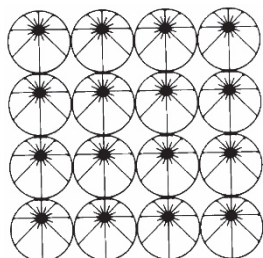


講演録



Beyond 5G/6G に向けた ミリ波・テラヘルツ波通信技術

東京工業大学 工学院 電気電子系 教授

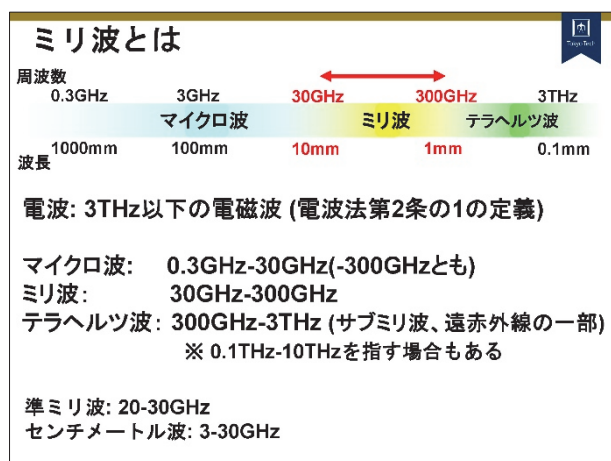
岡田 健一

この講演録は、岡田先生が2021年7月1日にオンラインで行いました講演の録画をもとに、編集事務局が原稿を作成して掲載するものです。

1 ミリ波の特徴・アプリケーション

それでは東工大で我々が行っている Beyond 5G/6G に向けた「ミリ波」・「テラヘルツ波」の通信技術について、特にフェーズドアレイの無線通信になりますが、ご紹介したいと思います。本日は、さまざまなバックグラウンドの方がご参加いただいているということです。まずは「ミリ波」での通信がこれまでのマイクロ波とどう違うのかという基本的なところから始め、「ミリ波」・「テラヘルツ波」を使う無線通信が今後どうなっていくのかについて、お話しさせていただければと思います。

1.1 ミリ波とは



スライド 1

ご存じの方も多いと思いますが、「ミリ波」は電磁波の一種です。電界と磁界が交番してエネルギーが伝わっていくものはすべて電磁波ですが、3 THz 以下は電波と呼ばれています。

もっと高い周波数は、光と呼ばれます。赤外線、紫外線、可視光も含めて、光は電波の一種です。さらに高い周波数では、アルファ

波やベータ波は粒子が飛ぶので少し違いますが、エックス線やガンマ線も電磁波の一種です。

光のように高い周波数になると、「波長」で名称を呼ぶようになります。一方、電波の場合は「周波数」で表します。しかし、名称はけっこう混用されています。例えば0.3 GHzから30 GHzは「マイクロ波」、30 GHzから300 GHzは「ミリ波」と呼ばれます。「ミリ波」と呼ぶ理由は、波長が1 mmから10 mm位の長さになっているためです。さらに上の、国際的な定義で言うと300 GHzから3 THzの周波数帯を一般的に「テラヘルツ波」と呼んでいます。「ミリ波」の名称は波長に由来しますが、同様に「テラヘルツ波」も従来は「サブミリ波」と呼んでいました。サブミリ波ですので1 mm以下ということになり、0.1 mmから1 mmの間の波長領域をそう呼んでいました。

便宜上3 THzが電波と光の境界になりますが、3 THzを超えたから急激に光になるかというそうではなくて、徐々に性質が電波から光に変わっていきます。どこかに明確な区切りがあるわけではありません。

テラヘルツの周波数帯に関しては最近さまざまな定義があり、緩く0.1 THzから10 THz位までを含めて全部テラヘルツとすることもあります。「ミリ波」は1 mmから10 mmですので、比較的明確な気もしますが、ご存じのように「5G」では28 GHzがあります。28 GHzは、ちょうどこの30 GHzの少し下ですので、厳密には「ミリ波」ではありません。さらに、「準ミリ波」という言い方もあります。また、「センチメートル波」という言い方もありますが、あまり使われることはありません。28 GHzもほぼ「ミリ波」ですので、あまり考えずに「ミリ波」としているケースがほとんどだと思います。

テラヘルツにも同様の曖昧さがあります。「テラヘルツ波」は伝統的には300 GHzから3 THzを示していましたが、0.1 THzから10 THz

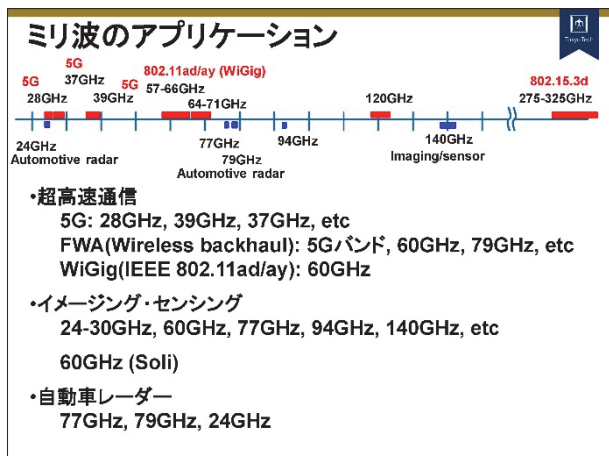
で定義することも増えています。さまざまなお話を聞かれるときには、「テラヘルツと言っているが周波数はいくつなのか」に注意しながら聞く必要があるのではないかと思います。あとでも話そうと思いますが、特に「6G」といったときには、300 GHz 帯ぐらいのことをテラヘルツというケースと、100 GHz 帯ぐらいのことをテラヘルツというケースがあります。「テラヘルツ波」といったときには周波数は何GHzのことを言っているのかに気をつけながら、聞いていただいた方が良くと思います。

「5G」もご存じのようにサブ6GHzと言って6GHz以下の周波数帯を使うものと、28GHzや39GHzの「ミリ波」を使うものがあります。以前は「5G」は全部「ミリ波」で28GHzを使うものだという誤解がありました。さすがに最近は理解がだいぶ深まり、あまり誤解はなくなってきましたが、テラヘルツもそういう状況にあるのかなと思います。

蛇足ですが、「ミリ波」は波長に由来し、「テラヘルツ波」は周波数に由来しています。では、マイクロ波はどうかと言うと、1μmはもっと右の方になりますのでマイクロ波の波長はμmではありません。しかし、当時「マイクロってなんだかすごそうな気がする」という風潮があったため、「マイクロ波」にしたという説が有力だそうです。

要は「マイクロ波」「ミリ波」「テラヘルツ波」と呼んでいますが、意外と定義があるようでないもので、ブレた使い方をされることがあるので注意していただきたいということです。

1.2 ミリ波のアプリケーション



スライド 2

テラヘルツはまだこれからですので、一般的には「ミリ波」の方が中心的に使われているわけですが、赤で書いた通信用途と、青で書いたセンシング用途に大きく分けられます。「5G」や、「WiGig」(IEEE 802.11ad/ay)と言われる60GHz帯を使うWi-Fi、28GHz、39GHz、あと37GHzや60GHz帯も二つありますが、この辺りが使われているのが現状です。

通信としては「5G」向けと「FWA (Fixed Wireless Access)」, 固定間での通信です。特に、セルラー向けの基地局と基地局の固定間をつなぐ「ワイヤレスバックホール」に使われるケースが多く見られます。また、空中には光ファイバーを通せませんので、ビルとビルの間を無線で通したり、ビルの上の階と下の階の間を無線でつないだりなど、さまざまなケースで使われています。

