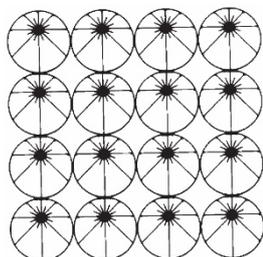


講演録



5G のさらに先へ Beyond 5G/6G で求められるネットワーク技術

早稲田大学 理工学術院 教授

川西 哲也

この講演録は、川西先生が 2020 年 11 月 6 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 はじめに

本日は貴重な機会をいただき、ありがとうございます。早稲田大学の川西でございます。先ほどご紹介いただいたとおり、長年光の分野を研究してきました。早稲田大学に移る前に長く在籍していた NICT では、入った当初から光で電波を送る研究をしていました。ですから、60 GHz の電波を光に閉じ込めるようなことをもう 20 年以上やっています。当初は「そんなことをしても無駄だ」「何でわざわざ光を使うんだ？」という空気ではありましたが、今はようやくこういう分野にも注目が集まってきているのかなと思います。

5G は標準化され、どういうものか定義されています。ですが、6G はまだみんなが好きなことを言えるフェーズですので、今日も好きなことを話させていただくことになろうかと思います。そのあたりはご容赦いただければと思います。

最初に、無線ニーズの増大と有線との融合をお話します。皆さんご案内のことがほとんどかと思いますが、無線を使いたいニーズは多く、「光よりも無線だ」とエンドユーザーは思いがちです。そうではなくて、私も大学の授業でよく言っているのですが、「電波が必要だから有線が必要だ」という話です。

それからファイバー無線技術を説明させていただきます。これは光ファイバーで電波を送る技術の根幹になりますが、そこでデジタル方式とアナログ方式の二つの比較を少ししたいと思います。ここが結構重要ではないかなと思っています。

光技術を使った無線信号の発生も一つのキーになるかと思うので、私の個人的な研究の背景にも依存していますが、そこについてお話します。また、6G システムの前段になると思われるシステムにおいて、どういう開発があるかをお話します。

「テラヘルツ」というキーワードでは、日欧連携で進行中のテラヘルツに関するプロジェクトのご紹介と、将来どういったテラヘルツのシステムがあり得るのかを議論するために、テラヘルツリンク性能の基礎検討の例をお話したいと思っています。

2 無線へのニーズの増大と有線との融合の必要性

まずイントロとして、ワイヤレス技術が広がれば広がるほど無線技術が必要になるという話を簡単にします。



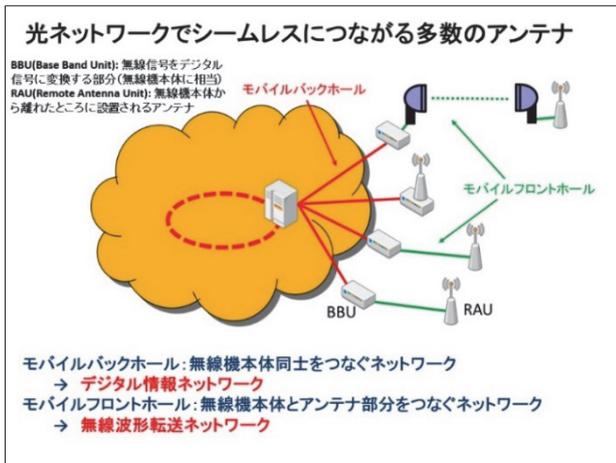
スライド 1

スライド 1 の写真は、OFC(The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition) ^{注1}にて 2014 年に私がジェネラルチェアを務めた国際会議 MWP2014(International Topical Meeting on Microwave Photonic)の紹介のために撮ったものです。無線接続のデバイスがちょうど机の上にあったので、それを撮りました。マウスと時計は今も使っていますね。実はよくみるとスマートフォンは線がつないでいます。

当時使っていたスマートフォンはかなり消費電力が大きく、すぐ電池が切れたり、再起動しないといけないうものが多かったように思います。私もずっとつながりっぱなしで使っていたんです。考えてみれば、この写真はモバイルシステムや無線システムは消費電力を下げないと意味がないことを示唆しているような気がします。この写真の使い方では充電のために線をつないでいますので、実はテザリングを Bluetooth とか Wi-Fi でやる必要はありません。本来的な使い方ではないということです。余談になりましたが、後で消費電力の話もしようと思っていますので、少し触れました。

本当なら全部無線にしたい。しかし残念ながら、人間が満足するだけ好き放題使えるだけの電波資源はありません。今までがラッキーだったのかもしれないですね。HD(High Definition)のデジタル画像を東京全体に配るだけであれば、スカイツリー一つで済んでいるわけです。ですが、個別にいろいろやろうとするとそこまで甘くなくて、電力と同じように線をつないでいく必要があるのではないかと思います。

前提になるお話を少しします。スライド 2 は基地局をつないでいるネットワークです。



スライド 2

皆さんご案内のとおりですが、基地局をつなぐネットワークとして、モバイルバックホールとフロントホールがあります。バックホールは普通のデジタルですね。無線機本体とネットワークをつないでいるので、デジタルのネットワークのやり取りになります。

一方、モバイルフロントホールは本体と張り出しているアンテナを結んでいるので、電波の波形を送る役割を果たしていることになります。したがって、スライド 2 の緑で描いた部分がかかなり特徴的なものではないかと思っています。今日この部分を中心にお話します。すでにお気づきかもしれませんが、このモバイルフロントホールの部分も一部電波でつないでいる絵にしています。日本ではだ

いたい全部ファイバーでつないでいる部分ですね。

基地局のネットワークに使われる伝送媒体のシェア予測について、GSMA(GSM Association)^{註2}がレポートを発行しています。

2017 年の実績, 2025 年の予測を比較しています。すでに日本では光ファイバーが大半占めています, グローバルで見るとまだ固定無線の割合がかなりあります。3/4 ぐらいが固定無線です。これが 2025 年に, 光ファイバーに置き換わっていきます。

2017 年の実績で見ると, 日本ではもう存在しませんが世界的にはまだ GSM(global system for mobile communications)の 2G がありますので, それも描かれています。2G, 3G, 4G と高性能なモバイルネットワークになればなるほど, 大容量の伝送が必要なので光ファイバーの部分が増えています。2025 年の予測ではすべての光ファイバーが増えています, 興味深い点の一つあります。5G と 4G を比べると, 5G の方は光ファイバーが減るという予測ですね。この理由を今からお話してみます。

シェア予測を地域ごとに見てみます。

ITU(International Telecommunication Union / 国際電気通信連合)の分け方なので, 日本人にはあまりなじみがありませんが, ヨーロッパ, 北東アジア, 北米, ラテンアメリカ, 中南米, 中近東と北アフリカ, サブサハラと南アフリカ, 南アジアと東南アジアという分け方です。

分かりやすい所から行くと, ヨーロッパですね。光ファイバーの普及がまだ少ないヨーロッパでは, そこがファイバーに置き換わっていきます。途上国もすべてそうです。北米も同様ですが, 日中韓の北東アジアは反転してシェアが減る予測になっています。昔ながらの固定無線が増えるという意味ではありません。5G, 6G になると, 非常に小さなセルが膨大な数必要になると言われており, その一部は短距離のミリ波固定無線に頼らざるを得ないだろうというのが, この GSMA の予測ですね。中身をもう少し見てみると, それが明らかになります。

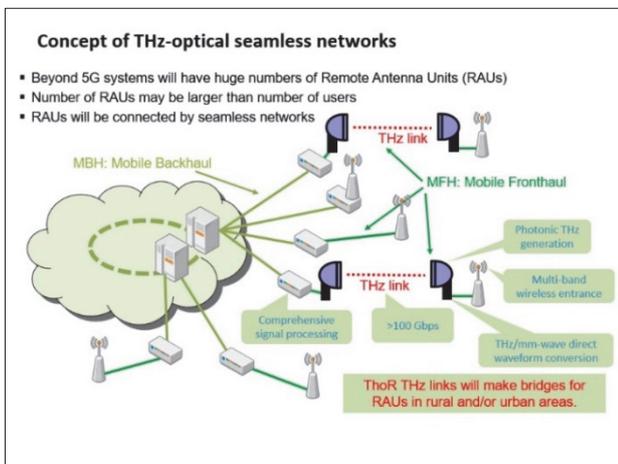
40 GHz 以下のマイクロ波と, 高い周波数のミリ波に分けて分析されていて, 2025 年にはこの高い周波数で動く固定無線が増えてくるという予測です。

