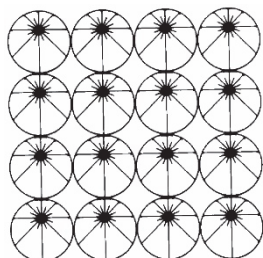


講演録



6G とその先の社会： NICT の研究成果と未来の通信技術

情報通信研究機構 (NICT) ネットワーク研究所 研究所長

原 井 洋 明

本講演録は、2025 年 7 月 10 日・11 日開催のアンリツ テクノプラザ 2025 で実施された特別講演の内容をもとに、編集事務局が加筆・整理して掲載したものです。

1 はじめに

情報通信研究機構 (NICT) の原井です。まずはアンリツ様の創業 130 周年、誠におめでとうございます。この場で NICT の研究成果と未来の通信技術についてご紹介する機会をいただき、大変ありがとうございます。

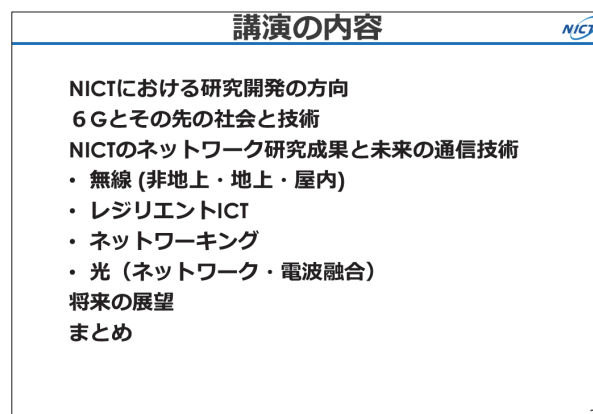
本日は「6G とその先の社会」というタイトルで NICT の研究成果と未来の通信技術について、どのようなものを開発し、どういう方向を目指しているかをご紹介します。



スライド 1

本日の講演では、まず NICT における研究開発の方向性について、ネットワークだけでなく全体としてどのような取り組みを行っているかを簡単にご紹介します。次に、私たちが「Beyond 5G」というキーワードで呼んでいる 6G, そして 7G へと向かう中で、私たちの社会がどのように変化し、それを支えるためにどのような技術が必要とされるのかについてお話しします。その後、私が研究所長を務めるネットワーク研究所の具体的な研究成果、すなわち「無線通信」、障害からの回復を可能にする「レジリエント ICT」、さまざまなも

のをうまくつなぎ合わせて情報を提供する道を作る技術としての「ネットワーキング」、そしてネットワークや電波と融合して使われる「光技術」の各分野で、どのような未来の技術が生まれつつあるのかをできるだけ分かりやすく説明します。最後に、これらの研究開発を踏まえた将来の展望を述べ、まとめします。



スライド 2

2 NICT における研究開発の方向

NICT には戦略 4 領域があります。30 秒程度の動画にまとめてありますのでご覧ください。

(動画上映)

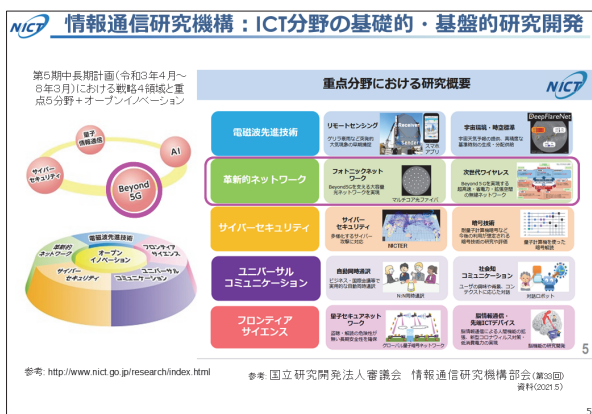
「これからの未来を作る。私たち NICT は、Beyond 5G, AI, 量子情報通信, サイバーセキュリティをはじめ、心を動かす次世代の研究と技術開発で、感動とワクワクの未来を作っていきます。」