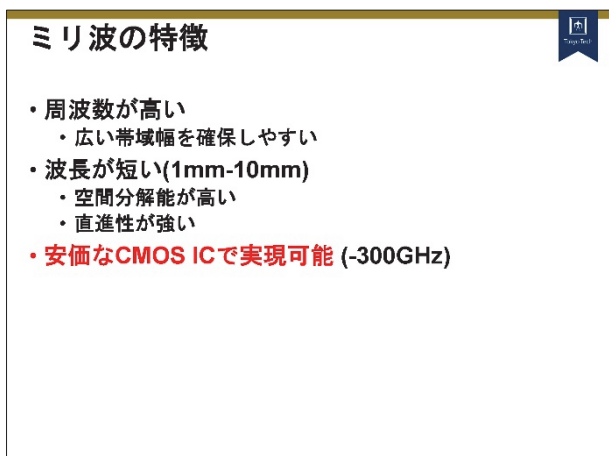
しかし、やはり期待されているのは「スモールセルラー」というセルラー向けのバックホール基地局です。1局の基地局からの通信距離がどんどん短くなっている中、いちいち光ファイバーでつないではいられないというときに、光ではなくワイヤレスでつなぎましょうという話です。「5G」のバンドをそのまま扱ったり、近くの鉄塔から各家庭までの「ラストワンマイル」を「5G」でつないだりといったようなことをUSではベライゾンがビジネスとして行っています。「ミリ波」は、そういう用途や、5Gバンド以外に60GHzあるいはEバンドなどと言われる帯域を使った固定間での無線通信、「WiGig」に使われています。

「ミリ波」の用途はコンシューマー向けにはこういったところですが、将来的には衛星や長距離のテレビ中継などに使われるようになります。その理由は後ほどお話しします。

一方、通信以外にもイメージングや空港のセキュリティスキャナなど、それぞれにさまざまな周波数が使われています。また、可視光では見えない中身を電波で見るということで、工場での非破壊検査や、包装パッケージの中に異物が入っていないかなどの異物検査にも利用されています。車のタイヤも黒いので中身は見えませんが、タイヤの中に何か異物が入っていないか「ミリ波」でセンシングするなど、そういう分野に使われています。あとは「Google Soli」ですね。スマホに搭載して、手でジェスチャーをして操作するセンシングデバイスで、インフィニオンが作っています。また、ご存じのように自動車で77GHz、79GHz、24GHz辺りの周波数が使われています。

その他にも、もっと高い周波数では100GHz帯や300GHz帯にもIEEE802.15.3dの規格があります。「WPAN (Wireless Personal Area Network)」と言いますが、比較的短距離を狙っている規格で、100Gbpsを超えるものの標準化が進められています。

1.3 ミリ波の特徴



スライド 3

「ミリ波」の特徴は、まず周波数が高いことです。広い帯域幅を確保しやすく、通信速度を高くしやすい。波長が短いので空間分解能を高くしやすいので、センシングに利用できます。ただマイクロ波に比べると周波数が高く波長が短いので、直進性が強くなります。回折しづらくなるので、建物の陰に回り込みにくい。物陰の後ろに回り込まないので、建物の中に電波が入りづらくなります。通信にとってはあまりうれしくない話だったりします。

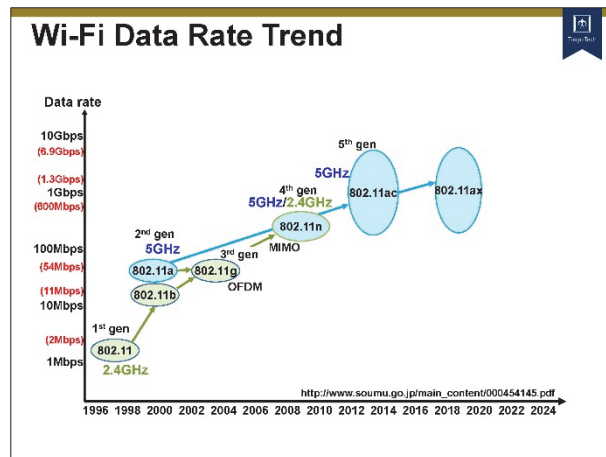
周波数がさらに高くなると「テラヘルツ波」になり、もっと高くなると光になります。少しずつ光に特徴が近づいていって、レーザーポインタのようにビームが飛んでいく、そんなイメージを持っていただければと思います。

あと最大の特徴は、安価な CMOS IC で実現できるということです。国内では「ミリ波」の 3 回目のブームが来たとされています。今回は単なるブームではなく、ようやく社会実装が実際に進んで定着した感じになってきましたが、かつて NTT の研究所などで研究していた頃などは、トランジスタが 1 個 80 万円もしていました。静電気で壊れてしまいますので、研究者たちは「怖い、怖い」と言いながら扱っていたそうです。「ミリ波」はそういう特殊なデバイスでしか扱えなかった時代が長かったのです。

CMOS は、ご存じの方もいらっしゃると思いますが、トランジスタの種類です。バイポーラと FET 型があり、MOSFET 型になりますが、今、世の中で 1 番使われているトランジスタです。スマホの中のデジタル回路や、CPU など、すべて CMOS というトランジスタでできています。アンリツの皆さんならご存じだろうと思いますが、個数ベースで言えば世の中の 99.9% ぐらいは、この CMOS のトランジスタでできています。そういう安価な CMOS のトランジスタで「ミリ波」の無線機も作れるようになったことが大きなところなんです。実際に

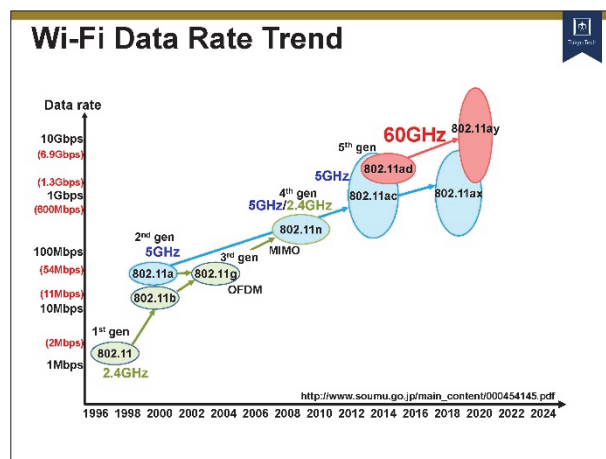
WiGig 向けのものなど、基本すべて CMOS で実装されています。2000 年ぐらいから CMOS でも「ミリ波」ができるのではないかとということで、研究が非常に活発になったことが裏の経緯としてあります。

1.4 Wi-Fi Data Rate Trend



スライド 4

この図は Wi-Fi のデータレートを描いたものです。歴史的なところからひといていくと、802.11 が出発点で、2 Mbps ぐらい。802.11b になって、この頃から使われる方が増えていったのではないかと思います。11a や 11g は大枠として 54 Mbps で実現され、この頃に使われた方も多いと思いますが、速かったですね、セルラーなどに比べると圧倒的に速くて、当時は 54 Mbps あればほとんどのケースで大丈夫ではないかなという気がしていました。それでも映像のデータレートが多くなるなど、どんどん要望が増えていき、最終的にスマホには 802.11ac, ax が載り、実効レートで 1.3 Gbps あるいは 1.7 Gbps 程度のデータレートが出るようになっていきます。

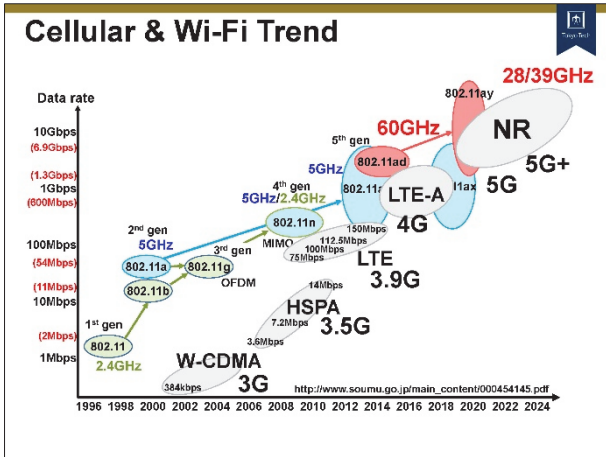


スライド 5

さらに将来を見越し、60 GHz 帯を使ってデータレート 100 Gbps 超えを狙う研究もありますが、残念ながらビジネス的には失敗して、現状では 1 Gbps とかあればまあまあ足りるかなということにな

ります。それでも最初に比べると 100 倍、1000 倍に近いレートが使われるようになっていきます。この差は小さいものではありません。たかが 20 年少して、そのぐらいの差が生じています。

