形状

5面曲げAiM



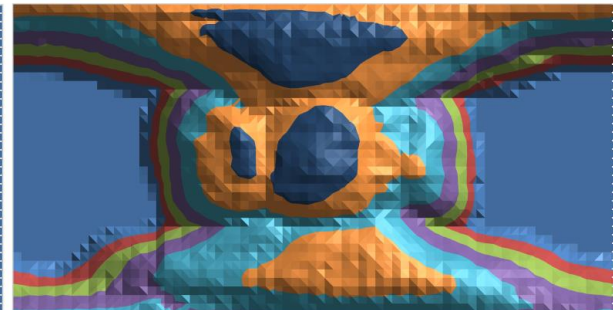
メトロサーク™を曲げた
広カバレッジなAiM

1面のみの利得カバレッジ

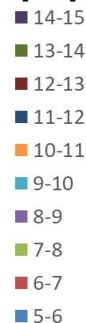


アンテナを5方向に向けることで
カバレッジが拡大する

5面曲げAiMでの利得カバレッジ

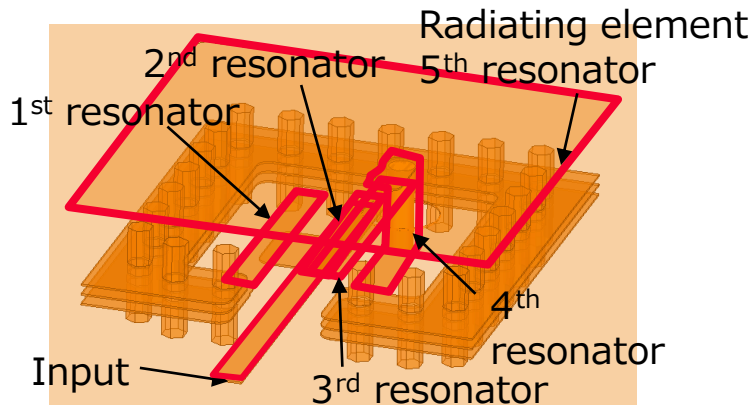


[dBi]



