

5Gで期待される要求要件とそれを支える技術

電子応用技術R&Dセンター 官 寧¹

Expected Application Spaces and Supporting Technologies in 5G

N. Guan

第5世代移動通信システム（5G）のサービスがいよいよスタートし、生活と仕事の両方に様々なアプリケーションや新しいビジネスが期待されている。5Gは3G/4Gのモバイル通信の高速化・大容量化にとどまらず、あらゆるモノをネットワークでつなぎ、高信頼かつ低遅延で制御する次世代のインフラとして、通信サービスを劇的に進化させる目標で進められている。本稿は5Gが実現しようとしている要件、それにとともなう使い方や将来で予想される利用形態などに触れ、それを支える技術として主にミリ波技術開発の観点から述べる。

The 5th generation mobile network (5G) services have already started and many applications as well as new businesses are expected on it. 5G not only is extremely improving speed and capacity in 3G/4G wireless communications but also connecting a massive number of devices into internet and providing ultra-reliable and low latency for mission critical applications. In this paper, these application spaces and related usages will be overviewed and the supporting technologies will be discussed, especially from millimeter-wave point of view.

1. ま え が き

モバイルネットワークは年々進化し、今や第5世代移動通信システム（5G）がいよいよサービスを開始する運びになった。移動通信が本格的に導入した1980年代から、電話機は自動車電話から、シヨルダフォン、携帯電話を経て、iPhoneで始まったスマートフォンに進化している。モバイル通信の役割も単純な音声通話からデータ通信にシフトし、今のスマートフォンで通話機能が数多くのアプリの一つにすぎない状況に変わってきている。通信方式はアナログ方式（1G）に始まり、GSM（欧州で規格、のちに世界デファクトスタンダードに発展した通信方式）を代表としたデジタル方式（2G）、CDMA（符号分割多元接続）をベースとした世界共通のLTEデジタル方式（3G）を経て、OFDMA（直交周波数分割多元接続）やMIMO（送受信ともに複数のアンテナを用いる通信を高速化する技術）を用いたLTE-Advanced（4G）へと発展してきた。4Gまではこれらの技術革新によって高速・大容量化が図られ、これまでの30年間で約10万倍になった通信速度の増加に対応してきたともいえる¹⁾。

ユーザによる通信トラフィックは高精細写真や動画などのリッチコンテンツへのアクセスを中心に今も増加の一途

を辿っており（図1）、5Gでもこれに対応する一層の高速化・大容量化が第1の要件になっている。しかし、5Gはそれにとどまらず、高信頼・超低遅延および多数同時接続の要件を備えることも目標にしているところはこれまでと大きく異なる。それによって日常生活における利便性を向上するだけでなく、Internet of Things (IoT) とよばれるあらゆるモノをネットワークでつなぎ、ときには低遅延の特性を活用して、産業や社会を効率化し、新たな付加価値を創出するためのインフラを提供する。モバイルネットワークは単純な通話機能の提供からリモートでの情報加工やソーシャルネットワーキングサービス (SNS) を支える基盤に変貌している。モバイルネットワークの高度化は人々の利便性を著しく向上させるだけでなく、情報通信産業以外の業種にもクラウドサービス、ビッグデータ、IoT、Artificial Intelligence (AI, 人工知能)、Virtual Reality (VR, 仮想現実) /Augmented Reality (AR, 拡張現実)などを駆使した生産性の向上や、新たな付加価値を創出させようとしている。