1.5 Cellular & Wi-Fi Trend



スライド 6

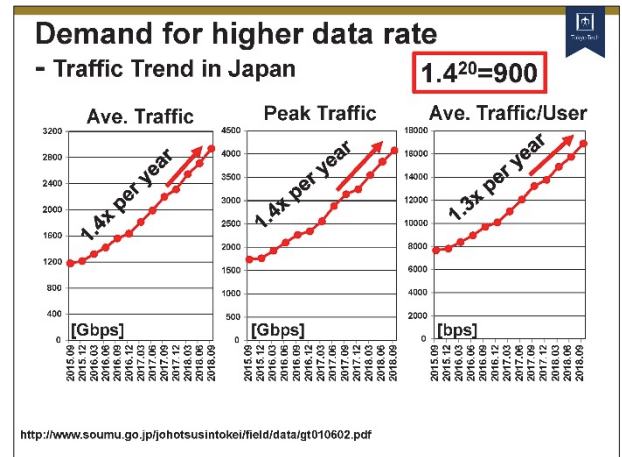
セルラーの方は、こうなっています。「3G」、「4G」と進み、「3G」では i モードなどが入ってデータレートはかなり上がっていましたが、データ通信速度としては 384 kbps ぐらいで、Wi-Fi と比べるとだいぶ遅かったんですね。

CDMA, OFDM が入り、MIMO が入ってというところで、技術的には非常に近いです。最後は「ミリ波」も入って、両者の違いがどんどん少なくなっていきました。専門でない方にはあまり差が感じられないかもしれませんが、Wi-Fi とセルラーはそれぞれ Wi-Fi アライアンスと 3GPP という違う業界団体でやっていて、まったく別のものです。しかし、歴史的なトレンドとしては、同様の技術が取り込まれていっています。

技術的に近づいて、「ミリ波」も入り、データレートも同じように伸びていっています。ここにもう一つトレンドがあるのですが、この図から何が読み解けるかわかりますか？

データレートも近づいていますが、通信距離のターゲットも近づいているのです。Wi-Fi はだいたい 20 m、せいぜい 50 m といった短距離を昔から狙っていました。一方、セルラーは 1 km といった遠くの基地局から電波を送っていましたが、最近ではスマールセルになり、「5G」では 400 m がターゲットの距離になっています。つまり、一つのセルがカバーするエリアがどんどん小さくなっているのも、通信距離が短くなっているのも、共通する傾向です。あとで少しだけ紹介しますが、通信速度を考える上では重要な部分です。

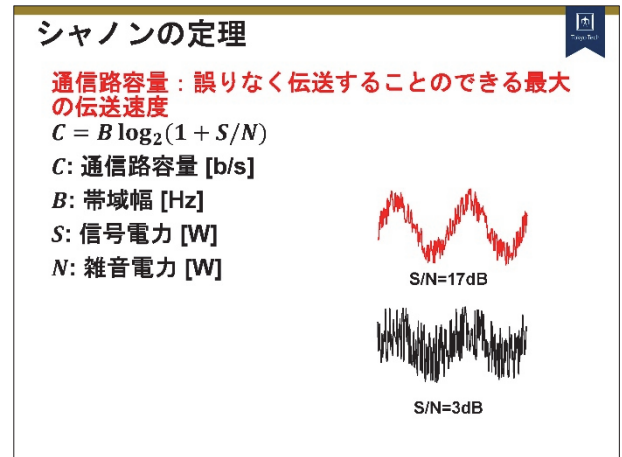
1.6 Demand for higher data rate



スライド 7

「ミリ波」を理解する上ではこの辺りは重要ですので、少し説明させていただきたいと思います。ご存じの方もお付き合いいただければと思います。国内のモバイルのトラフィック、平均やピーク、ユーザー当たりのトラフィックなどは、年率で言うと 1.4 倍伸びていっています。1.4 倍の伸びが 20 年続くと 900 倍になり、Tbps クラスの通信速度が必要になってくることになり、無線としてカバーしないといけないので「さあどうしよう」という話しです。

1.7 シヤノンの定理

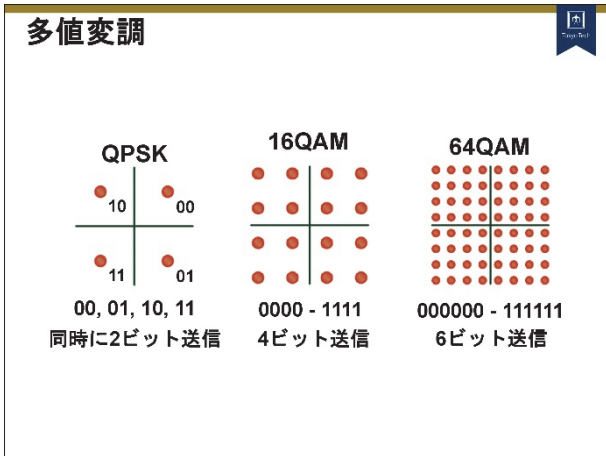


スライド 8

これについて理解するとき、シャノンの定理という数式が出てきます。もしかしたら数式はあまり得意ではないという方がいらっしゃるかもしれませんが、シャノンの定理は電気電子情報系の学生だったら学部 2, 3 年生ぐらいに習うようなものです。どんな定理かと言うと、通信速度の理論的な上限は、帯域幅と SN 比で決まるというものです。SN 比が低いとなんとなく正弦波に見え、1, 0, 1 といったように割り当てることができません。SN 比が高くなると 0, 1, 2, 3 のように割り当てることができません。つまり、SN 比が高い方が同時にたくさん送れる

ということです。あとは周波数ですね。帯域幅が広いと、0101 を素早く送ることができるので、通信速度を上げられるという話です。

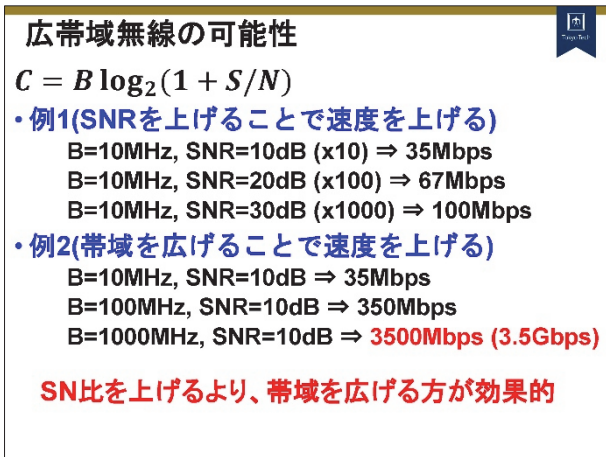
1.8 多値変調



スライド 9

実際にはサイン成分とコサイン成分が直交しているので、同時に送ることができます。QPSK はこういう風に送ることができます。QPSK から 16QAM にすると点の数が 4 倍になりますが、データレートは 2 倍です。64QAM になると点が 64 個あり、SN 比で言うとそれぞれ +6 dB 必要になりますが、実はデータレートは 3 倍しか増えません。

1.9 広帯域無線の可能性



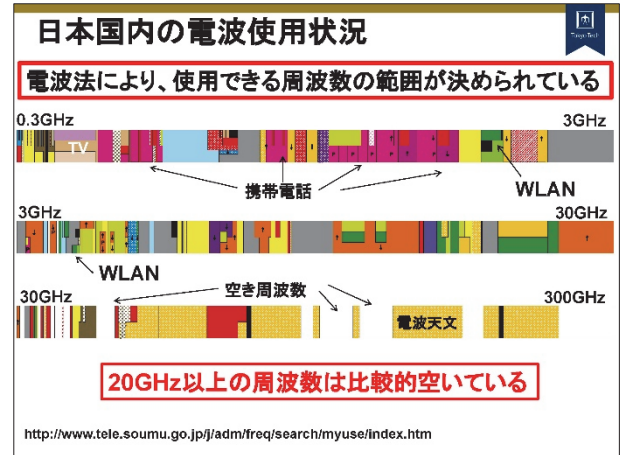
スライド 10

ここは重要なところですので、もう少し数値でやります。データレートをどうやったら上げられるかをシャノンの定理から考えます。帯域幅を 10 MHz にキープしますと、セルラーがほしい 20 Mbps です。SN 比を 10 dB で固定すると、ほしい 35 Mbps のデータレートが実現できます。さらにパワーを 10 倍、100 倍と増やしていくと、100 Mbps ぐらいまでは実現できますが、パワーを 100 倍使ってもデータレートは 3 倍にしかならないわけです。