各国別に見るといくつか面白い点があるので, 詳細はこの資料を見ていただければと思います。例えば, ヨーロッパでは一気にミリ波の固定無線が増えています。そもそも光ファイバーを引きづらいう事情もあるので, ミリ波に頼ろうというわけです。

私たちのいる北東アジアはもともと固定無線が少ないのですが, これからはミリ波の固定無線が増えるだろうと予測しています。ファ

イバーが駆逐されるという意味ではありません。実数ではファイバーも増えますが、ミリ波を使った短距離の通信がバックホールで一定の役割を果たし続けるだろうということです。

GSMA は 100 GHz までしか予測していませんが、その予測を外挿すると、もっと高い周波数の固定無線も考えられるのではないかと考えています。モバイルバックホール、フロントホールの一部として使うということですね。光でつないだ方がいいのだけど、設置コストなどを考えて一部は外を飛ばしましょうという考え方です。そこが、テラヘルツのリンクになるだろうと、私たちは想定しています。光と同等のものが必要だとすると、場合にもよりますが、必要な帯域は 100 Gbps ぐらいになるだろうと思います。



スライド 3

先ほど地上波デジタルが一つの局でできるのはラッキーだとお話しましたが、ここもまたラッキーだと思います。今はたくさんのセルを打たなければならず、電波が足りません。基地局間の距離が 100 m とか 200 m とか、そういうものが想定されていますね。そうであれば、今までは使えないと切り捨てられていたテラヘルツ帯が使えるようになってきます。ちょっと逆の話になるかもしれませんが、今までにはなかったニーズが出てきているので、今までと違った性能を持った無線リンクが出てくるのではないかとということです。

「無線リンクだけではネットワークできない」ことがポイントで、光と無線を何度も乗り換えていくようなネットワークが想定されます。そこで、直接的な信号変換も必要になってくるのではないかなと思っています。

このようなテラヘルツ帯の帯域は、膨大な数の帯域があるので広々と使えるとよく言われますが、今日はテラヘルツ帯でも逼迫する可能性があることを少しお話しします。

周波数逼迫の緩和

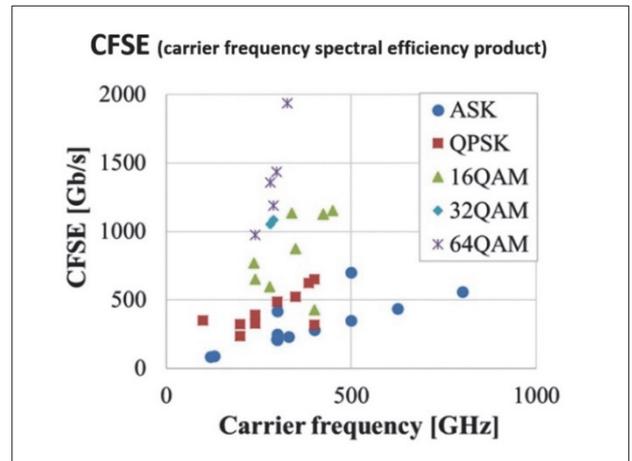
周波数利用効率の向上 Increase spectral efficiency (SE)
By using advanced modulation formats, MIMO or beamforming.
新規周波数資源の開拓 Explore new radio frequency resources
High frequency bands: millimeter-wave, THz...

CFSE (carrier frequency spectral efficiency product) = CF x SE
周波数逼迫緩和への貢献の度合いを示す指標

スライド 4

総務省で電波利用拡大のためのいろいろな研究開発を進めていますが、その目的の一つは周波数の逼迫を緩和するために周波数利用効率を上げること。もう一つは新しい周波数帯を開拓することです。この二つが、同時に成り立っている方がいいわけです。やはり新しい周波数帯域はコストもかかるので、いきなり周波数利用効率を上げるのは難しいのですが、とはいえ極力最初から両立する努力を惜しまないようにしないと、後から周波数の再配置に多大な労力が必要となる可能性があります。

そこで安直ですが、周波数の高さを利用効率の高さかけた指標「CFSE(Carrier Frequency Spectral efficiency Product)」を使って、最近の研究動向を分析した例があるのでお見せします。



スライド 5

スライド5は、横軸をキャリア周波数にとって、最近のテラヘルツ、いわゆる 100 GHz 以上の伝送実験の例を示したものです。

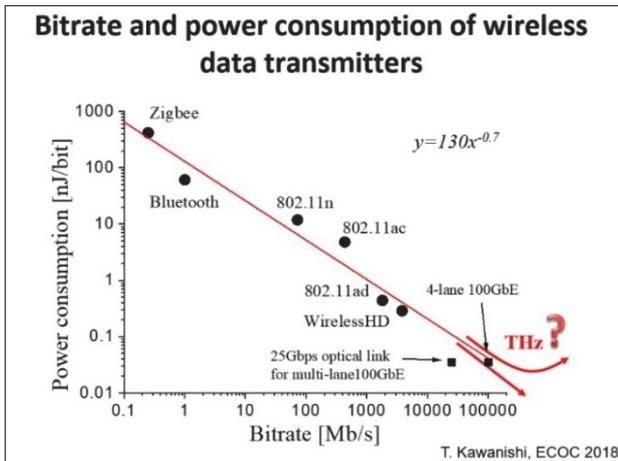
300 GHz までは CFSE は増えていきます。Spectral Efficiency が一定だと、当然 CFSE に比例して増えていきますが、300 GHz ぐらいいを超えると急激に下がります。これが意味することは、「現在のテラヘルツ研究の最前線は 300 GHz である」ということかと思ひます。

私は科学の歴史家ではないので、そこまでやれませんが、過去の無線の論文をたどっていくと、多分このフロントラインがずっとシフトしているはずで、その都度、アンリツさんを含む測定器メーカーさんの測定器の最高周波数を描いてみると、面白いのではないかなと思いますね。

ITU(国際電気通信連合)の無線通信部門である ITU-R(ITU Radiocommunication Sector)などで進められている標準化も、まさにこの 300 GHz を挟む所でやられています。新しい研究プロジェクトもここが多いので、誰でも思いつような指標ではありますが、こういう指標で研究動向を見てみるのも一つの手法かなと思っています。

ビットレートは、100 Gbps を超えると急激に落ちます。ですから、300 GHz で 100 Gbps というのが、最新の装置を使って高速伝送のデモをする実験では一つのポイントになるでしょう。デバイス研究では、400 GHz や 500 GHz など、もっと上を狙うべきだと言うかもしれません。

消費電力の話も簡単にしたいと思います。



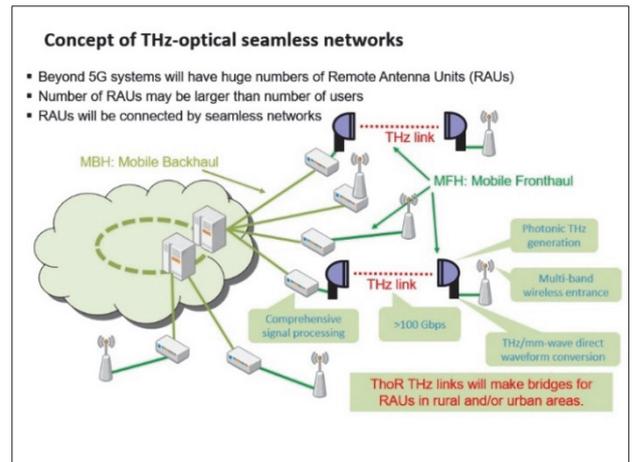
スライド 6

テラヘルツ帯の装置の消費電力の実測値は、まだありません。測定器ベースの研究ぐらいしかないので、普通に足すと非常に大きな消費電力になりますが、スライド 6 に示しているのはモジュール化されている短距離伝送装置の消費電力をプロットしたものです。