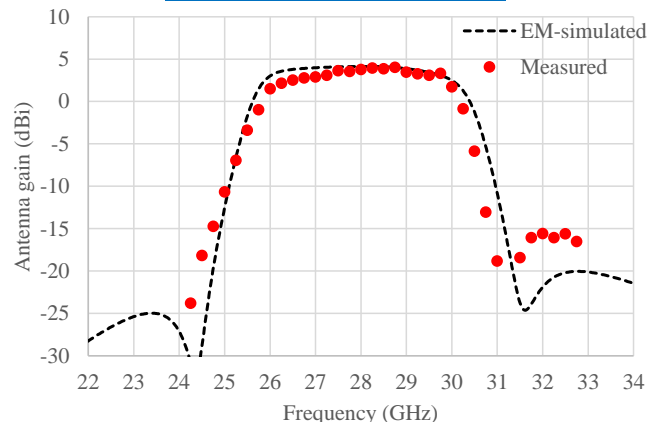
メトロサーク™の形状自由度を活用し
広カバレッジな多面形状のAiMを実現できる

フィルタリングアンテナ



アンテナの放射素子と、フィルタを構成する多段の共振器を同一領域に形成した

利得の周波数特性



n257帯で2.5dBi以上の利得と急峻なスカート特性を実現した

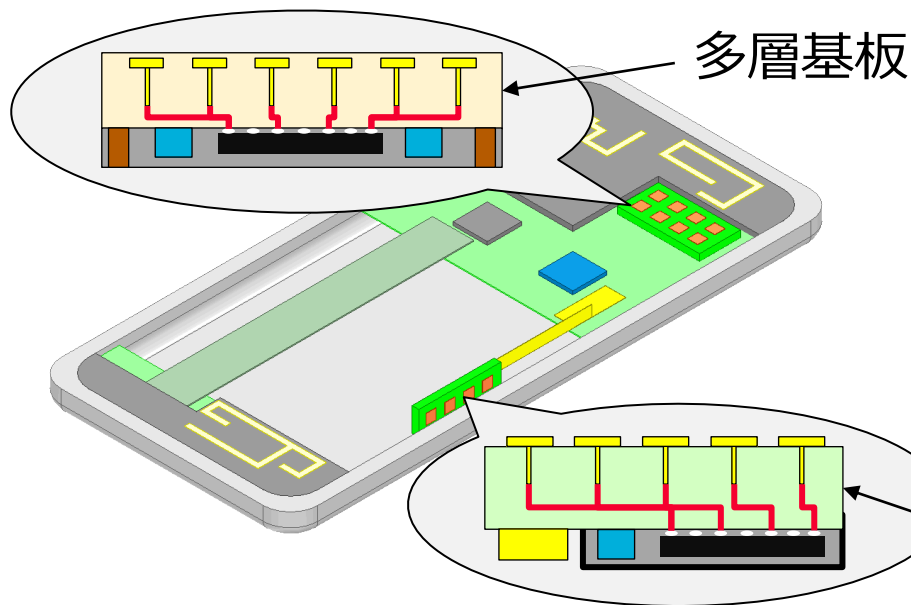
RFICと各アンテナ間にフィルタが必要な場合がある

アンテナの放射素子を多段フィルタの共振器の一つとみなし、アンテナとフィルタの一体化による回路の小型化を実現する

K. Sudo, et al., "A 28 GHz Band Dual-Polarized LTCC Filtering Antenna with Extracted-pole Unit," Proc. of 2022 Asia-Pacific Microwave Conf., 306-308, Nov. 2022.

- ◆ はじめに
- ◆ パッケージング技術
- ◆ アンテナ技術
- ◆ **材料技術**
- ◆ ミリ波帯を用いるメリット
- ◆ まとめ

材料：低損失な多層基板材料



	Sub6	ミリ波帯
周波数	2 GHz	28 GHz
配線長	50 mm	10 mm
伝送損失	1.5 dB	1.5 dB

ミリ波帯は伝送損失が大きいため
低損失な多層基板材料が不可欠である

材料：低損失多層基板の特性 (実測値)

		誘電率 ϵ_r @ 60 GHz	誘電正接 $\tan\delta$ @ 60 GHz	伝送損失 [dB/10 mm] @ 30 GHz
PTFE (Polytetrafluoroethylene)		3.0 *	0.0013 **	0.36 ***
PCB	粗化銅	3.6	0.006	0.76
	低粗化銅			0.55
LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics)		6.7	0.005	0.69
メトロサーク™		3.0	0.002	0.47

* RO3003™ laminate (ceramic-filled PTFE composites)

** @10 GHz

*** Microstrip line (Line width:0.127 mm)

Loss: Strip line (Line width:0.11 mm)