一方、帯域幅を増やすと、比例してデータレートは速くなってい

きます。1 GHz の帯域幅で 3.5 Gbps を実現できますので、SN 比を上げるよりも帯域を広げた方が得です。しかし、なかなかそうは間屋が卸してくれません。

1.10 日本国内の電波使用状況

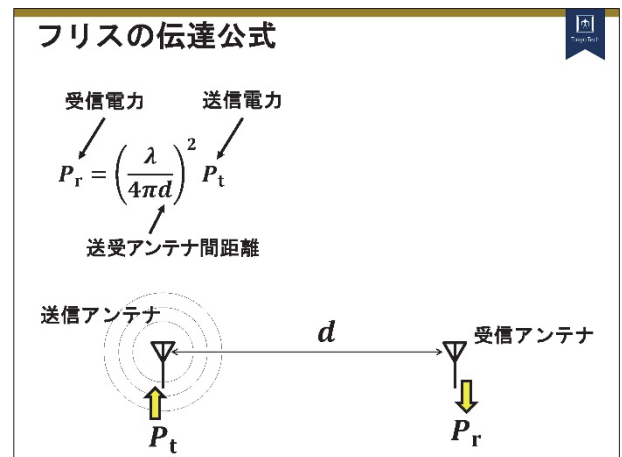


スライド 11

これは日本国内の電波の割り当てです。この辺はご存じのことだと思いますので省略しますが、ほぼ全部埋まっていて、1 GHz 以上の帯域幅は、少なくとも 20 GHz 以上でないといえませんが、現状は下の周波数帯を再編したり、電波を共有したりして、無理やりなんとかしていますが、トラフィックが年率 1.4 倍で増え、1000 倍のデータレートになると、どうやりくりしてももう追いつきません。将来的には必ず「ミリ波」や「テラヘルツ波」を使う必要が出てきます。これは、確実にわかっていることです。

コストや技術的なハードル、使いやすさ、サービスと周波数のマッチングなど、考えるべきことはいろいろありますが、データレートを決めるうえでは低い周波数帯域では空きがありませんので、「ミリ波」は間違いなく必要になるということです。

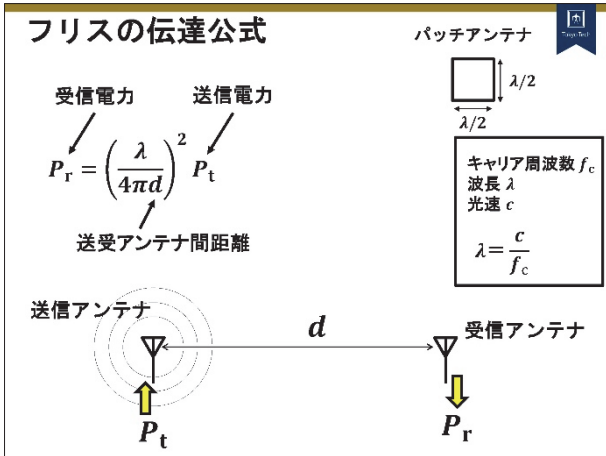
2 ミリ波の弱点



スライド 12

ただ、「ミリ波」には距離が飛びにくいという弱点があります。ご存じの方もいらっしゃると思いますが、重要なことですので少しだけ紹介させていただきます。

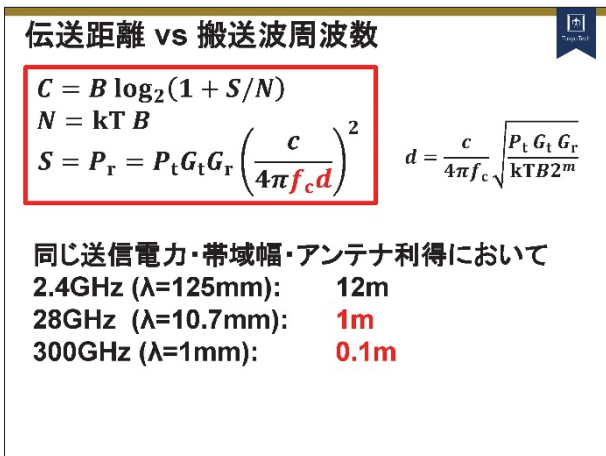
これは、フリスの伝達公式で、送信と受信のアンテナがあって、 P_t が送信電力で P_r が受信電力です。送信はアンテナから同心球状に広がっていきますので、距離が d 離れたところでは、球の表面積分の 1 で、単位面積当たりの電力は d の $1/4\pi d^2$ になります。ですので、ここが 2 乗分の 1 になっています。



スライド 13

一方、アンテナのサイズは、パッチアンテナなどはだいたい波長の大きさで決まりますので、周波数が高くなると波長が短くなり、パッチアンテナのサイズは小さくなります。ただでさえ単位面積当たりの電力は減っているのに、面積が減ると受けられる電力がさらに減ってしまうことになります。周波数の 2 乗分の 1、もしくは波長の 2 乗に比例して、受けられる面積、受けられる電力は減ってしまうということです。

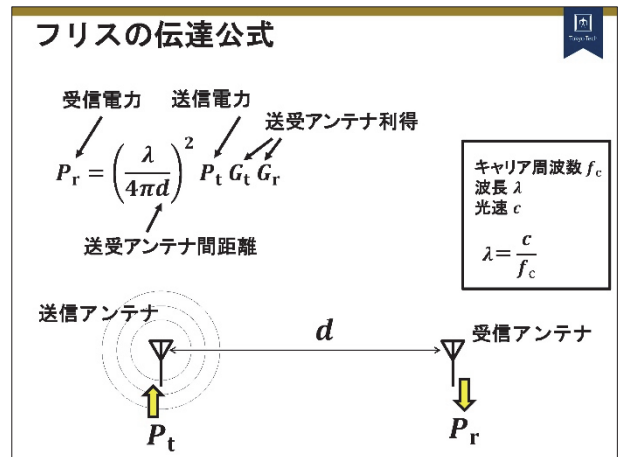
アンテナ利得の話は飛ばします。



スライド 14

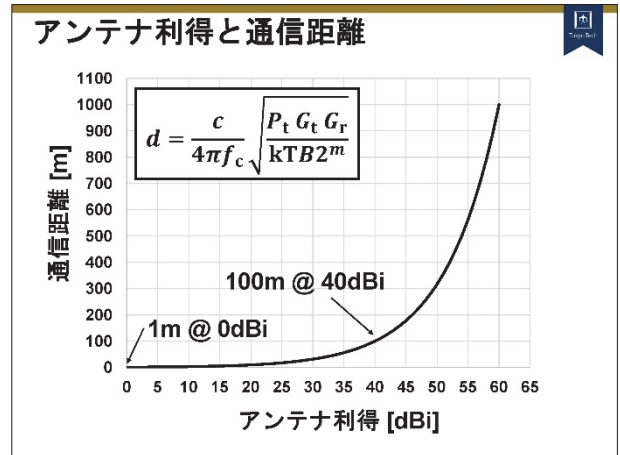
先ほどのシャノンの定理と、帯域幅が広がると雑音電力が増える

ことを表す熱雑音の式 ($N=kTB$)、そして今紹介したフリスの伝達公式ですが、受信電力が信号電力になりますので、代入してやるとこういう式が導出できます。同じ信号電力・帯域幅・アンテナ利得において、2.4 GHz で例えば 10 dBm で送信すると、12 m ぐらい飛ばせる。同じ送信電力、帯域幅、アンテナ利得で 28 GHz にすると、1 m になります。周波数に反比例しています。さらに 300 GHz にすると、通信距離としては 0.1 m になってしまいます。つまり、周波数を上げれば上げるほど距離が飛ばなくなります。これは「ミリ波」・「テラヘルツ波」を使っていくうえでの最大の弱点です。