無線装置の場合、ビット当たり消費電力はビットレートが早いものほど少ない傾向があります。Bluetooth は低消費電力と言われていますが、ビットで見ると消費電力が大きいということですね。外挿していいかどうかは微妙ですが、もし 100 GHz の無線ができて、スライド 6 の赤線上に乗ったとすると、消費電力は現在最新の 100 Gbps 光装置と同程度になります。

実は、100G イーサの光装置と比べると光にとって分が悪いかもしれませんが、最新の機器ではなく、低消費電力性能の高い装置だともう 1 桁くらい下がると思います。いずれにしてもグラフの赤線上に乗るとすると、それほど大きな差はないと言えます。例えばテラヘルツを使ってデータセンターの一部を担うとしても、消費電力が 3 桁 4 桁も増えることはない可能性を示唆していると思っています。

モバイルフロントホールの一部をテラヘルツでやるためには、テラヘルツが実際に使えるような研究開発を進める必要があります。その具体的なお話をしていきます。



スライド 7

スライド 7 の右下に「ThoR(TeraHertz end-to-end wireless systems supporting ultra high data Rate applications)」^{注 3}と書いてありますが、これはヨーロッパのプロジェクトの名前で、そのターゲットが固定無線です。最終的には移動をやりたいのですが、技術的にもコスト的にもハードルが高いので、まずは固定からやるべきだと思っています。また、固定無線とはいえ、先ほどもお話したとおり、将来的にモバイルフロントホールの一部を担う可能性が高いのであれば、固定無線を先行させて開発環境やデバイスを安くして地ならししておくことができるかと思っています。

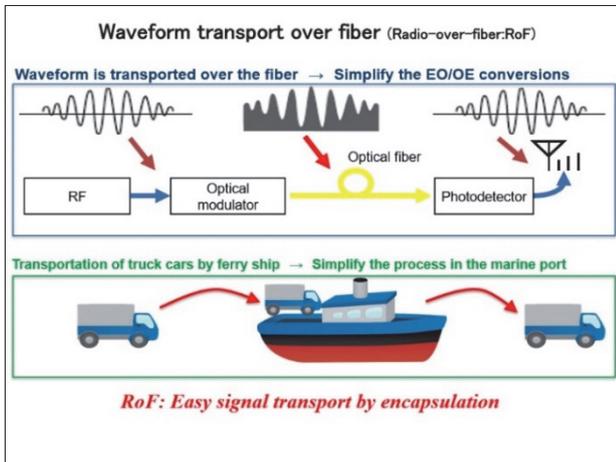
注 1: OFC(The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition): 北米最大の光通信技術に関する展示会

注 2: GSMA(Global System for Mobile Communications Association): GSM 方式の携帯電話システムを採用している移動体通信事業者や関連企業からなる業界団体

注 3: ThoR(TeraHertz end-to-end wireless systems supporting ultra high data Rate applications): 大容量アプリケーション向けテラヘルツエンドトゥーエンド無線システムの開発: 実際のネットワークに接続可能な 300 GHz 帯高速無線伝送システムの構築を目指し、日欧の産学官が共同で研究を行うプロジェクト

3 ファイバー無線技術

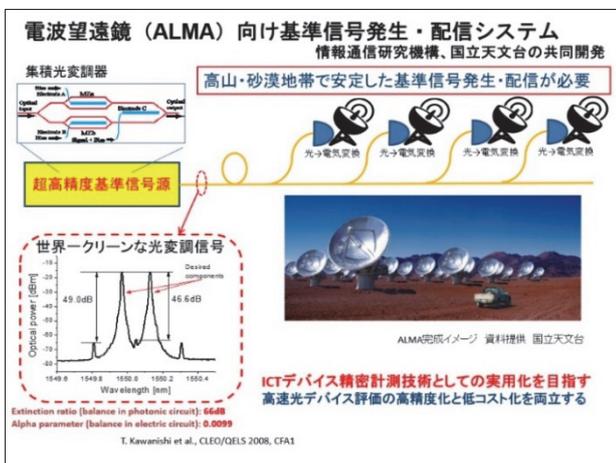
ここからファイバー無線の話をする。



スライド 8

ファイバー無線は、光ファイバーで波形を送る技術です。送りたい波形を光変調器で強度変調して、フォトディテクターで取り出すものです。スライド 8 の下にイラストがあります。皆さんにご説明するほどのものではありませんが、運びたいのはトラックではなくてトラックの中身ですので、そこをよく考えて設計しないと本末転倒になりかねないということです。

ファイバー無線(Radio over Fiber)は、ある種の仮想化と同じような効果があると思っています。信号処理する部分をどこにでも持っていきけるってことですね。フェリーに例えれば、荷物のやりくりを港以外でもできるようにすることが、1 番のポイントだと思います。光ファイバー無線というとアナログ技術なので、なんとなく仮想化とは真逆の話に思われがちですが、処理する部分を好きな所へ持っていくわけですから、実は目的は同じではないかと思っています。そのファイバー無線で使われている技術の一部をお話します。



スライド 9

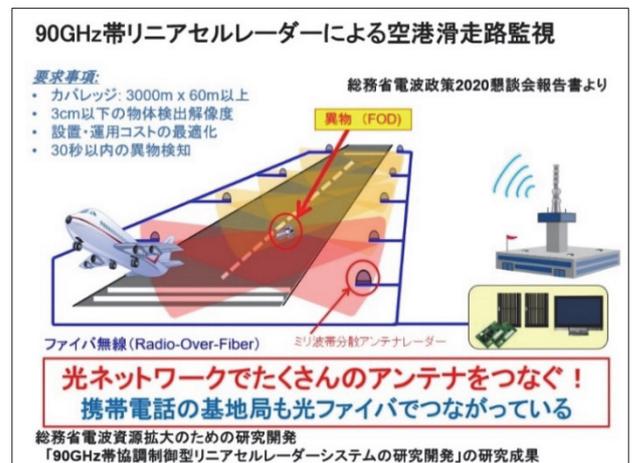
もうすでに使われている技術としては、電波天文台の基準信号源があります。変調器で作った信号を二つの周波数差が安定なことを活用して、電波天文台の全アンテナを同期させるための基準信号として使っています。2008 年頃の仕事で、その後、国立天文台さんとも一緒にやりましたので、もう使われ始めて10年近く経っていますね。変調器の部分に特殊な装置を使って、精度を上げています。

ファイバー無線の技術は、すでに一部の国家プロジェクトで研究開発されている例がありますので、それをご紹介します。一つ目が高速鉄道向けのシステムです。

すでに列車の中でも4Gが使えるようになっていますが、依然としてハンドオーバーの負荷があります。列車が動くと大勢の人が同時に動くので、どんどん切り替えないといけないわけです。それを解決するために、列車に向けたミリ波で太い線をつなぎ、列車の中には小さな基地局を設置し、お客さんは基地局経由で使えば良いという考え方ですね。

ファイバー無線の信号は、列車の位置情報を積極的に活用して切り替えます。そうすると、無線機の方は何も関与せずに済みます。列車の位置とファイバーネットワークが1対1で関係し、そこで制御すれば、今まで言われていたいわゆる「ハンドオーバー」なしに、ずつつながり続けるということです。

レーダーへの応用も行っています。滑走路に落ちている異物を発見するシステムの研究です。



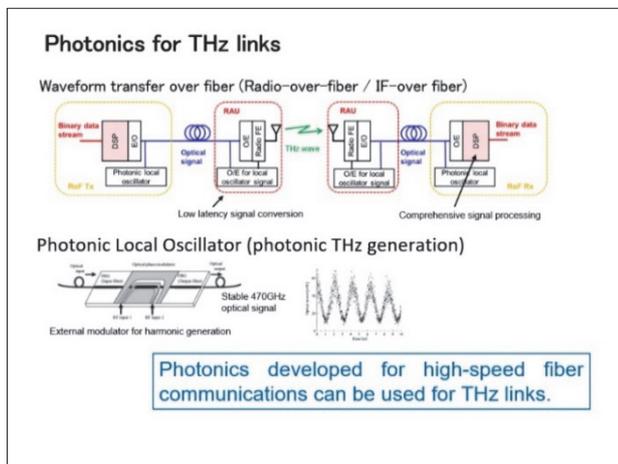
スライド 10

滑走路の異物の危険性は、コンコルドの事故などでご存じの方もおいでかと思いますが。これは総務省のプロジェクトでやった研究で、3000 m 程度の滑走路に落ちている cm オーダーの異物を数秒で発見するため、レーダーで検知してカメラで確認するシステムです。このとき、レーダー一つではカバーしきれないため、たくさん配置する必要があります。それらを制御するのに、ファイバー無線を使っています。