材料：低損失多層基板の特徴

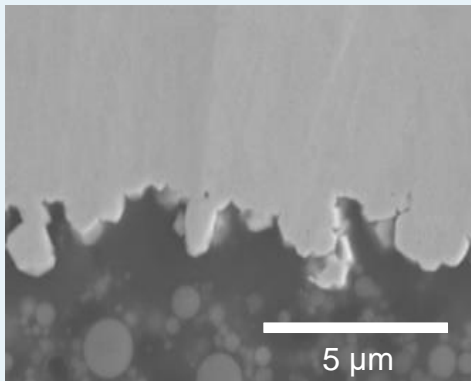
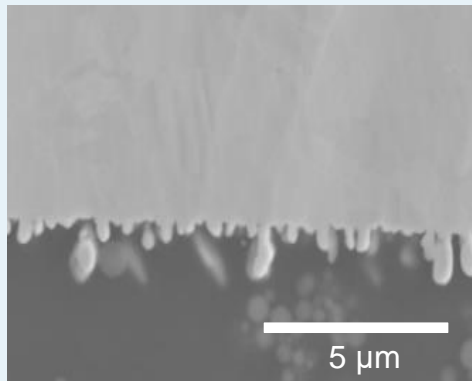
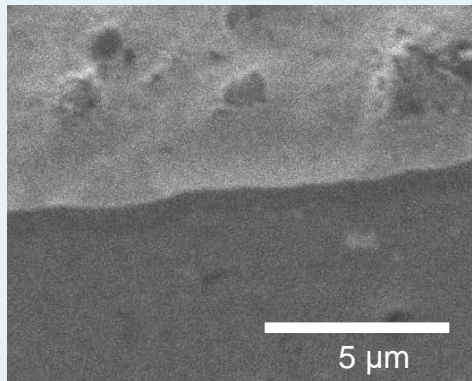
		伝送損失	多層化
PTFE		◎ ◎	△
PCB	粗化銅	△	○
	低粗化銅	◎	○
LTCC		○	◎
メトロサーク™		◎ ◎	◎

ビルドアップ工法により
1層ずつ多層化

一括積層が可能

LTCC・メトロサーク™は一括積層による多層化が可能
伝送損失のほか、多層化の観点もふくめ、
ミリ波モジュールではPCB・LTCC・メトロサーク™を利用

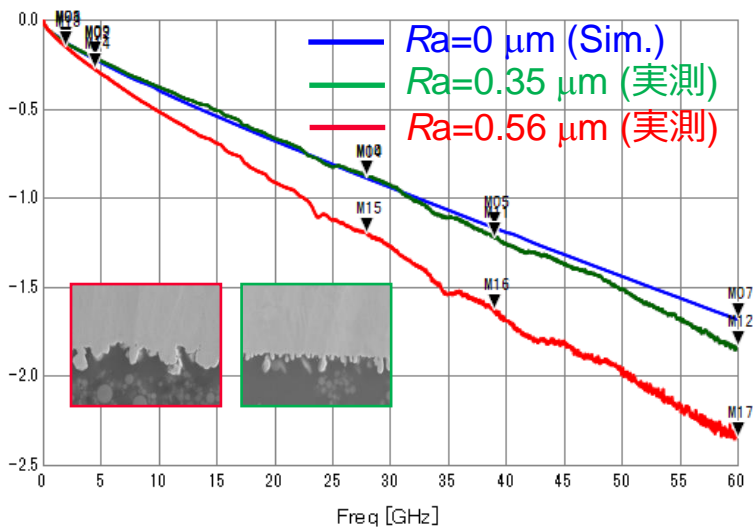
材料：銅の表面粗さ

	PCB 粗化銅	PCB 低粗化銅	LTCC
表面粗さ	$Ra=0.56 \mu\text{m}$	$Ra=0.35 \mu\text{m}$	$Ra \approx 0 \mu\text{m}$
	 <p>5 μm</p>	 <p>5 μm</p>	 <p>5 μm</p>

PCBでは銅箔と樹脂の接合強度を上げるため、銅箔表面を粗す必要がある
LTCCの銅箔表面は平坦化が可能である

材料：銅の表面粗さの伝送損失への影響(PCB)

S-parameter



周波数 [GHz]	伝送損失 [dB/15 mm]			表皮厚み [μm]
	$Ra=0 \mu\text{m}$ Sim.	$Ra=0.35 \mu\text{m}$ 実測	$Ra=0.56 \mu\text{m}$ 実測	
2.0	0.13	0.13	0.15	1.48
28.0	0.89	0.89	1.20	0.39
39.0	1.17	1.22	1.63	0.33
60.0	1.68	1.84	2.34	0.27