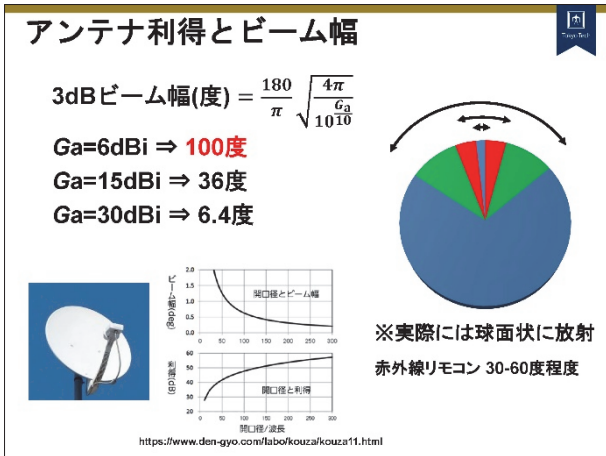
スライド 15

では、どうするかという話しですが、アンテナ利得というものがあります。無指向のアンテナですと同心球状に電波が広がっていきませんが、パラボラアンテナなどでは一方向だけに電波を絞ることができます。すると周りの無駄なところに飛んでいかないので、利得が上がったように見せることができます。送信も受信も、そのパラボラアンテナを使って利得を上げることができます。衛星放送では使っていますよね。50 dBi とか、非常に高いアンテナ利得を実現できます。



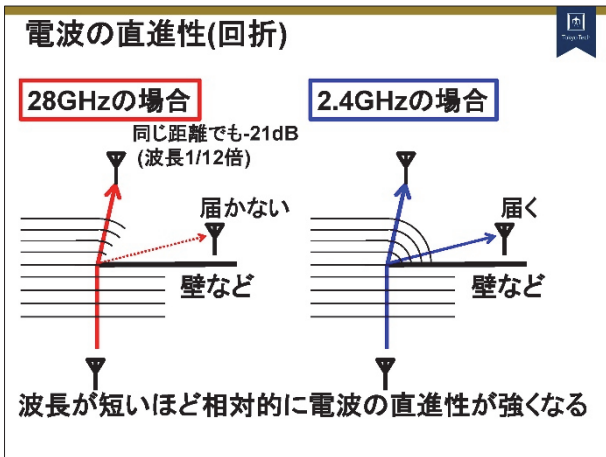
スライド 16

そうすると 40 dBi で 100 m と距離を伸ばすことができます。先ほどは 28 GHz で 1 m と言いましたが、52 dBi にすると 300 m ぐらいは飛びます。



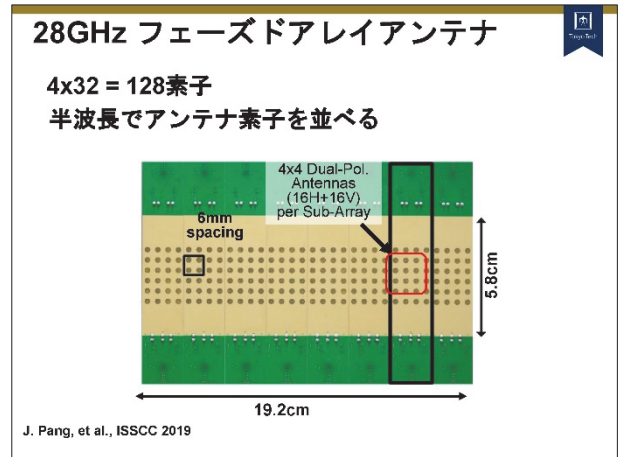
スライド 17

ただ、パラボラアンテナを使うと、ビームの幅が非常に絞られます。携帯電話は向きを気にせず通信できますが、パラボラではビームがぎゅーっと絞られて真っすぐな方向にしか飛ばなくなります。ビームを絞ることと遠くまで届けることがトレードオフになっているというわけです。ですのでモバイルには、パラボラアンテナやホーンアンテナなどの利得の高いアンテナは使えません。指向性を持つアンテナは使えないというわけです。



スライド 18

回折は省略します。壁の後ろなどには届かなくなります。2.4 GHz ぐらいなら届きますが、壁の後ろなどになると届かなくなるので、反射波で電波を届けてやらないといけない。反射はどの方向から来るかわからないので、指向性もある程度どこから来ても受け取れるようにしないといけません。そういう要望があるわけです。



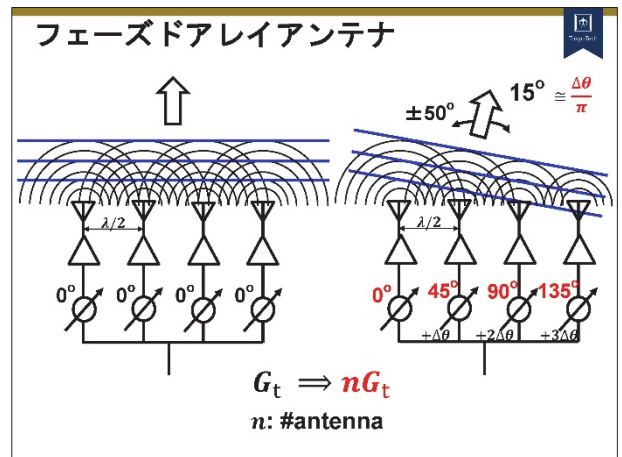
スライド 19

そこでどうするかと言うと、「フェーズドアレイアンテナ」になります。モバイルを室内などで使おうとしたとき、高利得のアンテナを使ってでも結局局特定の方角にしか飛ばせず、遮蔽(しゃへい)物があれば通信できなくなります。遮蔽物があった場合には、それをよけるように他の方向に飛ばすわけですが、そうするともう電氣的にビームを送るしか手はありません。ということで、ビームホーミング用のフェーズドアレイを使います。

これはうち(東工大)で作った「28 GHz フェーズドアレイアンテナ」の例で、縦が 4、横が 32 で、4×32 になっています。一番上の列と一番下の列はダミーのアンテナで給電されていません。実際には 128 素子のものになります。

この丸の一つひとつがアンテナになりますが、周波数が高くなると 1 個のアンテナは小さくなります。すると、電波を受けられる面積が小さくなってしまいますので、実効としては面積を広げてやる必要があります。

計算で出てきますが、同じ面積であれば波長が短いほど、周波数が高いほど遠くに飛ばすことができます。これが衛星通信などで使われていた理由です。数式は省略しますが、同じ面積ですと長距離を飛ばしやすくなっています。

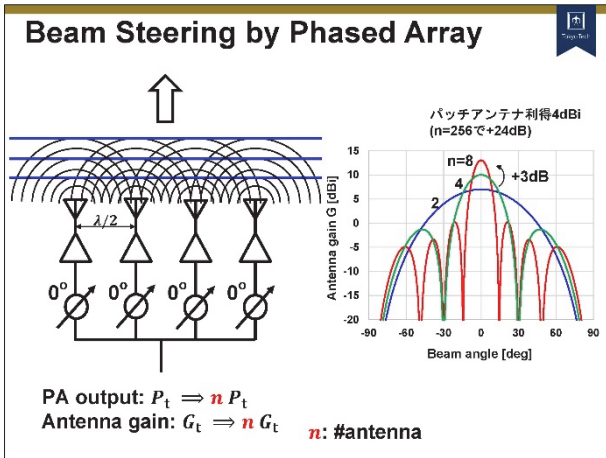


スライド 20

フェーズドアレイの基本的な原理を簡単に紹介します。例えばアンテナを1列に四つ並べます。ここにアンプがあり、ここに位相を変える位相器を置いてあります。下側から変調波を入力します。電波には山と谷があるので、山の強め合う電波と弱め合う電波とが出てきますが、ちょうど0度、0度、0度、0度で同時に送信してやると、真正面が強まる方向になります。少し傾いたところでは、この山と谷がキャンセルする方向が出てきてしまったりします。

これを0度、45度、90度、135度というように位相差をつけると、最初に0度の経路から電波が出て、次に少し遅れて45度の経路から電波が出て、さらに少し遅れて90度の経路から、そして最後に135度の経路から出てきます。すると波の強まる向きをだいたい+15度向けることができるようになります。そうすると0から180度ずらしても、最大でも±60度ぐらいしか振れないわけですね。