実は、光をテラヘルツに使うことはかなり昔からやられているんです。昔は「テラビット」と言っていましたね。測定器でも160ギガビットの光を見る装置とか、光サンプリングオシロスコープとか、今では多くの製品が製造中止になりましたが、WDM(Wavelength Division Multiplexing)全盛になる前は「TDM(time division multiplexing)か、WDMか」の議論があり、高速の光物性が研究者の興味を集め、研究プロジェクトがたくさんありました。

例えば、光のモードロックレーザーでパルスが何百ギガとかそういうものです。それらをもう1回掘り起こすと、使える研究があるのではないかと思います。

スライド 11 は、ファイバー無線システムの構成例です。



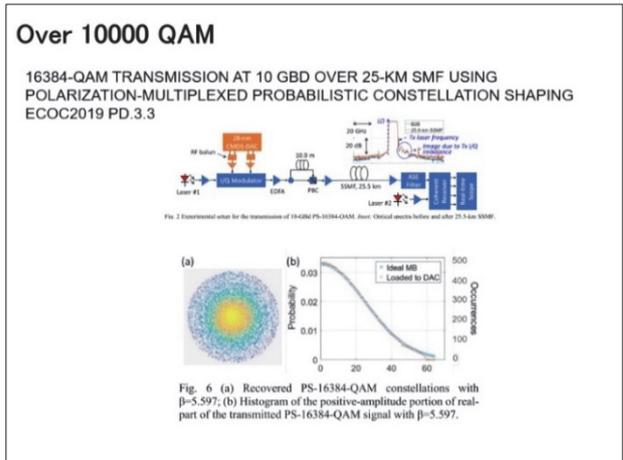
スライド 11

データをテラヘルツで送るわけですが、テラヘルツの波形そのものを光信号で送るのは効率が悪いので IF で送り、ローカル信号は光で別に送り、それらを混ぜるような構成が考えられます。ローカル信号を光でうまく作るということなんです。

スライド 11 の下の図に一例を示しています。もう10年以上も前に私がやった仕事ですが、フィルターをうまく使って、光変調器の中を光が何回か往復するような構成を作り、470 GHz のクロック信号を作ることになりました。

当時はビート信号を時間軸で見る装置が結構ありました。高速の光サンプリングオシロスコープで、測定した例です。そういう意味でも古い技術ではありますが、今またこれができるかもしれないなと思っています。

ここからは、データを載せる方の話をします。

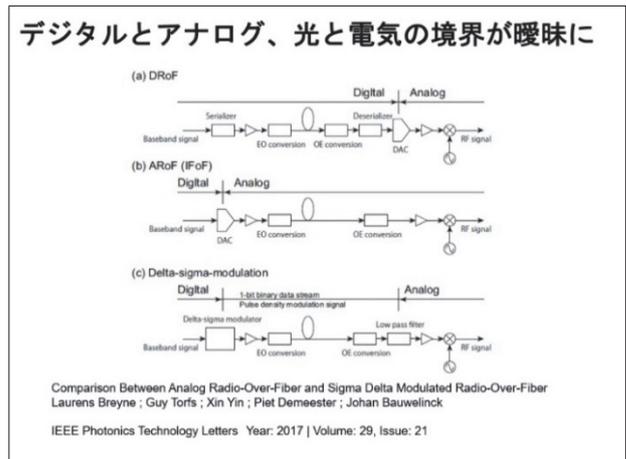


スライド 12

デジタルかアナログかという話を先ほどしました。先ほどはアナログの例で示しましたが、デジタルの技術もどんどん進んできていて、今16384のQAMが実現しています。これは確か7ビットをIとQでやることに相当します。ここまで来ると、何がアナログで何がデジタルかは、その切り取り方の違いだけになるのかなと思います。

コンステレーションを見ても、こんな雲みたいなものです。今となつては、ピュアにアナログで作っているオシロスコープや信号発生器は、あまりありません。波形として見るのか、点として見るのかの違いに過ぎず、「私はデジタルだ」「私はアナログだ」と区別するのが、もう時代遅れになってきたのかなと思います。

その例として、ファイバー無線のシステムと比較したものをお見せします。



スライド 13

スライド 13(A)のデジタルのファイバー無線システム(DRoF: Digital Radio over Fiber)は、ベースバンドシグナルから波形を作って、CD や mp3 同様に波形情報をデジタルのまま手元まで送り、アンテナの所で DAC(Digital to Analog Converter)します。その代わり DAC が、各箇所に必要なになります。

(B)のアナログの RoF(ARoF: Analog Radio over Fiber)は、基地局本体の方でアナログ波形にする構成です。

その中間が(C)です。「デルタシグマ変調」というもので、信号発生側はオンオフの 01 で波形を作ります。01 なので簡単ですが、その代わりオーバーサンプリングする必要があります。受ける側は単純にアナログ的に受けます。DAC はありません。伝送路全体が DAC として働いているような感じですね。これを携帯電話のネットワークに使用しようとする動きがあります。3G, 4G ではデジタルの RoF が使われており、皆さんご存じの数字かもしれませんが、必要な容量をスライド 14 に示しています。

DRoF: CPRI data rate options (for LTE 20MHz CC)

Option	No. of CCs	Line coding	Bit rate (Mb/s)	Examples
1	0.5	8B/10B	614.4	Only I or Q component
2	1	8B/10B	1228.8	One CC with I and Q components
3	2	8B/10B	2457.6	2 × 2 MIMO or 2 CA
4	2.5	8B/10B	3072	
5	4	8B/10B	4915.2	4 × 4 MIMO or 4 CA
6	5	8B/10B	6144	5 CA
7	8	8B/10B	9830.4	8 × 8 MIMO or 8 CA
7A	8	64B/66B	8110.08	8 × 8 MIMO or 8 CA
8	10	64B/66B	10137.6	5 CA + 2 × 2 MIMO
9	12	64B/66B	12165.12	3 CA + 4 × 4 MIMO

For 400-MHz 5G NR, 20.274 Gb/s for a CC, and 324.384 Gb/s for 16 CA.
More than 1 Tb/s is required for RAUs with massive MIMO and beamforming.

➡ **Function split or ARoF?**

スライド 14

一つの LTE のチャンネルを送るのに 1.2 Gbps です。キャリアアグリゲーションなどをやってもだいたい 10 Gbps に収まることになり。今は 10 Gbps の光も非常に安いので、デジタル RoF で行くのが 4G まででした。

5G の場合、400 GHz の 5G NR(New Radio)^{注4}の信号で 20 Gbps が 必要です。アンテナ 1 個では済まないで、普通にデジタル RoF でやると 1 テラ必要ですといった話になってきます。そこで「function split」という考え方が使われています。本来なら仮想化の考えで信号処理部はどこかに集中させ、アンテナはなるべく軽くしたい。しかし、仕方なくアンテナ部分に一部機能を持っていく。もしもそうなると膨大な数の基地局を置いたときに、実はそのスプリットしたファンクションがたくさん必要になるわけ。でも今の 5G は、function split で、必要な伝送容量が莫大となるとい課題を取りあえず避けるとい形になっています。それで良いのか悪いのかは、今後の通信が安くなるかファンクションを配るのが安くなるか、その動向に左右されますが、これがまた話題になってくるでしょう。要するに、単純に今までどおりデジタルでいけないということです。

スライド 15 は、デジタルとアナログで必要な容量を比較したものです。

デジタルとアナログ、光と電気の境界が曖昧に

	ARoF	DRoF (CPRI-based)	Delta-sigma modulation
Sampling rate	N/A	30.72 MSa/s	10 GSa/s
Quantization bits (NOB)	N/A	15	1
Required capacity per 20-MHz CC	~20 MHz	1.23 Gb/s	312.5 Mb/s