本稿はまず5Gが達成しようとしている要件およびそれを支える主要な技術について述べ、続いて5Gで新たに導入するミリ波技術の特徴と開発の要点について説明する。

1 5G無線デバイス開発部フェロー、部長、学術博士

略語・専門用語	正式表記	説明
IoT	IoT	Internet of Thingsの略。機器にセンサと通信機器を持たせることでインターネットをかいしてモノの状態の把握と操作を行う
BF-IC	BF-IC	Beamforming ICの略。ビームスキャンを行い、ビームを通信する相手に向けさせる機能を有する集積回路
FC-IC	FC-IC	Frequency Conversion ICの略。周波数変換を行う集積回路
弾性波デバイス	Acoustic wave device	圧電効果を利用して、高周波電気信号を超音波に変換し、信号処理を行うデバイス。音波の波長が電磁波よりずっと短いという特徴を利用し、小型高周波信号処理デバイスを実現しているが、電極プロセス微細化の限界と伝送損失の増加により、ミリ波領域に適用できない
パッチアンテナ	Patch antenna	誘電体下面のグラウンドと上面の平面型放射素子で構成されるアンテナ。1辺が半波長の電気長をもつ代表的なタイプが知られている
アレーアンテナ	Array antenna	同じ形状をもち、同じ性能を示す放射素子を複数に配置するアンテナで、大きい利得が得られる。個々の素子の位相を調整すれば、放射方向を制御することができる
アレーファクター	Array factor	アレーの状態（配置、給電振幅と位相）だけで決まるアンテナ放射特性のこと。個々のアンテナ素子が同じ特性を示す場合、アレーアンテナの放射特性は素子単体の特性とアレーファクターの積で与えられる
サブアレー	Sub-array	アレーアンテナは同じ性能を示す放射素子の集合であるが、基本単位になる放射素子は複数のアンテナ素子で構成される場合、サブアレーと呼ばれる
サイドローブ	Side lobe	ある方向に最も強く放射するアンテナにおいて、それとは別の方向にも強い放射を示すことがあり、サイドローブと呼ばれる
グレーティングローブ	Grating lobe	アレーファクターが示すサイドローブのこと
SiGe	SiGe	シリコンにゲルマニウムを添加した半導体。純粋なシリコンより電子移動度が大きく、高周波特性が優れている
CMOS	CMOS	P型とN型という特性が異なる電界効果トランジスタを相互に特性を補うように接続されたシリコン半導体。デジタル回路として広く用いられ安価であるが、プロセスの微細化と回路の進化で高周波回路にも用いられるようになった

2. 5Gで実現する3つの要求要件

5Gの国際標準仕様は2015年より移動通信の標準化団体Third Generation Partnership Project（3GPP）によって議論され、各種サービス要求条件およびネットワークに関する要素技術が策定されている。最新リリースは2020年7月に完了したRelease 16 Stage 3で、定められた要件を満たすアーキテクチャを実現するプロトコルを規定しており、それによって5Gネットワークが構築されていく²⁾。また、Release 16によって、下で述べる3つの要求要件に関する標準化が一旦完結したことになる。3GPPでは、5Gの主な要求条件として、次の3つにまとめられている（図2）：

- ① モバイルブロードバンドのさらなる高度化（eMBB: enhanced Mobile Broad Band）,
- ② 多数同時接続を実現するマシンタイプ通信（mMTC: massive Machine Type Communications）,

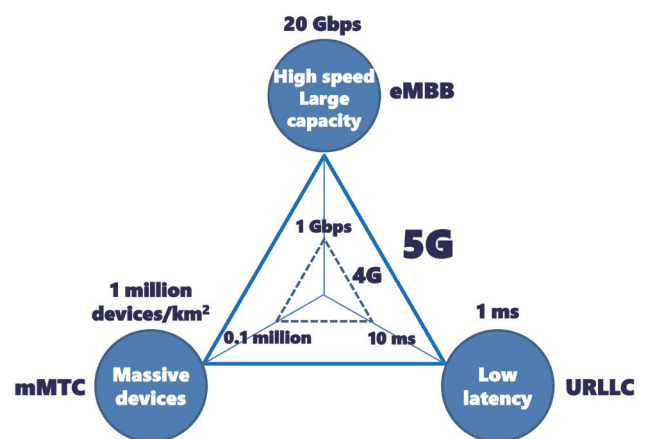


図2 5Gの3つの要求要件

Fig. 2. Three application spaces in 5G.

- ③ 高信頼・超低遅延通信（URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications）.