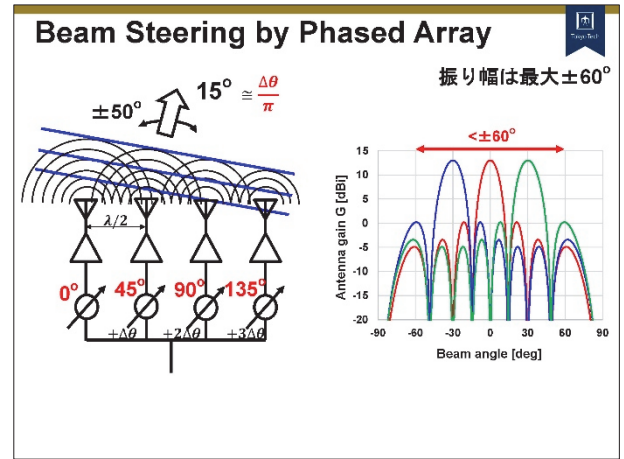
要するにこういうアンテナがあったときに正面方向(スライド19)、この画面の手前側には飛んでいきますが、少なくともアレイの裏側や、平面方向の真横に飛んでいったりはできません。ビームとしては上下左右に±60度ぐらい振れると思いますが、真横や後ろには飛びません。



スライド 21

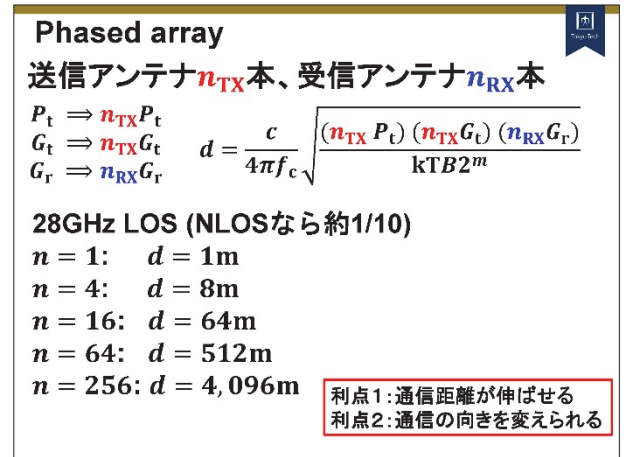
もう一つ重要なのが、アンテナの数です。数を増やしていったときには、利得を上げることができます。グラフの青がアンテナ二つの、緑がアンテナ四つの、赤がアンテナ八つのケースになります。アンテナの数を増やせば増やすほど、ビームの幅が狭くなります。ビームの幅が狭くなると、正面方向に強くなっていくということです。

アンテナの数を32, 64, 128, 256と増やしていきますと、256個・24dBでだいたいこの辺。すごくシャープで、かつビーム幅が狭いものを作ることができます。アンテナ利得で言えばちょうどn倍になります。送信電力も、この例ではアンプは四つですが、アンプが256あると送信電力も256倍にできるということです。



スライド 22

位相差をつけたときにはこういう風にビームを振れますが、このときにアンテナの数が増えていくと、どうしてもビームが細くなって正確に狙わないと受信側に届けられません。受信側も正確にビームを振らないと、送信側からの電力を受けられないということです。従ってかなり精密な制御が必要とされます。



スライド 23

先ほどシャノンの定理やプリスの伝達公式から変化した公式をご紹介しましたが、フェーズドアレイを使うと、アンテナが256個のときには送信電力(P)も256倍になります。アンテナ利得も256倍、受信のアンテナ利得も256倍になり、こういう風に書き換えられます。

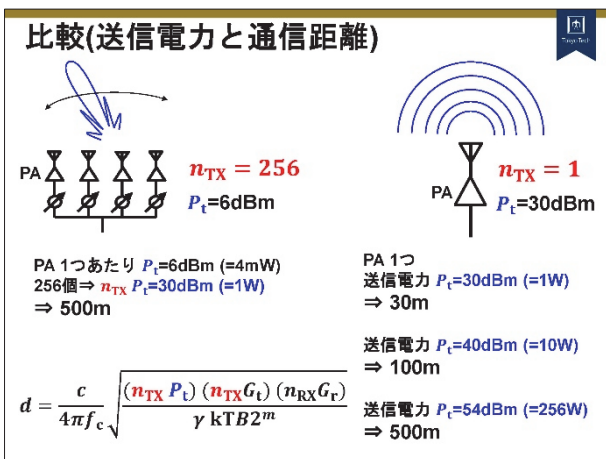
ルートの中に入っていますので、送信も受信もnだとすると、nの2分の3乗になるわけです。例えば、先ほど28GHzで通信距離1mと申し上げましたが、これが四つになると8m、16個で64mという風に増えていって、256個あると距離を4km程度まで伸ばすことができます。

周波数が高くなると一つひとつのアンテナが小さくなり、距離が飛ばなくなりますとお話しましたが、アレイにしてアンテナの数を増やしてやることで、長距離を飛ばすことができます。しかも、ビームホー

ミングを使うことで通信の向きを自由に変えてやることができます。

「マイクロ波」の場合は無指向でさまざまな方向に飛ばしていましたが、そうすると通信をしていない相手にも電波を飛ばしてしまうことになります。一方「ミリ波」の場合はビームホーミングができますので、特定の方向にだけ電波を飛ばすことができます。大人数で基地局を共有する方式として、TDMAやFDMAなど周波数を分けてAさん Bさん Cさんが使ったり、時間スロットで分けてAさん Bさん Cさんが使ったり、CDMAみたいな方式などがありますが、「ミリ波」を使うとビームを絞ることによって空間のマルチプレキシングもできます。これも「ミリ波」の利点の一つです。

ちなみにLOS(Line of Sight)とは見通し通信のことで遮蔽物がない場合、NLOS(Non Line of Sight)は間に遮蔽物があって反射電波を拾って通信する場合になります。反射する反射面の状況にもよりますが、だいたい1/3から1/10ぐらいの距離を飛ぶことが知られています。



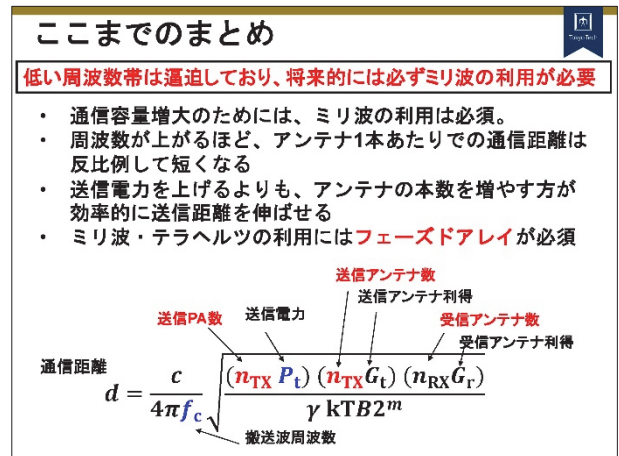
スライド 24

たくさんのアンテナをフェーズドアレイにする場合と、アンテナ 1 個の場合の比較です。重要なことなのですが、例えば同じ 500 m を飛ばすときにどのぐらいの電力が必要か、アンテナはいくつ必要かを理解するための簡単な方法です。例えば、このフェーズドアレイの場合、一つひとつのアンテナからの送信電力を 6 dBm とします。4 mW ぐらいです。図では四つだけですが、これが 256 個あると総電力は 1 W になり、計算上 500 m ぐらい飛びます。

一方で、無指向のアンテナを 1 本だけ使って距離を伸ばそうとするためには、パワーをどんどん上げていかないとイケないわけです。しかし、例えば送信電力を一気に 1 W 使っても、30 m しか飛びません。さらに増やして 256 倍してやると、ようやく 500 m 飛びます。しかし必要な電力が全然違います。256 個の場合は 1 W で 500 m 飛びますが、一つでは 256 W 使って初めて 500 m 飛ばせることになります。

つまり、アンプの数を増やしてやると、アンテナ利得, n のこの部分のアンテナの数を増やすことで、両方増やすことができます。長距離を飛ばすときには、アンプのパワーをどんどん上げるよりも、アレイの数を増やす方が効率よく距離を伸ばせるというわけです。こういう多数のアンテナをうまく操作するための、細かく高精度なビームホーミング、フェーズドアレイの技術が必要になっています。