スライド 3

「心を動かす」研究というのはなかなか緊張する言葉ですが、動画にありました 4 つの戦略領域、すなわち「Beyond 5G」「AI」「量子情報通信」「サイバーセキュリティ」を支える形で 5 つの重点分野を定めて研究開発を推進しています。具体的には「電磁波先進技術・リモートセンシング」「革新的ネットワーク」「サイバーセキュリティ」「ユニバーサルコミュニケーション」「フロンティアサイエンス」です。

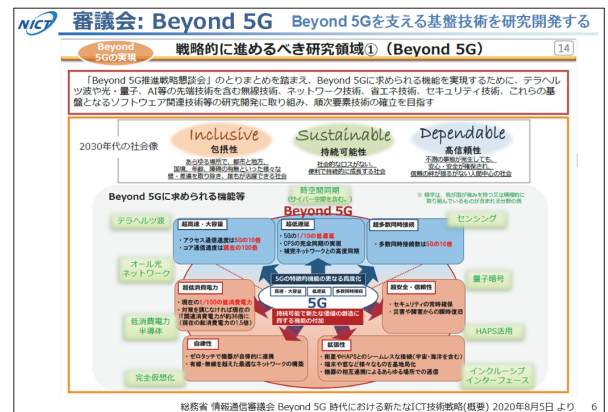
電磁波先進技術・リモートセンシング分野ではさまざまな量をセンシングする技術を開発しています。サイバーセキュリティ分野では日本国内のコンピュータに対する海外からの不正アクセスを試みる動きをリアルタイムで可視化する「NICTER」というシステムを構築・運用しています。また、ユニバーサルコミュニケーション分野では AI を活用した多言語音声同時通訳システムを開発し、国際会議などで実用化を進めています。また、フロンティアサイエンス分野として量子通信も研究しています。そして、私たちの研究所が担当しているのが、「革新的ネットワーク」の研究開発です。



スライド 4

なぜ私たちがこの分野に注力しているかと言いますと、もちろん前から通信やネットワークの研究を続けてきたという歴史的経緯もありますが、最も大きなきっかけとして総務省の情報通信審議会から「Beyond 5G の研究開発を戦略的に進めていくべきだ」という答申

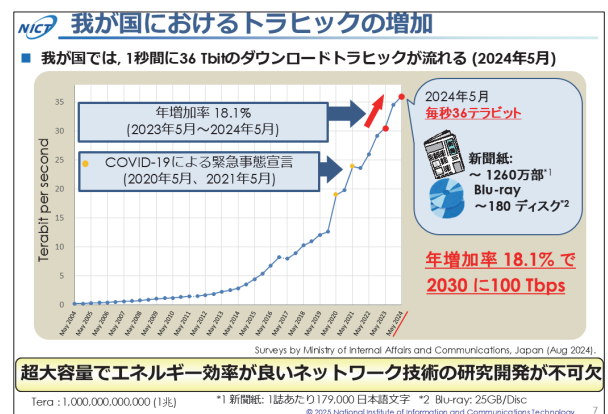
が出されたことが挙げられます。この答申では 5G が掲げた「高速・大容量」「低遅延」「多数同時接続」という 3 つの特徴をさらに高度化させるとともに、それに加えて「自律性」や「拡張性」など、ここに示された 7 つの項目をキーテクノロジーとして 5G を根本から超えていくような研究開発を進めるべきだとされています。私たちは国が掲げたこの大きな方針に基づいて研究開発に取り組んでいます。



スライド 5

大容量通信がなぜ必要かについて、具体的にどれだけのデータトラフィックがあるかという観点から見てみましょう。総務省のデータによれば、2024 年 5 月時点で日本国内のダウンロードトラフィックは毎秒 36 テラビットに達しています。半年ごとにプロットしていくと、年増加率 18.1%という驚異的なペースで伸び続けています。COVID-19 の緊急事態宣言下にあった時期でさえ着実に増加し、現在では新聞に換算すると約 1260 万部を超えるデータが 1 秒間に流れている状況です。