- 我が国のブロードバンドサービス契約者⁽¹⁾の総ダウンロードトラフィックは前年同月比15.2%増。
- 我が国の移動通信の総ダウンロードトラフィックは前年同月比20.2%増。

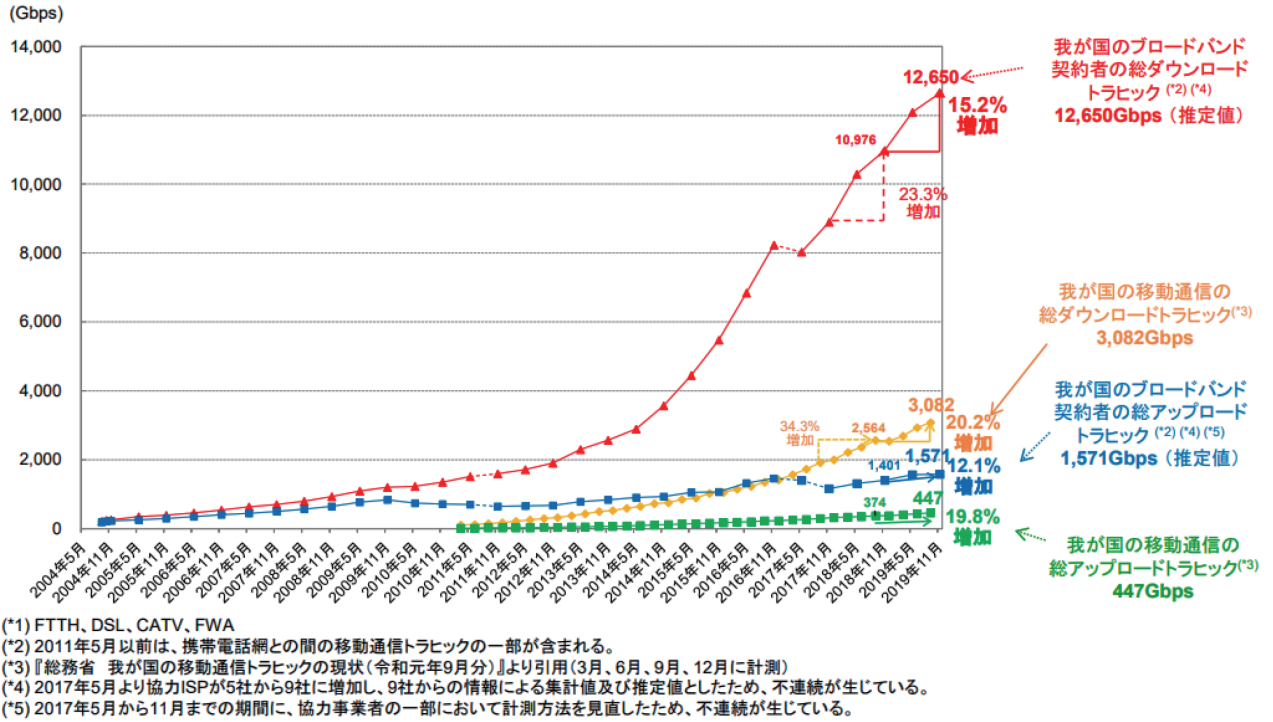


図1 日本のインターネットにおけるトラフィック

(出典:「我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果」, 総務省)

Fig. 1. Internet traffic in Japan.

(Source: “Aggregation results of traffic on the Internet in Japan”, Japan Ministry of Internal Affairs and Communications)

表1は5Gの各要求の主要スペックと4Gと比較している。

件を満たすために新しい周波数帯、一つは6GHz以下のSub-6帯(450MHz~6GHz, FR1), もう一つはミリ波帯(24.25GHz~52.6GHz, FR2)が追加されている。Sub-6では主に3.5GHzや4.9GHzの周波数帯が加わり、

表1 5G無線の主要スペック

Table 1. Major specifications of 5G mobile network.

Item	4G	5G
Peak data rate	DL: 1 Gbps UL: 0.5 Gbps	DL: 20 Gbps UL: 10 Gbps
User experienced data rate	10 Mbps	1,000 Mbps
Connection density	100,000 devices/km ²	1,000,000 devices/km ²
Latency	10 ms	eMBB: 4 ms URLLC: 1 ms
Reliability	-	99.9999%

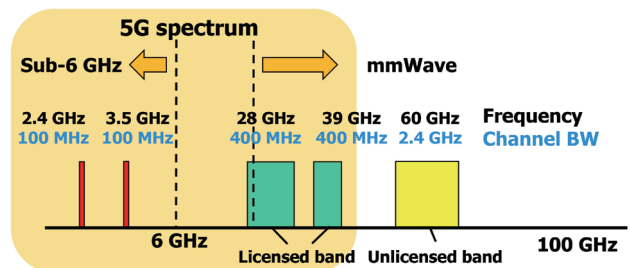


図3 5Gにおける周波数スペクトル

Fig. 3. Frequency spectrum in 5G.