現状「5G」、特に端末側ではあまり使われていないのはご存じだと思います。ビームホーミングの技術や、歩いている人をビームで追いかけるビームトラッキングの技術は、まだまだできていません。広いところを走っている車をビームで追いかけるようなデモンストレーションもありますが、もっと反射の多い状況、例えば東京駅などの人がいっぱいいる状況でビームを追いかけるかと言うと、反射しまくりですし、人が多くて端末もたくさんあるので、とてもビームを 28 GHz 追える状況ではありません。そこで、フェーズドアレイを制御する技術などは、まだまだ研究していく必要があります。地味ではありますが「Beyond 5G」では 1 番重要なところになってきます。

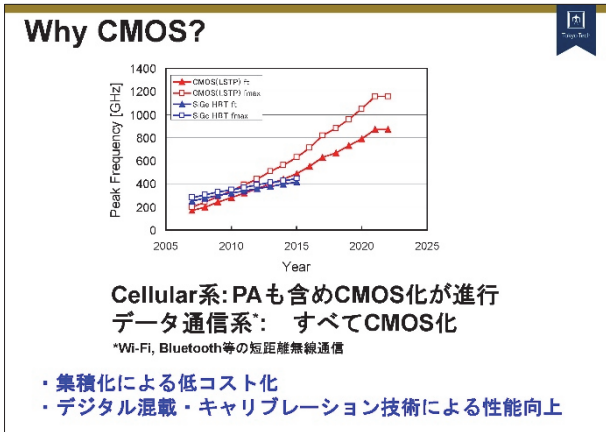


スライド 25

ここまでのまとめです。低い周波数は逼迫(ひっばく)しているので、通信のキャパシティを満たすためには、将来的には必ず「ミリ波」を利用していくことになります。これはもう確実です。

問題は どうやってアプローチするかです。アプリケーションと技術的な側面がマッチしていかないと使えないわけですが、けっこう難しいことでもあって、現状の「ミリ波」でさえモバイル環境では使い勝手の難しいものになっています。「5G」から「Beyond 5G」になるときに、現状の「ミリ波」をモバイル環境でいかに電力を下げるかなど、さまざまな課題を一つずつクリアしていくことが、一つの重要なターゲットになっています。ということで、まず距離が短くなるというお話しをしました。その解決のために、フェーズドアレイの技術が必須となっています。

3 CMOSによるミリ波無線機的设计

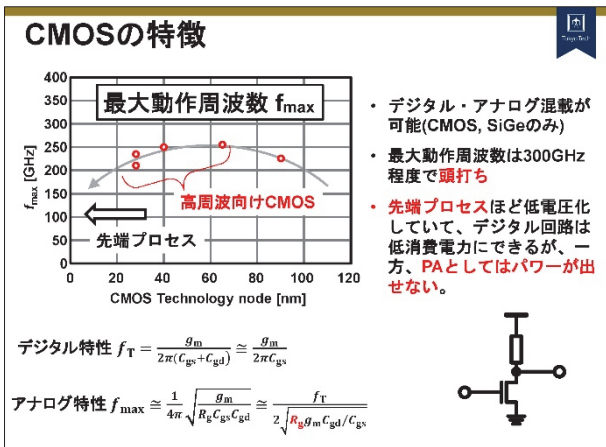


スライド 26

この辺りまでは一般的な話しになりますが, CMOS で実装するという話しです。

現状のスマートフォンなど, 中身をご存じの方もいらっしゃると思いますが, ほとんど CMOS でできています。Wi-Fi や Bluetoothなどは, もともと規格を決めるときから CMOS で実装できるように通信規格を決めています。PA や LD MOS すらも, 最近ではアップル, クアルコムを中心にどんどん CMOS に置き換わっていています。まだ性能的にはつらい面もありますが, コストや量産性などを考えた場合, CMOS の推進は今後まだまだ進んでいくと思います。

CMOS にする理由は, やはりコストを下げられること。そして, トランシーバーで言うデジタルの混載が可能なことです。特にフェーズドアレイでは位相や利得を各アンプ近くの位相器や, 可変利得増幅器などで調整する必要があり, 制御回路を混載しなければなりません。ですので, 無線のトランシーバーと言っても, かなり大きな規模のデジタル回路が載っています。あとで写真を紹介します。ということで, 制御の部分はけっこう重要になっています。



スライド 27

このグラフは, CMOS は将来的に f_t と f_{max} が両方上がっていくことを表しています。しかし, なかなかこのとおりにはいかなくて, 周波数(f_t)はデジタル回路の性能を上げると良くなります。アナログの場合の利得は f_{max} で決まっています, 特性として違います。ゲート抵抗が大きいと f_{max} は上がりにくくなりますが, 最近の微細な FinFET などでは, どちらかと言うとデジタルの f_t は上がっていますが, f_{max} は先ほどのスライド 26 みたいにリニアに上がっていくわけではありません。このグラフのように, 65 nm, 40 nm, 28 nm ぐらいでほとんど頭打ちになっていて, f_{max} については実はそれほど上がっていません。

このグラフでは f_{max} が 250 GHz 位になっています。誤解されがちですが, レイアウトの構造やトランジスタのサイズ, メーカー, フォブによって変わります。例えば 65 nm で 320 GHz ぐらいまで上げられます。それで 28 nm, 22 nm で少し上がって 350 GHz 少しまでいきますが, それでもいきなり 500 GHz や 1 THz にはいきません。この辺り(250 GHz~300 GHz)にあるので, 300 GHz 帯のトランシーバーを作るのは現在の CMOS 技術では困難です。どういう研究的動きがあるかは, 後ほど紹介します。

| | シリコン系半導体 | | | 化合物半導体 | | |
|----------------|--|---------------------|--------|-----------------------------|---------|-----------|
| | 先端 CMOS (5nm, ..) | 高周波用 CMOS (28-90nm) | SiGe | GaAs | GaN | InP |
| ロジック混載 | ◎ | ◎ | ○ | × | × | × |
| 大量生産 | ◎ | ◎ | ○ | △ | △ | × |
| チップコスト | ○ | ◎ | ○ | △ | × | × |
| f_{max} | 300GHz | 300GHz | 500GHz | >1THz | 100GHz | >1THz |
| 5G用フェーズドアレイ IC | △ | ◎ | ○ | × | × | × |
| 備考 | 世の中のトランジスタの 99.999999%は CMOS 最近ではセルラ向け PA も CMOS のものが増えている | | | CMOS に追加で SiGe トランジスタが混載される | セルラ用 PA | 大電力向け |
| | | | | | | 光通信向けが主市場 |

スライド 28

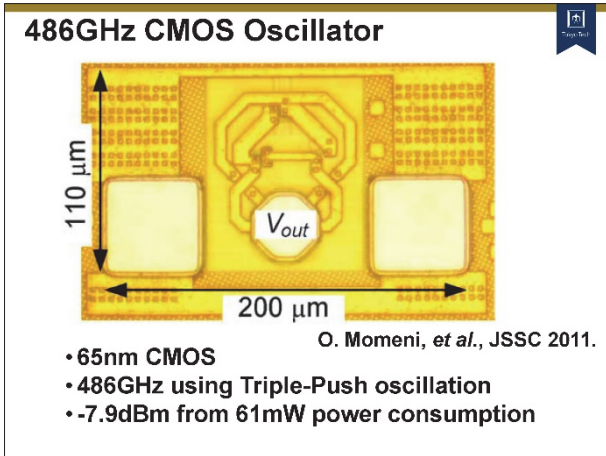
少し細かくなりますが, CMOS やシリゲル (SiGe), ガリヒ素 (GaAs) などがありますが, フェーズドアレイにするときにはロジックの混載が必須ですので, 結局 CMOS かシリゲル (SiGe) しかチョイスがないということです。現状チップや製品として出ているのは, すべて CMOS かシリゲル (SiGe) です。

大量生産できること, そしてデジタル混載ができることで, ほとんど決まってしまうています。一部 GaAs や, GaN などもありますが, 採用実績はなく, フェーズドアレイの IC は全部 CMOS になっています。