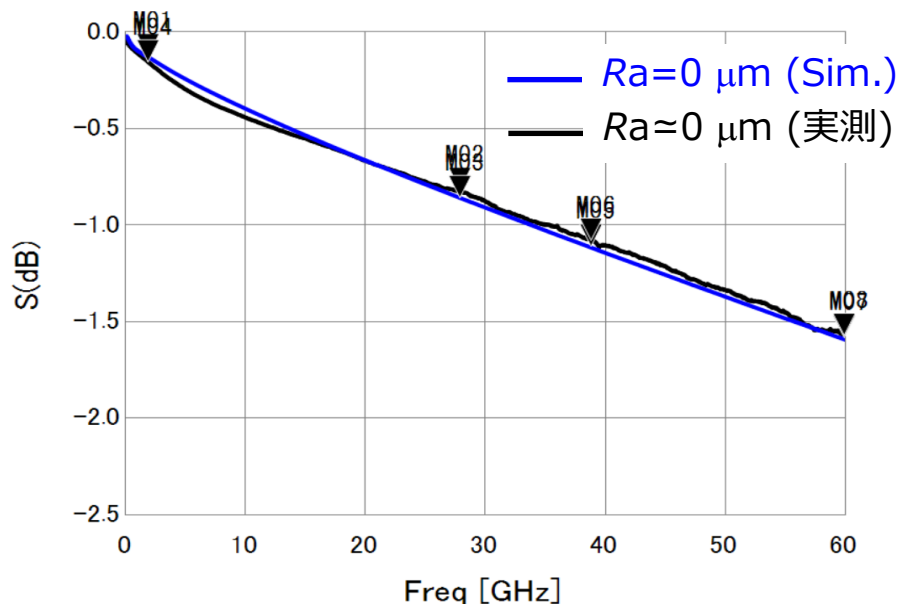
$$\text{表皮厚み} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

高周波では銅の表面のみに電流が流れ
抵抗値が増加する

Line Condition
Length : 15 mm
Width : 110 μm

Ra が表皮厚み以下であれば、伝送損失の実測値が $Ra=0 \mu\text{m}$ を仮定したシミュレーションと同等になる

材料：銅の表面粗さの伝送損失への影響(LTCC)



周波数 [GHz]	伝送損失 [dB/15 mm]	
	$Ra=0 \mu\text{m}$ Sim.	$Ra \approx 0 \mu\text{m}$ 実測
2.0	0.13	0.16
28.0	0.86	0.83
39.0	1.12	1.09
60.0	1.59	1.57

Line Condition
Length : 15 mm
Width : 110 μm

LTCCは Ra が小さいため、 $Ra=0 \mu\text{m}$ を仮定したシミュレーションと同等の伝送損失となる

- ◆ はじめに
- ◆ パッケージング技術
- ◆ アンテナ技術
- ◆ 材料技術
- ◆ ミリ波帯を用いるメリット
- ◆ まとめ

シャノン・ハートレーの式

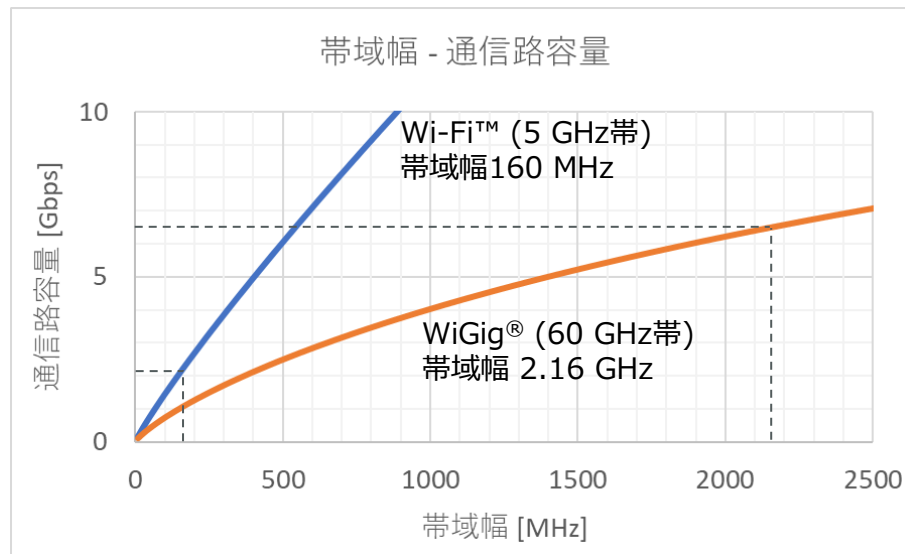
$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