NR (New Radio) は5G用に策定された4G LTEの後継となる新しい無線アクセス技術である。そこで5Gの要

チャンネル帯域幅は最大で 100 MHz (LTEは 20 MHz) に拡大する。ミリ波では 28 GHzと 39 GHz帯の使用が規定され、チャンネル帯域幅は最大400 MHzに拡大する (図 3)。新周波数帯、特にミリ波帯の使用による帯域の拡大に基づく技術革新は 5 G要件の実現を支える最も重要で直接的な要素になっている。

最初の要件はさらなる高速化・大容量化であり、従来のモバイルネットワーク世代進化の延伸ともいえる。5 Gのアクセススピードの目標はダウンリンクで最大 20 Gbps、アップリンクで最大 10 Gbps、4 Gの 20 倍である。

通信容量の限界はシャノンの法則

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

で支配される。ただし、 C は通信容量、 W は伝送路帯域、 S/N は信号対雑音電力比を表す。5 Gではミリ波帯の使用により直接通信容量の増大に寄与する。また、5 Gはネットワークにおいて、4 Gと同様にユーザデータの送受信処理を行うユーザプレーン (U-plane) と通信の確立を行う制御プレーン (C-plane) のC/U分離方式を採用するが、U-planeはミリ波で担うこともあり、それによって大幅に通信容量を増やすことができる。この要件はスマートフォンにおける大容量コンテンツを短時間にダウンロードできるほか、工業的に容量が大きい画像や制御信号を利用したスマート工場などに応用できる。3 つの要件のうち真っ先に実現する機能になる。

2 つ目の要件は多数同時接続であり、接続密度の増加、カバレッジの拡大とバッテリーの長寿命化によって実現される。Sub-6 の低いキャリア周波数を用いるマクロセル基地局を使用し、スマートメータ、センサなどトラフィック密度が低い端末を収容することを想定し、百万デバイス/ km^2 のカバレッジが目標である。この要件はIoT社会の実現に不可欠なものになる。また、制御信号を削減した効率的なデータ伝送、デバイスの低消費電力化、基地局の普及がこの要件を実現する鍵であり、2 ~ 3 年後に遅れて実現するとみられている。

3 つ目は高信頼・超低遅延通信である。高信頼性は信号伝送時間の短縮、受信エラーが発生した場合信号を再送する時間の短縮、マルチコネクティングの確保などで実現する。超低遅延のシナリオでは 1 ms以下の遅延が目標であり、その実現も広い周波数帯域使用の恩恵をうける。伝送周波数帯域が広ければ、時間領域で時間が短くなるからである。たとえば、4 Gと同様にOFDMを使用した場合、LTEのサブキャリア間隔が 15 kHzであるのに対して、5 G NRでは 240 kHzを使うことができ、遅延は 1 / 16 に短縮できる。高信頼・

低遅延通信は遠隔スマート治療支援、自動運転など幅広い分野で利用される。また、高速・大容量通信機能と組み合わせ、主要なデータ処理をネットワーク経由で素早くクラウドで行うことを可能にするので、エッジ端末は単機能でシンプルな構造に留め、小型化することが可能になる。この要件の実使用も大容量化に遅れて実現する見込みである。

3. 5 Gにおけるミリ波技術

3. 1 ミリ波使用のメリットとデメリット

5 G NRは、ミリ波の使用を導入している点で 4 Gのような従来の世代と大きく異なっている。ミリ波はSub-6 に比べると、以下のメリットとデメリットがあげられる：

●メリット

- ・帯域が広いため、高速、大容量、低遅延を同時に実現できる
- ・波長が短いため、アンテナサイズが小さく、伝送ビームをしばり、ビームフォーミング可能なアレーアンテナが実現しやすい