Comparison Between Analog Radio-Over-Fiber and Sigma Delta Modulated Radio-Over-Fiber
Laurens Breynne ; Guy Torfs ; Xin Yin ; Piet Demeester ; Johan Bauwelinck
IEEE Photonics Technology Letters Year: 2017 | Volume: 29, Issue: 21

スライド 15

ARoF(Analog Radio on over Fiber)の場合、これは理想的な場合ですが、20 MHz の信号は 20 MHz で送れるはず。これよりもマージンを取るとしても、数倍で済むと思います。しかし DRoF だと、これが 1 GHz になってしまいます。一方、デルタシグマを使うと、ちょうど中間ぐらいで、ARoF の 1 桁上ぐらいです。どれか一つで行く方がシステム管理する上では楽ですが、それぞれをうまく組み合わせないと、Beyond 5G/6G ではそう甘くないかもしれない気がしています。

注 4: 5G NR(5th generation new radio): 第五世代移動通信システム用に 3GPP によって仕様策定された新しい無線アクセス技術

4 日欧連携プロジェクト (ThoR⁴) の紹介

ここからは、ヨーロッパとの連携の話をする。

欧州との連携によるBeyond5G先端技術の研究開発

https://thorproject.eu
https://www.waseda.jp/inst/research/news/67507

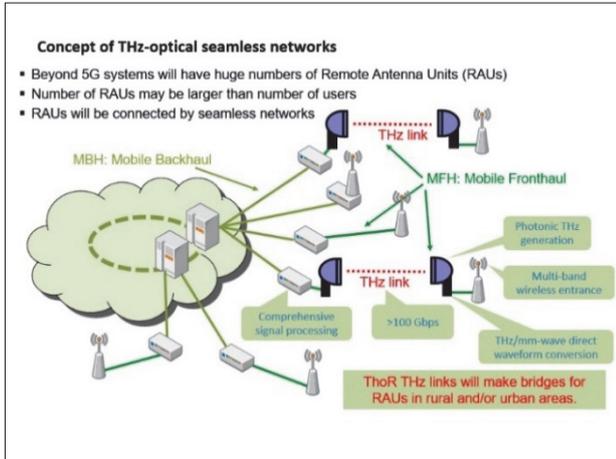
実際のネットワークに接続可能な300GHz帯高速無線伝送システムの構築を目指す
日本側の高速無線信号処理技術・テラヘルツ (THz) 帯増幅技術と、
欧州側の THz 帯半導体回路技術を融合
送受信器開発と並行して、伝搬モデル構築や標準化にも取り組む

スライド 16

先ほどお話したように、ある拠点間をテラヘルツで結ぶことが必要になると考えています。日本側はうちの研究グループと、メーカーさんと、大学がコンソーシアムを組んでいます。ヨーロッパ側は、ガウス (Carl Friedrich Gauss, ドイツ人の数学者) のいたブラウンシュバ

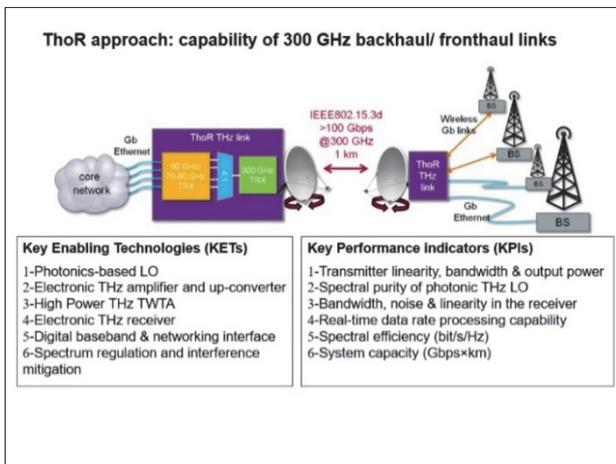
イク工科大学がヘッドになって、後はヨーロッパのオペレーターや、高速の電気回路をやっている研究機関などが参加しています。

テラヘルツの研究自体は今までもありましたが、特徴をいくつかお話します。スライド 17 は先ほどもご覧いただきましたが、「テラヘルツリンク」を実現するために ThoR というヨーロッパのプロジェクトがあります。



スライド 17

このプロジェクトのポイントをいくつかご紹介いたします。



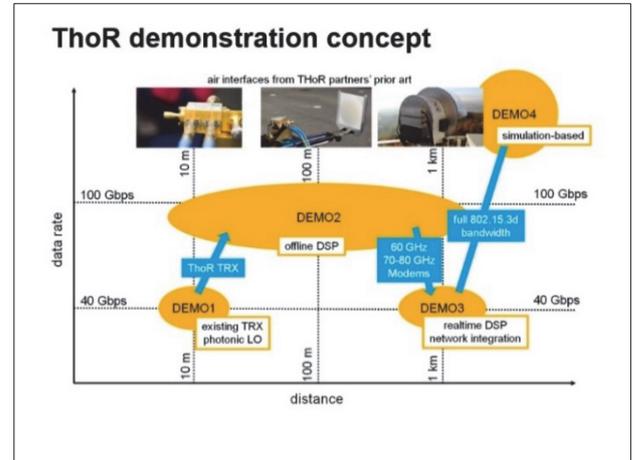
スライド 18

ThoR では、光を使ってローカル信号を配ること、テラヘルツの信号を増幅・変換・受信する RF のフロントエンドの開発、それからこれは日本側の役割ですが進行波管アンプの開発などによって、ハイパワーのテラヘルツを目指しています。テラヘルツの伝送実験は、今までは測定器ベースでのオフライン処理などが多かったのですが、しっかりネットワークからつながるようなものを作ろう、このベースバンドの所からつないでいこうとする取り組みです。

使えるテラヘルツにするために、周波数の使い方や伝搬、それから干渉についても考えていきます。ヨーロッパのグループのヘッド

は、テラヘルツの国際標準無線規格を作ったチームで、その規格に準じた信号を実際にベースバンドから作っていくことも、目的の一つです。

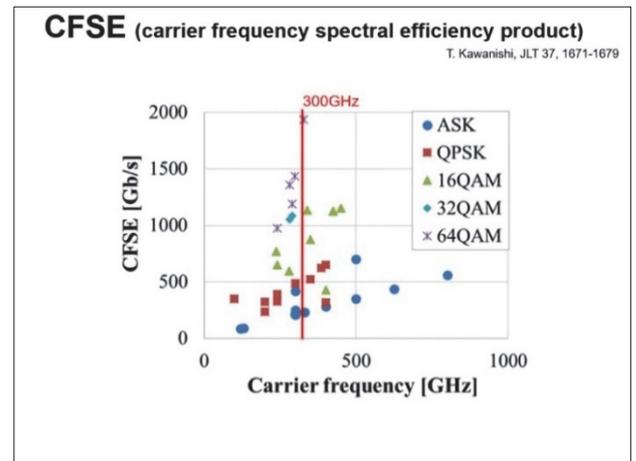
スライド 19 は、実際に実験でやろうとしているデモですね。



スライド 19

オフラインの実験とシミュレーション、それからリアルタイムなど、予算も限られているので、すでにあるものを組み合わせながら、必要なものを少しずつ足す形で進めています。1 km の距離で 40 Gbps を実現するために、実測データからシミュレーションでその限界を求めようとしています。これが一番目を引く実験だと思えます。

先ほどの繰り返しになりますが、CFSE 指標で見ると、ピークは 300 GHz です。

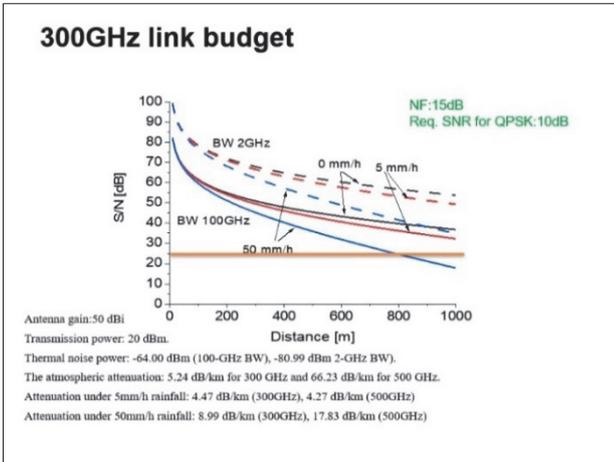


スライド 20

まさにこのプロジェクトでも、300 GHz で 100 Gbps をやろうとしています。私の論文に載ったグラフ(スライド 20)を見て、プロジェクトができたわけではありませんが、後で振り返ってみれば、グラフの頂点の所でまさに合っていたということですね。