こっこのシリゲル (SiGe) や高周波用 CMOS など, ロジックの先端

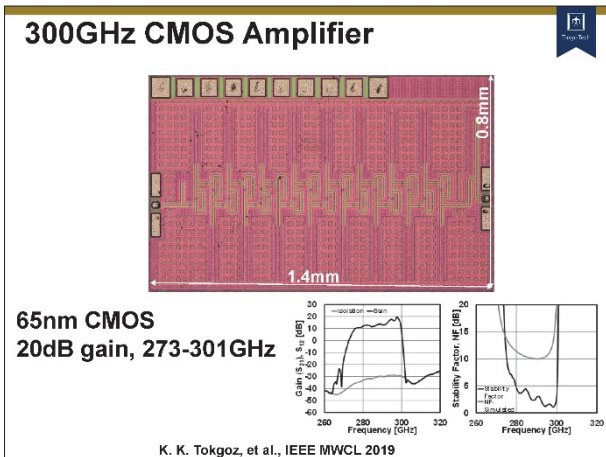
の 5 nm や 3 nm になりますと、耐圧が取れません。ですので PA としてのパワーが出せなくなりますので、どちらかと言うと 28 nm です。クアルコムは 28 nm です、うちは 65 nm 使っていますが、もしくはシリゲル(SiGe)。基地局向けではシリゲル(SiGe)が入り、端末向けはほとんど CMOS になっています。

このようにフェーズドアレイを考えるうえでは、CMOS か SiGe が有力になりますが、化合物半導体を利用するには、CMOS 等とのハイブリッド構成が必要になります。



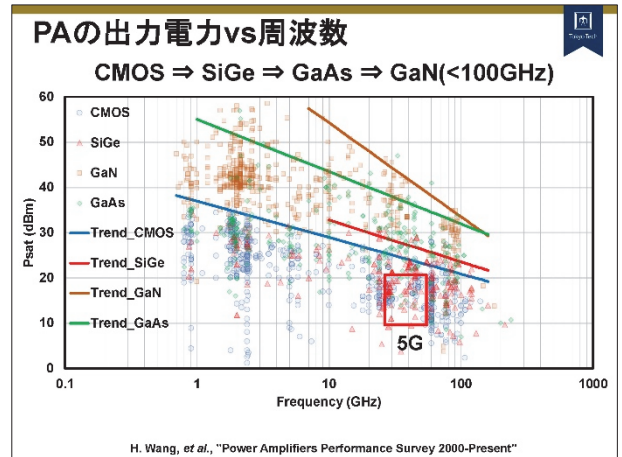
スライド 29

CMOS は f_{max} が取れないと言っても、486 GHz 位の発振器は出ています。これは UC Davis のものです。



スライド 30

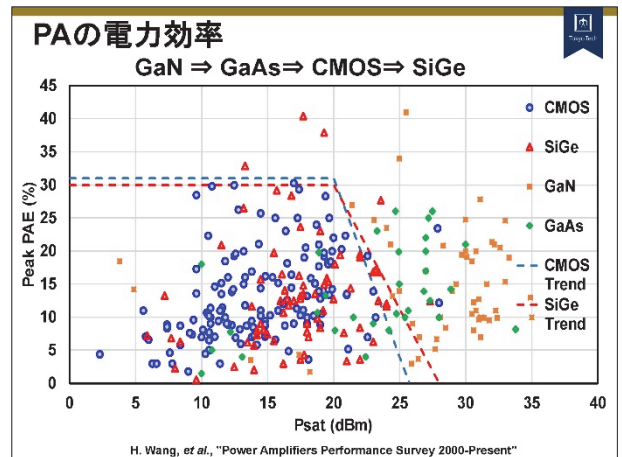
300 GHz のアンプも作れます。この「300 GHz CMOS Amplifier」はうちの学生が 2 年前ぐらいに開発したのですが、ぎりぎり 300 GHz ぐらいで利得を持つアンプです。CMOS でも作れますが、パワーがあまり出ないので、このままではトランシーバーには使えません。



スライド 31

トランジスタの種別で比較したグラフです。横軸が周波数、縦軸が P_{sat} (飽和時最大電力) で、CMOS とシリゲル(SiGe)、ガリナイ(GaN)、ガリ素(GaAs)を比べています。

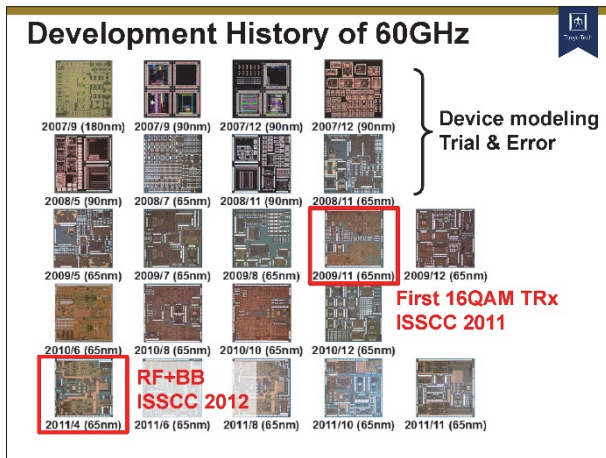
CMOS でも、「5G」の、周波数で言うところの 20 dBm ぐらいのものは出せるようになっていきます。100 GHz を超えるとやはりどんどん厳しくなっていきますが、最大 300 GHz ぐらいまで CMOS で作れるようになっていきます。窒化ガリウム(GaN)はまだ f_{max} が上がっていないので苦しいのですが、ガリウムヒ素(GaAs)やインジウムリン(InP)を使うと 1 THz ぐらいのアンプを作ることができます。



スライド 32

電力効率は、結局 f_{max} で決まっています。利得が高くないと効率は出せません。ですので、効率 30% 越えを狙おうとすると、結局シリゲル(SiGe)や CMOS など比較的 f_{max} の高いデバイスを使う必要があります。Peak PAE 30% などになっていくと、ガリウムナイトライド(GaN)やガリウムヒ素(GaAs)でしか出せなくなっていくのですが、「5G」向けや「6G」向けなどで狙っているところは、実は CMOS、シリゲル(SiGe)の方が出しやすいことが知られています。

4 CMOSによるミリ波無線機的设计例 —東工大の研究開発紹介—



スライド 33

東工大でやっている研究を紹介させていただきます。

2003年頃から高周波の回路を作り始め、2007年からは総務省のプロジェクトが始まり、「ミリ波」を研究しています。最初の頃は、けっこう失敗していました。60GHzで20dBぐらいのアンプを作ったら、利得がマイナス10dBで減衰器になっていたり、信号を入れてないのに出力が出る、つまり、発振器になっていたりなど、散々でした。5年のプロジェクトでしたが、なかなかその先が見えなくて、3年目ぐらいには通信ができるプロトタイプを作ろうという計画でしたが、アンプ一つすらまったく作れなくて、悪夢のような日々を過ごしていました。

そこで気持ちを切り替え、最初は5GHzぐらいのトランシーバーと同様の設計をして、丁寧に寄生の容量やインダクタンスの抽出をやれば、5GHz設計の延長でできるかとアプローチしました。しかし、それも失敗し、「ミリ波」っぽい設計フローも全部切り替えました。切り替えたと言っても、何かやり方があったわけではないので、いろいろ模索しながらやっていったわけです。雑巾がけみたいなことをずっと続けて、アンプが動くようになるとトランシーバーまでのステップは簡単だったと言いますか、やはりちゃんとした設計で作ったものをシミュレーション通りの性能で動かすことができ初めて「ミリ波」の集積度を上げていくことができるわけです。

この頃には学会などでもアンプが発表されていましたが、例えば三つ作ってまたま性能的に当たったものが一つあれば学会で発表できたような頃でした。しかしトランシーバーを作ろうとすると、アンプ、送信アンプ、受信アンプ、VGA、ミキサー、ベースバンドのアンプ、局部発振器等があったりして、一つひとつのブロックの成功

率を95%ぐらいにしておかないと、トランシーバー全体としては絶対に動かないわけです。

ということで、「ミリ波」をやっていくうえでの難しさは、そういう一つひとつの設計精度、シミュレーション精度を上げていくというところでした。そこが動き出すと、一気にトランシーバーも動き出して、性能もどんどん上がっていきました。

以上になります。

講演者紹介



岡田 健一 (おかだ けんいち)

- 2003年4月 東京工業大学 精密工学研究所 助手 (益研究室)
- 2005年10月 東京工業大学 統合研究院 助手 (精密工学研究所 兼務)
- 2007年4月 東京工業大学 大学院理工学研究科 電子物理学専攻 准教授
- 2016年4月 東京工業大学 工学院 電気電子系 准教授
- 2019年4月 東京工業大学 工学院 電気電子系 教授