●デメリット

- ・空間減衰が大きく、伝送距離が限られる
- ・電波の直進性が強く、見通し環境 (Line of Sight: LOS) が必要
- ・ガラスや壁を通る際の損失が高く、突き抜けにくい
- ・基板材料を通る伝送路損失が高く、信号を分配・給電する回路を長くすることができず、アクティブ素子とアンテナ素子の分離が難しい
- ・弾性波デバイス の使用限界を超えているため、フィルタなどは直接電磁波を処理するタイプに置き換える必要がある

ミリ波は到達距離が小さく、非見通し環境で通信ができないので、カバー範囲が狭いスモールセルをたくさん設置する必要がある。図 4 はSub-6 やLTEに設けるスモールセルとの違いを表している。

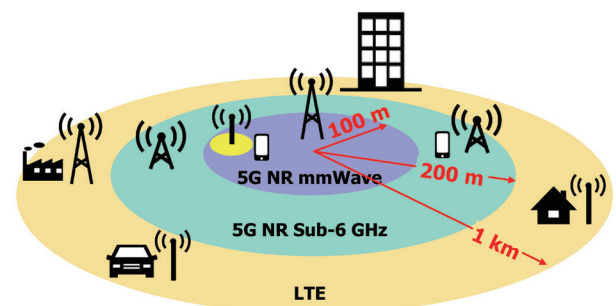


図 4 5 GのスモールセルとLTEとの比較

Fig. 4. Comparison of small-cell size between 5G and 4G.

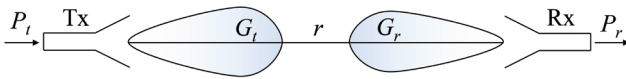


図5 無線通信システム

Fig. 5. Wireless signal transmission system.

図5のような無線通信システムにおいて、送受信間で伝達する電磁波の電力は次のFriisの法則にしたがう³⁾：

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

ただし、 P_t 、 P_r は送信と受信電力、 G_t 、 G_r は送信アンテナと受信アンテナ利得、 r は距離、 λ は波長をそれぞれ表す。

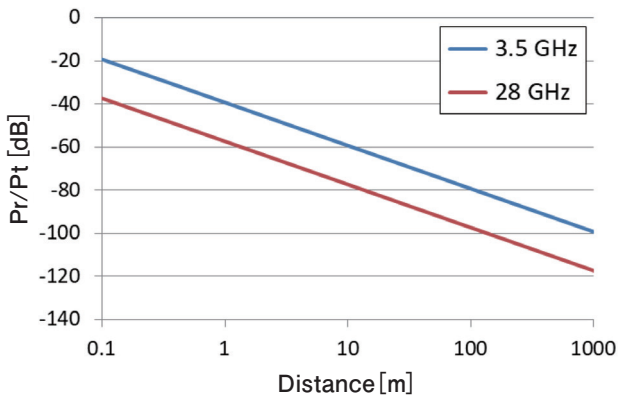


図6 受信電力の比較 ($G_r=G_t=2$ dBi)

Fig. 6. Transmitted power comparison for $G_r=G_t=2$ dBi.

図6はアンテナ利得が同じ場合に3.5 GHzと28 GHzの受信電力を比較しており、同じ距離で28 GHzの受信電力は3.5 GHzより18 dBほど小さいことがわかる。あるいは、3.5 GHzが1 kmで受信できる電力は28 GHzのミリ波では130 mでしか受け取れない。なお、空間伝搬損失は上記電波散逸による減衰のほか、図7に示す空気中の酸素や水分による電波吸収も加える必要がある⁴⁾。

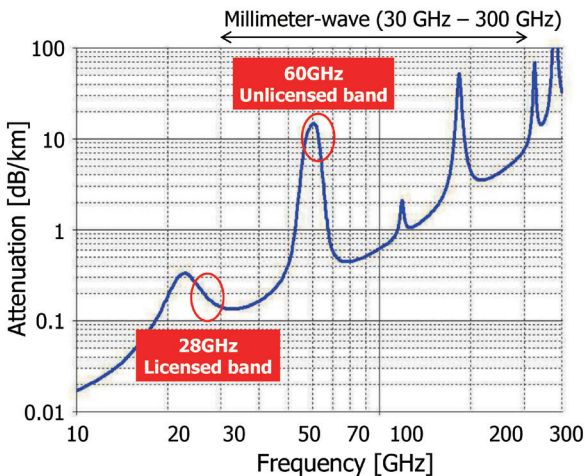


図7 大気中電磁波の吸収損失

Fig. 7. Electromagnetic-wave attenuation in air.