このペースで増加すると、2030 年には 1 秒間に 100 テラビット、2040 年にはさらにその 10 倍以上のデータが流れることが予想されます。そのため、大容量でエネルギー効率の良い、1 ビットあたりの消費電力を削減するネットワーク技術の研究開発が不可欠となっています。

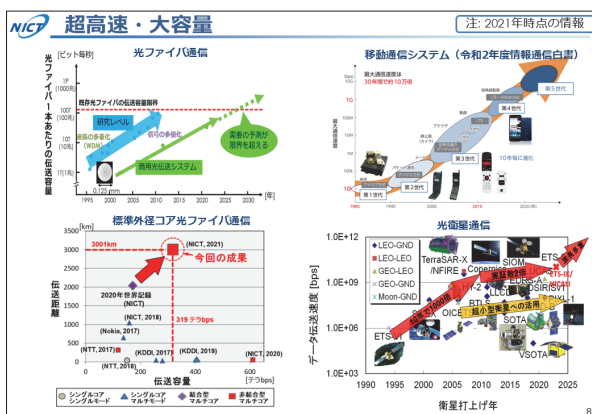


スライド 6

大容量通信を実現するための技術として、まず光ファイバ通信があります。現在、光ファイバ通信では1本のファイバで伝送できる容量は毎秒 100 テラビットが限界とされてきましたが、需要の予測はその限界をはるかに超えようとしています。そこで、「マルチコア」という新たな技術を用いた光伝送の研究開発を進めています。

無線通信においては、世代が進むにつれて必要な通信容量は増加し続けています。第4世代、第5世代では1ギガビット、10ギガビットというデータ通信が必要になっています。

後ほど詳しく説明しますが、衛星通信への光技術の導入も重要な取り組みです。NICTでは約30年にわたって取り組んでいます。衛星の数が増加し、通信容量も増えています。1本のチャンネルの速度が向上するだけでなく、波長を束ねて多重化することで容量を増やす動きもあります。また、従来のように1トンを超える大型衛星だけでなく、小型衛星を多数打ち上げて活用し、面としてネットワークを提供する動きも活発化しています。



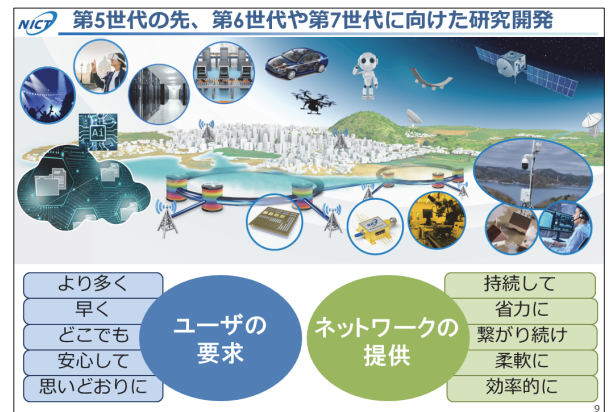
スライド 7

こうした状況の中、私たちは第5世代の先である第6世代、第7世代に向けた研究開発を進めています。私たちの基本的な目標はネットワークを使いたい人がしたいことに確実に応えていくことです。これは世代が変わっても不変ですが、要求される数値の大きさが世代ごとの違いとなります。

ユーザの要求は普遍的で、「より多くのデータを送りたい」、「より速くデータを届けたい」、「どこでもデータを配信したい」、「どこからのデータでも受信したい」、「安心してネットワークを使いたい」、「思うままに使いたい」という要求は変わりません。

これに対してネットワーク側は、技術革新により部品を更新しながら快適な環境を提供し、省力化を進めて運営コストを削減して、継続的な接続性を確保する必要があります。ユーザの要求に見合った回線を提供する必要がありますが、要求されるまま設備を増強してはコストが膨大になるため、ネットワークを仮想的に切り貼りし、