ここからは、テラヘルツのリンクバジェット(Link Budget, 通信回

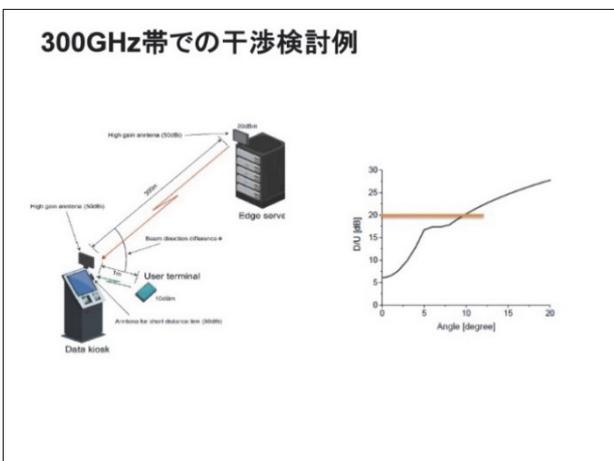
線の利得を示す量)がどうなっているのか、いくつか例をご紹介します。国際標準のサイトにあるいろいろなモデルや教科書に載っているデータを使えば、どなたでも計算はできますが、まだデータが不足している部分もあります。それについても、少しお話しします。



スライド 21

スライド 21 は、固定無線を想定し、アンテナゲインを 50 dBi とかなり高めに想定したグラフです。トランスミッションは 20 dBm で、帯域幅はかなり異常な広さですが、100 GHz と 2 GHz を比べています。QPSK は皆さんご存じのとおり 10 dB の S/N が必要ですが、マージンとして NF を 15 dB 見込んでオレンジ色の線を引きました。その線を参照すると、300 GHz で 100 GHz の帯域を取る場合、50 mm の雨が降ると 800 m ぐらいまでということになります。屋外使用を想定すると、100 GHz の帯域を取ったとしても、数 100 m のリンクは作れるでしょう。

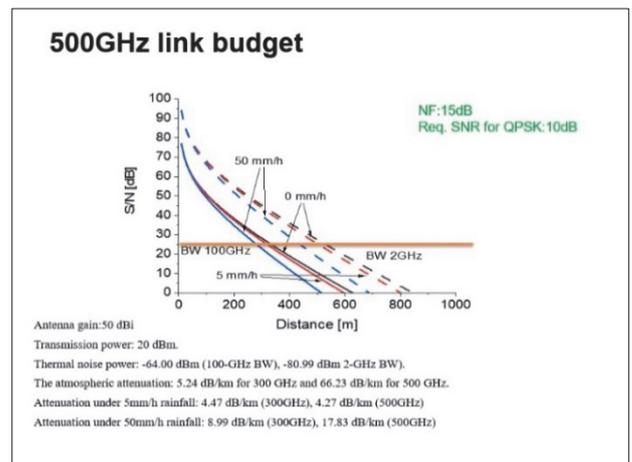
「300 GHz など使っている人がいないから、干渉など起きないのでは」とのご意見もあるかとは思いますが、リモートセンシングや電波天文などへの影響もありますので、すでに干渉検討が始まっています。スライド 22 は、電波の発信源同士の干渉の検討例です。



スライド 22

データキオスクと、スライド 22 ではエッジサーバーと書いてあるデータのコアネットワークを固定無線でつなぐアプリケーションがあったとします。回りにユーザーがいて同じ 300 GHz を使う場合、角度差が 10 度を切ると D/U 比が 20 dB を切る結果になっています。必要な S/N が 20 dB 程度で、それと同じ D/N 比が必要だと仮定すると、やはり 10 度ぐらいのマージンが必要となります。固定無線同士であれば簡単に対処できるかもしれませんが、今は移動と固定が両方も検討されていますので、すでにこういう干渉は起きるということです。

それなら 500 GHz に行けばいいのではないかについて、少しお話しします。500 GHz では損失が増えて、伝送可能な距離は減ります。100 GHz の帯域を取ろうとしても、実は 500 GHz にはするどい吸収線があり、そのまま 100 GHz を取るわけにはいかないので配置を少し工夫しないといけません。スライド 23 のグラフは、そういう事情は無視しています。



スライド 23

そうすると 200 m ぐらいです。Beyond 5G だとピコセルの半径は 100 m を切ると言われているので、それぐらいであれば 50 mm の雨が降っても大丈夫です。また、考えれば当たり前ののですが、大気減衰が卓越してくるため、500 GHz では雨の影響が減ります。もうすでに吸収されているのだから、雨が降っても関係ないわけです。したがって晴天を想定した設計だからといって、雨の影響が大きく出ることはありません。もちろん遠くまで飛ぶシステムというわけではありませんが、ちょっと様相が変わってきます。

こういったものを計算するための知的なインフラは、ある程度はそろっています。

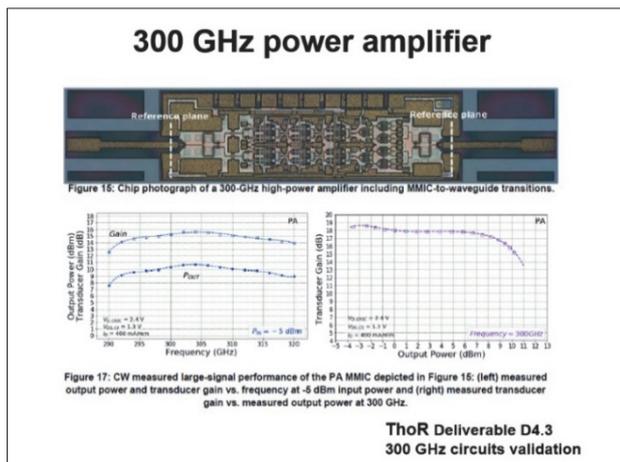
References for link budget calculation

1. Report ITU-R F.2416, Technical and operational characteristics and applications of the point-to-point fixed service applications operating in the frequency band 275-450 GHz
2. Report ITU-R SM.2450-0 Sharing and compatibility studies between land-mobile, fixed and passive services in the frequency range 275-450 GHz.
3. Recommendation ITU-R P.676-11, Attenuation by atmospheric gases and related effects
4. Recommendation ITU-R P.835-5, Reference Standard Atmospheres
5. Recommendation ITU-R F.699-8, Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for use in coordination studies and interference assessment in the frequency range from 100 MHz to 86 GHz
6. Recommendation ITU-R P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.

スライド 24

スライド 24 は ITU-R のドキュメントのリストですが、中には周波数の上限が 86 GHz のものがあります。こういったものがテラヘルツ帯に対応していかないと、簡単には計算できないのです。

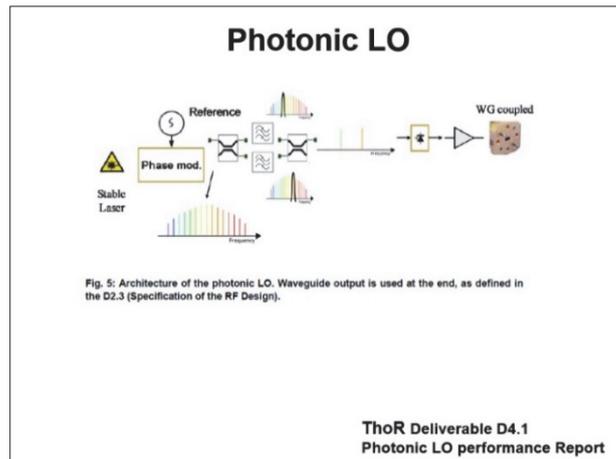
ここからは、ヨーロッパのプロジェクトでやっていることをご紹介します。スライド 25 は 300 ギガのパワーアンプの例ですね。