3.2 ミリ波アンテナの構成

無線通信に使用する標準的なアンテナの大きさは波長に比例する。たとえば、パッチアンテナの一辺は電気長の半波長になり、28 GHzでわずか5.4 mmにすぎない。このことからミリ波では、複数の素子から容易にアンテナをアレー化することができる。たとえば、上記の場合、ミリ波の送受信機に利得10 dBiのアンテナを使えば、電力の埋め合わせができるようになる。

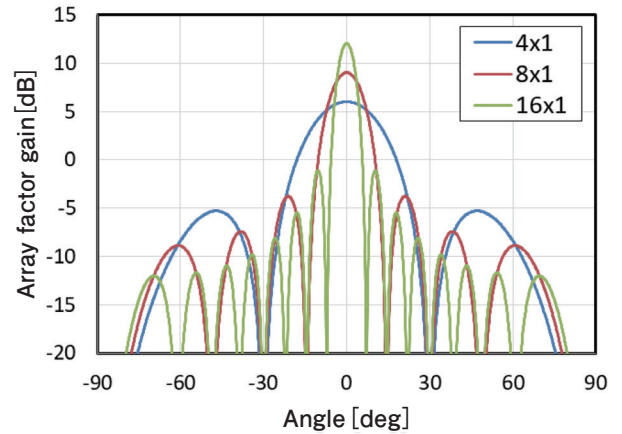


図8 線形アレーにおけるアレーファクターの利得

Fig. 8. Array factor gain of linear array.

図8は線状アレーのアレーファクターの利得を示し、利得11 dBi程度のアンテナは8素子があれば十分に実現可能である（パッチアンテナ素子の通常2 dBi程度の利得が加わる）。

アンテナをアレー化することはアンテナの放射ビームを絞ることに等しい。5 Gでは通信する相手がほとんどの場合移動体であり、ミリ波デバイスで移動している通信相手を自動的に探索し追従する必要がある。そのビームフォーミング機能はアレーアンテナにおける個々の素子、または複数の素子をまとめたサブアレーを独立に位相を制御可能にすれば実現できる。また、ビームフォーミングを行う場合、一般的にアンテナ素子の間隔を半波長以下に抑える必要があり、それ以上の間隔を空けるとグレーティングローブが出現し、サイドローブが著しく上昇する⁵⁾。図9に半波長間隔で置かれた線状アレーでビーム方向を動かす例を示す。

3.3 ミリ波高周波集積回路

ビームフォーミングを行うために、個々のアンテナ素子とつなげる複数のミリ波信号入出力をもち、それぞれ独立に位相と振幅を制御できる半導体素子（BF-IC: ビームフォーミング集積回路）が必要である。さらに信号をミリ波に変調するための周波数変換素子（FC-IC: 周波数変換

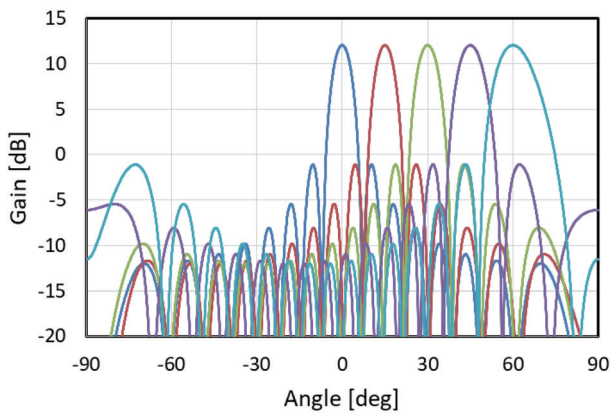


図9 16素子アレーのビームフォーミング
Fig. 9. Beamforming with 16-element array.