$$N = kTB$$

C: 通信路容量

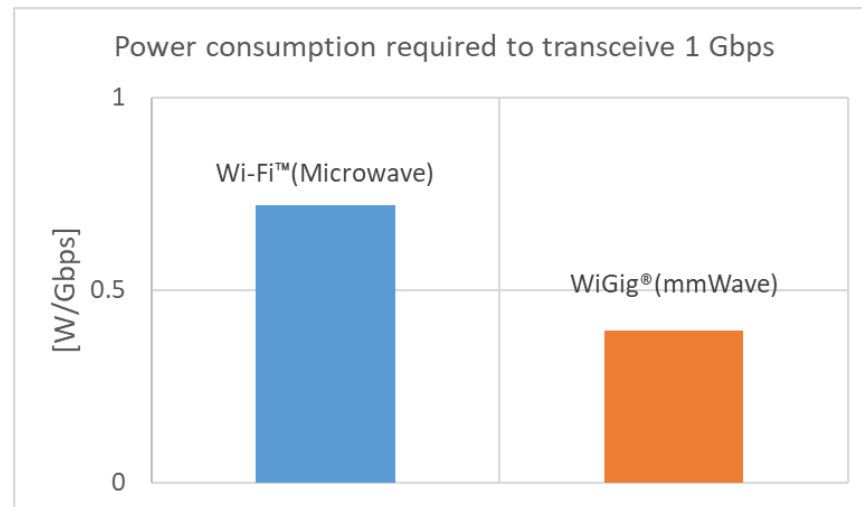
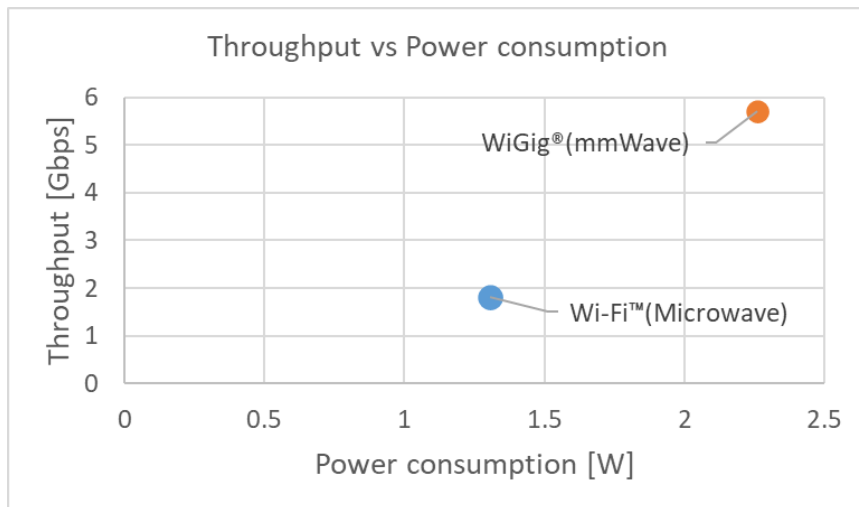
B: 帯域幅