スライド 25

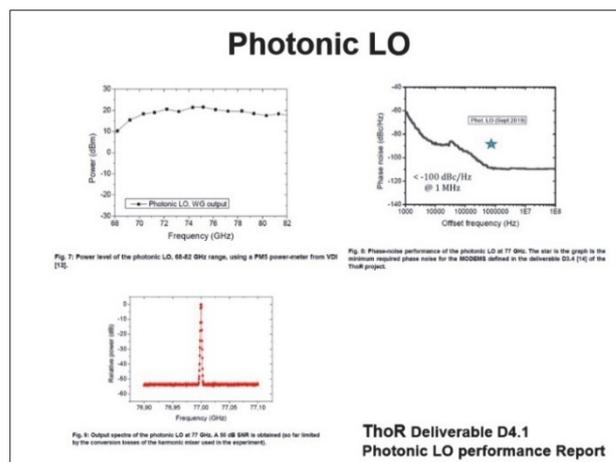
10 dBm ぐらい出るパワーアンプで、帯域幅が広く 20 GHz ぐらいあります。ブラウンホーファー研究機構がシュツットガルト大学と共同で作っています。

光のローカルはアンリツさんでもいろいろやられていたかと思いますが、フランスのグループがやっているのがスライド 26 です。



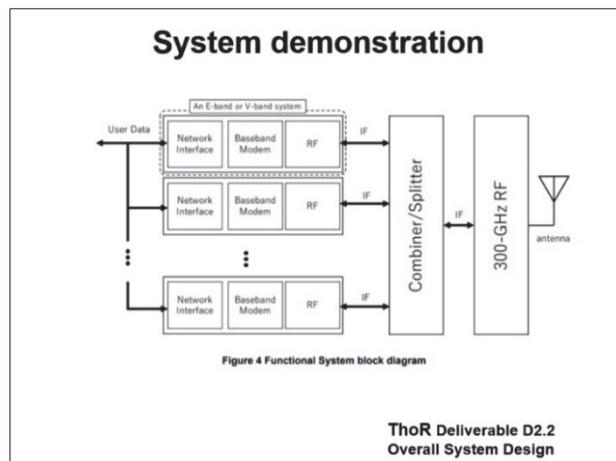
スライド 26

ご存じの話が多いかと思いますが、光変調してサイドバンドを作り、導波路結合素子に入れるということですね。原理自体は知られていますが、位相雑音を下げたり、チューニングできるようにしたりするために、フランスのグループが今しっかり作りこんでいます。



スライド 27

スライド 28 が、実験しようとしているシステムの構成図です。

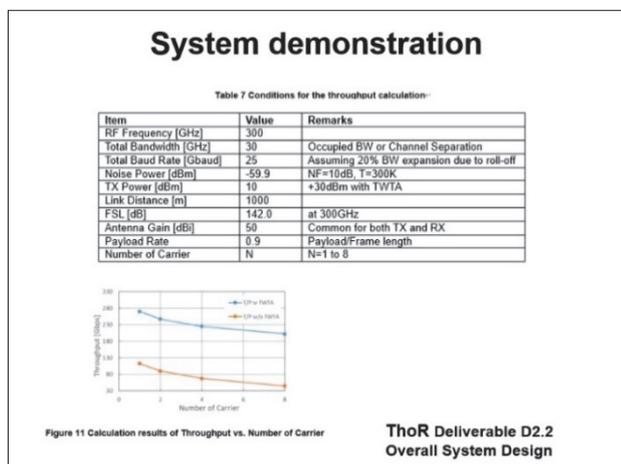


スライド 28

実際のデータをできることが特徴で、ネットワークインタフェースを持っているということです。実現できたのは、すでに開発が終わってほぼ完成している、もしくはすでに市販されている E バンド、V バンドのシステムを、IF 信号として使っているためです。E バンドのシステムは、イスラエルのシクルがすでに商品化しているものを利用しています。V バンドは、日本の HRCP (High-Rate Close Proximity: 高速近接無線技術研究組合) さんのシステムです。

これらをモデムとして、IF 信号として束ねていきます。過去のミリ波のシステムをたどってみると、やはり開発当初はこういう形が多かったですね。まだ市場が小さい高周波数の装置にいきなりベースバンドを用意するのも難しいので、既存のシステムの装置を IF にして束ねて FDM (frequency-division multiplexing) します。

スライド 29 は、スペックの例ですね。



スライド 29

スライドをすべて見ていると時間が足りなくなりそうですので、もしご興味があれば ThoR のプロジェクトのデリバブル 2.2 の中で公開されていますのでご覧ください。簡単にお話すると、トータル帯域幅を 30 GHz 取るとリンクのディスタンスは 1 km でした。アンテナは少しごついのを使っていますね。

伝搬のことも、いろいろとやっています。雨や風の影響を実際の新宿と、ベルリンとハノーバーのモデルを使って研究し、どういう配置にしたらいいかを検討しています。

THz antennas, propagation and interference studies

- Evaluation of THz antennas and propagation
 - Measurement of THz antenna patterns
 - Propagation experiments with 300 GHz wireless links
- Deriving planning guidelines for 300 GHz BHFH links
- Sharing investigations with passive services, development of interference mitigation techniques
 - Simulation of THz propagation for sharing study

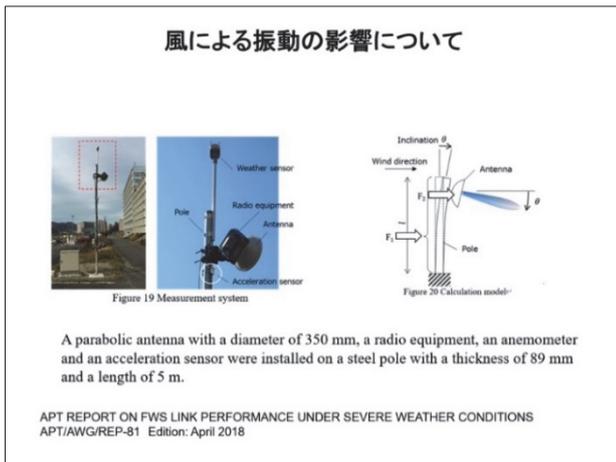
千葉工業大学
CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Technische Universität Braunschweig

Evaluation of THz wave propagation
Evaluation of interference with other base station

スライド 30

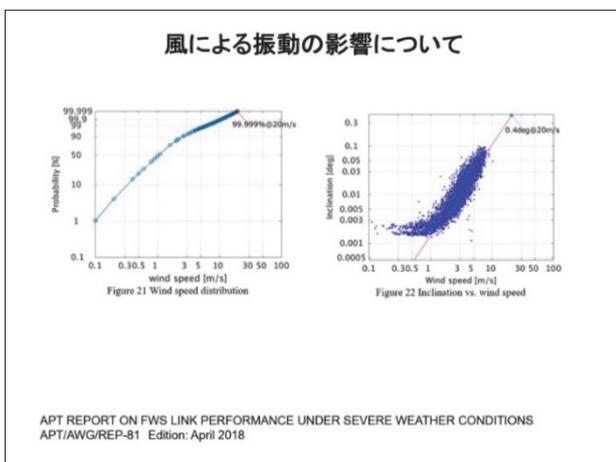
今日の資料には付けていませんが、実は私が学位を取るときの研究が散乱でした。平面の平坦性がある程度維持されている所にわずかな凸凹があると、いろいろ面白い現象が起きるんです。レーダーの世界では海面のクラッターなどで知られていましたが、反射のような、散乱のような現象が起きます。そうした現象を光でいろいろ実験して試していたのですが、当時は理論先行で、しかもその理論にあった現象って意外となかったんですね。でもテラヘルツになってくると、そういうものが回りにたくさんある状態になると思います。波長の 1 桁を切るぐらいの構造物が、平らな所に張り付いているようなものです。私たちの衣服も、繊維で多分 50 ミクロンとかそれぐらいだと思います。テラヘルツ波と言っても 100 GHz から 300 GHz ぐらいが中心だとすると、ちょうどそういう関係になっていますので、光に対して蝶の羽がきれいに見えるのと同じようなことが、コヒーレントなテラヘルツが用意されるとどんどん起きてくるのではないかと期待しています。私の興味の範囲であり、蝶の羽のようにキラキラしたからといって何の役に立つかは分かりませんが、そういったことも面白いのではないかと考えています。