IC)も必要であり、それらをRF-IC(高周波IC)と総称される。ビームフォーミング制御を行う方式はデジタル方式、アナログ方式およびそれを混合して使うハイブリッド方式があるが、現在の主流はアナログ方式である。

プロセスの微細化および高周波技術のアーキテクチャや回路の進歩⁶⁾により、ミリ波アクティブデバイスでもそのベースとなる半導体材料として、化合物半導体からシリコンをベースとした廉価なSiGeやCMOSが使われるようになり、実用化に大きく貢献している⁷⁾。

3.4 ミリ波アンテナモジュール

ミリ波は材料を通るときの損失が大きく、RF-ICから出た信号を最短配線長でアレーアンテナにつなぐ必要がある。低損失基板上に配線パターンとして構成した導波路やアンテナ素子とRF-ICを組み合わせてモジュール化するAntenna-in-Package(AiP)と呼ばれるパッケージング方式⁸⁾が採用されている(図10)。

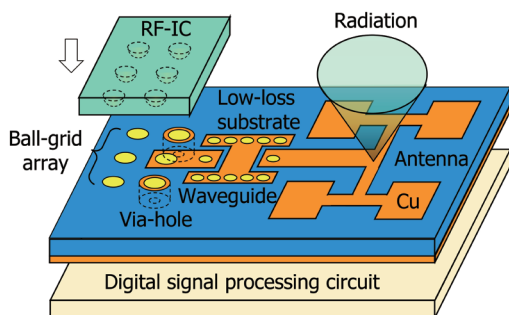


図10 ミリ波アンテナモジュールのAiP構成
Fig. 10. Millimeter-wave antenna-in-package.

3.5 ミリ波基板材料

電磁波導波路の損失は導体損失と誘電体損失の和で与えられる。導体損失は有限な導電率に由来し、周波数が高くなるにつれて電流が金属の表面に集中し、抵抗値が上昇する。その損失は周波数の平方根に比例する。一方、誘電体損失は誘電正接($\tan \delta$, Dfとも呼ばれる)に比例するが、誘電

正接が一定の場合、誘電体損失は周波数に比例する。そのため、周波数が高くなるにつれ誘電体損失が顕著になり、一般的な材料の場合ミリ波の損失はとて大きくなる。なお、誘電体損失は比誘電率(ϵ_r , Dkとも呼ばれる)にも関連し、Dkが低いほど低損失になる。

金属で囲まれた空洞を用いる導波管には誘電体損失がないので、低損失導波路として知られているが、重たいうえ場所をとるので、上記ミリ波AiPパッケージングに使うことができない。ミリ波AiPには低Dk, Dfをもつ低損失誘電体基板が必要である。たとえば、一般的な基板材料としてよく知られているFR4(Dk=4.1, Df=0.03, 代表値, 以下同じ)はマイクロ波で使っても差し支えないが、ミリ波帯では損失が大きすぎて使用できない。ミリ波帯でも低損失特性を示す材料として、フッ素樹脂(PTFE)(Dk=3.4, Df=0.007)、液晶ポリマー(LCP)(Dk=3.1, Df=0.004)⁹⁾、低温焼成セラミック(LTCC)(Dk=7.0, Df=0.005)¹⁰⁾、石英ガラス(Silica)(Dk=3.8, Df=0.0005)¹¹⁾が挙げられる。図11は厚み100 μm のマイクロストリップ線路の損失を比較している。損失が小さいほか、LCPはフレキシブル、LTCCは多層化、Silicaは超低損失といったような特徴を有する。

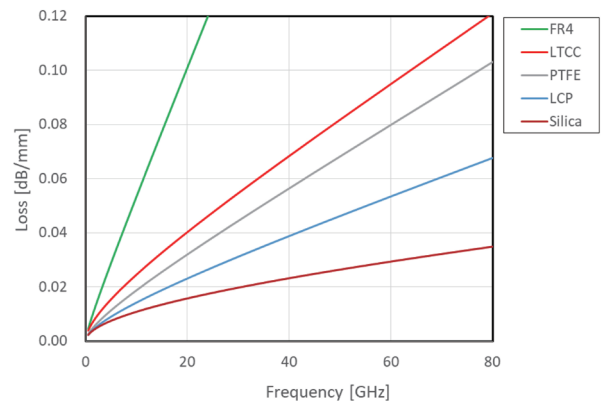


図11 マイクロストリップ線路の損失(厚み100 μm , 50 Ω)
Fig. 11. Loss in microstrip-line (100 μm -thickness, 50 Ω).