N: 雑音電力



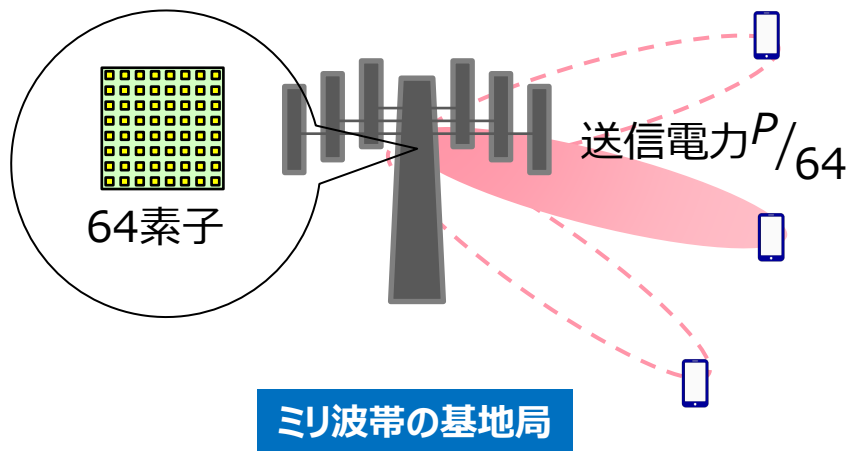
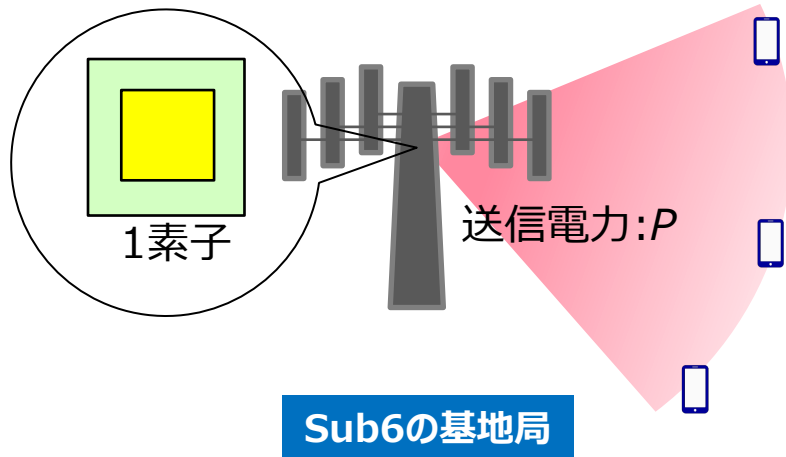
通信距離・送信電力・アンテナ利得が一定の条件でマイクロ波帯とミリ波帯を比較した場合、帯域幅の広いミリ波帯の方が高い通信路容量を実現できる

広い帯域幅による低消費電力化



ミリ波帯は、マイクロ波帯と比べて
スループット当たりの消費電力が低い

ビームフォーミングによる低消費電力化



ビームフォーミングにより、素子数に反比例して送信電力を低減できる

ミリ波帯は周波数が高くアンテナが小型のため、多素子のアレーを用いることができる

- ◆ はじめに
- ◆ パッケージング技術
- ◆ アンテナ技術
- ◆ 材料技術
- ◆ ミリ波帯を用いるメリット
- ◆ まとめ

- ミリ波帯は、新たな周波数リソースであるとともに、革新的アプリケーション開発が期待される周波数帯である。
既存周波数と比較して伝送損失が大きいいため、RFICとアンテナを一体化したアンテナアレー一体型モジュール (AiM) が用いられる。
- 広カバレッジ・フィルタ・放熱構造などを一体化するパッケージング技術により、高付加価値なAiMが実現できる。
- アンテナの高利得化・広カバレッジ化・広帯域化などのミリ波ならではの課題を、小型化と共に実現するアンテナ技術は、ミリ波端末の低コスト化に向けた最重要技術である。
- 多層化可能かつ、誘電正接や銅箔表面粗さの小さい低損失な基板材料は、AiMの高効率化・小型化につながる重要な技術である。
- ミリ波帯は、広い帯域幅によりスループット当たりの消費電力を低減できる。また、ビームフォーミングにより空間的に高い電力利用効率を実現できる。



ご清聴ありがとうございました