風の影響については APT (Asia-Pacific Telecommunity: アジア・太平洋電気通信共同体)^{注 5} という標準化の組織で調べています。スライド 31 はそこで公開されている報告書です。



スライド 31

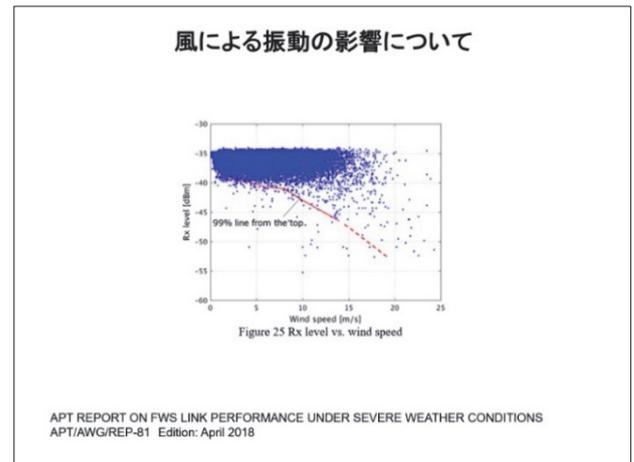
E バンドの装置を置いて、風を測りながら、リンク状態との相関を取っています。スライド 32 は、風と傾きの関係です。



スライド 32

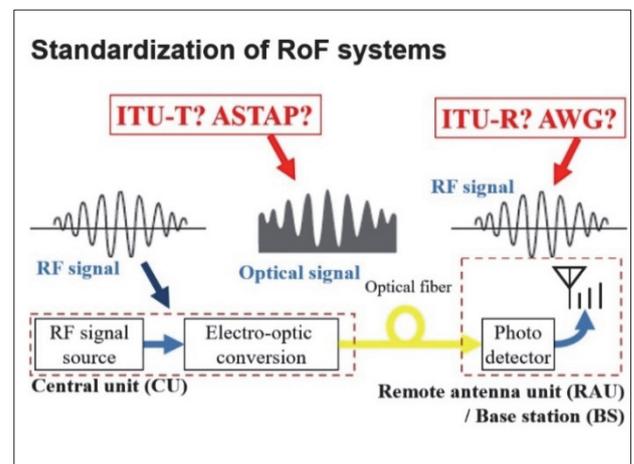
風速 20 m/s の場合、0.4 度ぐらい傾く予測が出ています。99.999%の可用性を求めると、だいたい風速 20 m/s に耐える必要があります。0.4 度でどれだけロスするかはアンテナパターンから計算でき、だいたい 4 dB のマージンが必要になります。今、この勧告を作る活動を進めています。

スライド 33 は、さらに短時間の影響を詳細に調べたものです。



スライド 33

標準化の話をしします。



スライド 34

アンリツさんにもいろいろご協力いただいて標準化の活動をしています。今でこそファイバー無線の標準化はそれなりに認知されていると思いますが、最初はなかなか難しいものがありました。縦割りは日本だけではなく、世界中どこでもあります。当たり前ですが、電波規制当局と光を研究している組織のカルチャーはかなり違います。カルチャーがかなり違うのは仕方ないことですが、ファイバー無線システムの標準化はどちらでやるのかは気になります。

とはいえ、標準化では切り分け論は必要です。混乱せずにどうやってうまく連携していくかがポイントでしょう。RoF がネットワークになってくると電波の管理も難しくなると思っています。例えばファイバーの中に完全にデジタルのチャンネルも WDM で入ってくると、デジタルの部分の部品を替えると電波の質に影響がないとは言えない。そのときどうするかですね。今のファイバー無線システムは独立したシステムです。例えば成田空港のシステムであればシステム全体で免許をもらえばいいわけです。しかし、実際にネットワークに入ってきた場合はどのように免許を与えるかも大きな課題でし

う。いい加減なことをして干渉が起きまくるのも問題ですが、逆に干渉を回避するためにネットワークをダイナミックに使うという話も出てきています。ネットワークがあるからこそ、そんな厄介なこともあるのではないかと考えています。

注5: APT(Asia-Pacific Telecommunity):アジア・太平洋電気通信共同体:アジア太平洋地域の電気通信網計画の完成の促進とその後の有効的な運営を図るための地域的機関

5 おわりに

最後に、これから何が起きるか、何に使いたいかを申し上げたいと思います。

6G の話をすると、まず「何に使うのか」と問われます。これは個人的な経験に基づく私見なのですが、現状は人とコミュニケーションするには容量が全然足りないと感じています。この講演もそうですが、私からは皆さんの顔が見えないんですね。大学ではずっとオンライン授業で、いち早くもとの形に戻すべきだとの声もあります。ただ、学生の側からは、いろいろとメリットを感じているようです。授業を巻き戻して見られるとか、大学に行かなくて良いとか。

授業をする側にとって困るのは、学生の顔が見えないことなんです。先生にもよるとは思いますが、聞いている人の顔を見ながら、話の内容を調整しているんですね。学生さんには悪いですが、「この子はほとんど寝ていて、こういうときだけ起きる」とか、「この子はずっと起きていて」とか、いろいろなタイプの学生を見ているわけです。講義を3、4回もすれば、それぞれの個性がなんとなく分かってきますので、彼らをちらっと見て、例えば難しい話をしているときに「1番ついてこられるはずの子がついてこない」と感じたら、講義のレベルを調整するわけです。それをわざわざクリックして、「あなたはどうか」と聞いては授業になりません。これが「学生も授業を作っている」ということだと、まさに実感しましたね。この講演も皆さんの顔が見られたら、もう少し話の内容を皆さんの希望に合わせる事ができたかもしれません。

実は教員の側にこそ、膨大な量の情報が必要になるんです。8Kでは足りないかもしれません。ぱっと注目したら、その子の表情が見えるようなシステムを作らないとだめですね。学生側は自分の画面全体に資料が表示され、先生の顔がちょっと映っていれば受けとる情報としては十分です。しかし、授業を作り上げるためには全然足りないんです。エンターテインメントをしている方々も、同じように感じているのではないのでしょうか。

学会でも、終わった後にオフラインで話をする際に、ちらっと誰が

いるか見て、どんなテーマで盛り上がっているのか推測して入っていったりします。いろいろなツールは出てきていますが、まだまだ情報量は足りないと感じます。もっともっと情報量を増やす必要があります。

後は、今までも言われてきたことではありますが、自動運転や健康にとって、6Gは重要ですね。

インフラ向けでは、コンディションベースドマネージメント(CBM)でしょうか。要は「壊れかけたら直す」ということです。ポジティブな言い方をすると、常に検査しているわけですね。定期検査ではなくて、検査し続けているから、例えば車検が要らなくなるような世界です。そういうものをやろうとすると、非常に膨大な量の情報を扱う必要が生じます。先ほど電波天文台の例を出しましたが、常に観測したり、測定したり、検査したりが、身近になってくるでしょう。

そういった分野で6Gが使われると、基地局の数が人口を超えるようになるとよく話しています。照明器具で照らすのと同じぐらいの距離で電波を飛ばす時代など、来ないかもしれません。しかし、少なくとも研究者や開発者はそこを目指す必要があるのではないのでしょうか。そうしないと、電気通信の世界で新しいハードウェアは生まれてこないのではないかと考えています。

まとまらない話で申し訳ありませんが、以上です。ありがとうございました。

参考文献

- 1) GSMA, Reaearch Report, Moble backhaul options Spectrum analysis and recommendations, September 2018

講演者紹介



川西 哲也 (かわにし てつや)

- 1992年 京都大学 工学部 電子工学科卒業
- 1994年 京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻
修士課程修了
- 1994-1995年 松下電器産業(株) 生産技術研究所勤務
- 1997年 京都大学大学院 工学研究科 電子通信工学専攻
博士後期課程修了
- 1997-1998年 京都大学 ベンチャービジネスラボラトリー
特別研究員
- 1998-2015年 通信総合研究所
(現国立研究開発法人 情報通信研究機構)勤務
- 2015年-現在 早稲田大学教授