3.6 ミリ波フィルタ

フィルタは無線通信で欠かせない部品である。弾性波デバイスではマイクロ波帯で非常にたくさん使われているが、ミリ波帯まで周波数が高くなると、電極プロセス高精細化要求や伝送損失の増加で対応ができなくなる。そのかわりにミリ波で波長がミリメートル程度に短くなるので、伝送線路を利用した直接電磁波を処理するフィルタが可能になる¹²⁾。

導波管ベースのフィルタは特性がよいが、サイズが大きく小型モジュールに適用しにくい。フィルタを誘電体材料の中に作りこむのが現実的な選択肢であるが、共振が鋭い低損失材料を用いなければならない¹³⁾。なかでも、マイクロストリップ線路をベースにすると、伝送路が狭い自由曲げ

られるので、低背で小型フィルタを実現することができる。これをミリ波アンテナモジュールに適用することができる。

4. む す び

5 Gモバイルネットワークは3つの要求要件で今後日常生活の大変革や新規ビジネスの創出を支える基盤インフラを提供しようとしている。5 G NRではミリ波をはじめとする新たな周波数帯をアロケーションし、それに対応した技術の導入に成功して、はじめてこれらの要求要件が実現できる。本稿では、特にミリ波の観点から技術導入の課題と解決方法について述べてきた。フジクラはここで述べた技術要点を踏まえ、ミリ波デバイスの開発を行っているほか、図12に示す光部品を中心とした製品群で5 Gをサポートしていく。

参 考 文 献

- 1) 日本総務省：令和2年版情報通信白書，第1章第1節2，<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/r02.html>
- 2) 5G Release 16, Stage 3: <https://www.3gpp.org/release-16>
- 3) H.T. Friis, "A note on a simple transmission formula", Proc. of I.R.E. & Waves and Electrons, pp. 254-256, 1946.
- 4) "Attenuation by atmospheric gases," ITU-R Recommendation P. 676-10, 2013.
- 5) R.S. Elliott, "Antenna Theory and Design, Revised Edition," Chapter 4, IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- 6) B. Razavi, "RF Microelectronics," Prentice Hall, 2012.
- 7) B. Sadhu, Y. Tousi, J. Hallin, S. Sahl, S.K. Reynolds, Ö. Renström, K. Sjögren, O. Haapalahti, N. Mazor, B. Bokinge, G. Weibull, H. Bengtsson, A. Carlinger, E. Westesson, J. Thillberg, L. Rexberg, M. Yeck, X. Gu, M. Ferriss, D. Liu, D. Friedman, and A. Valdes-Garcia, "28 -
- 8) Y. P. Zhang and D. Liu, "Antenna-on-chip and antenna-in-package solutions to highly integrated millimeter-wave devices for wireless communications," IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. 57, no. 10, pp. 2830-2841, Oct. 2009.
- 9) M. Swaminathan, V. Sundaram, J. Papapolymerou, and P.M. Raj, "Polymers for RF apps," IEEE Microwave Magazine, vol. 12, no. 7, pp. 62-77, Dec. 2011.
- 10) K.K. Samanta, "Ceramics for the future," IEEE Microwave Magazine, vol. 19, no. 1, pp. 22-35, Jan./Feb. 2018.
- 11) Y. Uemichi, O. Nukaga, K. Nakamura, Y. Hasegawa, X. Han, R. Hosono, K. Kobayashi, and N. Guan, "A 60-GHz six-pole quasi-elliptic bandpass filter with novel feeding mechanisms based on silica-based post-wall waveguide." Proc. Int' l Microwave Symp., TH01B-3, Hawaii, USA, June 2017.
- 12) P. Matthews, "Approaching the 5 G mmWave filter challenge," <https://www.microwavejournal.com/articles/32228-approaching-the-5-g-mmwave-filter-challenge>.
- 13) Y. Uemichi, O. Nukagal, X. Han, S. Amakawa, and N. Guan, "Highly configurable cylindrical-resonator-based bandpass filter built of silica-based post-wall waveguide and its application to compact E-band hybrid-coupled diplexer," Proc. Int' l Microwave Symp., We 3 A-4, Boston, USA, June 2019.



図12 5 Gをサポートするフジクラの“つなぐ”テクノロジー

Fig. 12. Fujikura “Tsunagu” Technologies to support 5G.