動的に資源を割り当てるような効率的な運用も不可欠です。



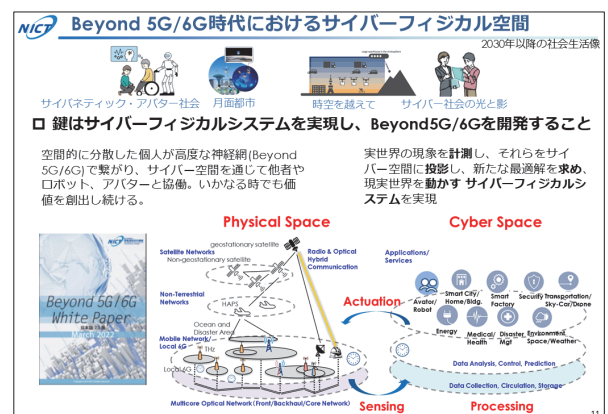
スライド 8

3 6G とその先の社会と技術

では、こうした背景のもと、具体的にどのような未来社会が描かれるのでしょうか。NICTは2021年にBeyond 5G/6Gに関するホワイトペーパーを公開しました。その中で私たちは、未来社会の鍵となるコンセプトとして「サイバーフィジカル空間」を高度に活用する世界を提唱しています。

これにはサイバネティックアバターで遠隔ロボットを制御して人の代わりにする技術、これを使って月面都市を作ったり、時や場所を越えてさまざまな形態のコミュニケーションを実現したりする技術が含まれます。また、このようなサイバー社会で生まれる新たな脅威にも対処します。そうしたシステムを実現するために、Beyond 5G/6Gを開発するというのが私たちの主張です。

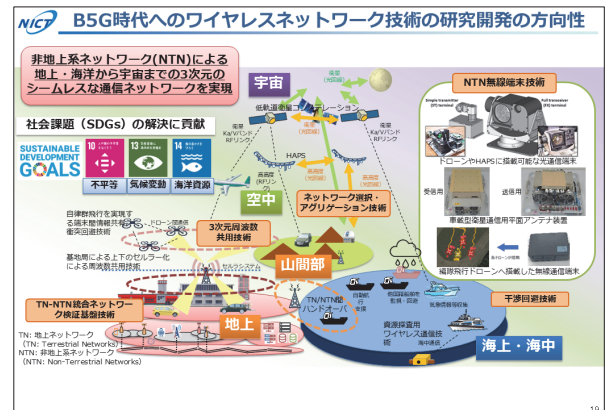
フィジカル空間(=現実世界)で起こっている現象、例えば車の動きや天気の変化などあらゆるものをセンシングし、それをサイバー空間に投影して最適解を求め、それによって現実世界を動かしていく。そうした「サイバーフィジカルシステム」を実現するために必要な通信やネットワーク技術の研究開発を行っています。



スライド 9

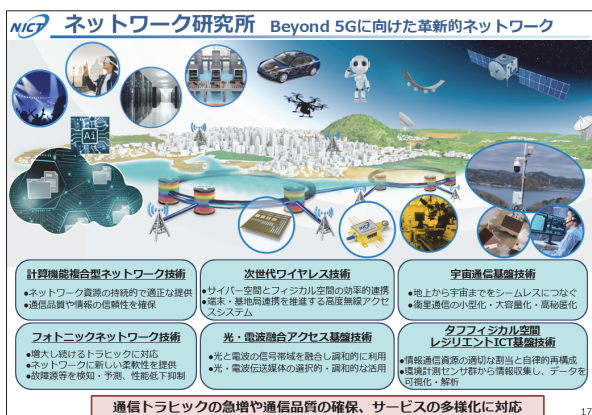


スライド 13



スライド 15

主要な研究テーマは、データ流通に AI の計算機能を組み合わせる「計算機能複合型ネットワーク技術」、地上中心の無線技術「次世代ワイヤレス技術」、地上から宇宙までシームレスにつなぐ「宇宙通信基盤技術」、光通信を高度化する「フォトニックネットワーク技術」、光と電波をアクセス系で融合する「光・電波融合アクセス基盤技術」、災害時など環境変化にも対応するネットワーク「タフフィジカル空間レジリエンス ICT 基盤技術」です。こうした研究開発によって、通信トラフィックの急増やサービスの多様化に対応していこうと考えています。

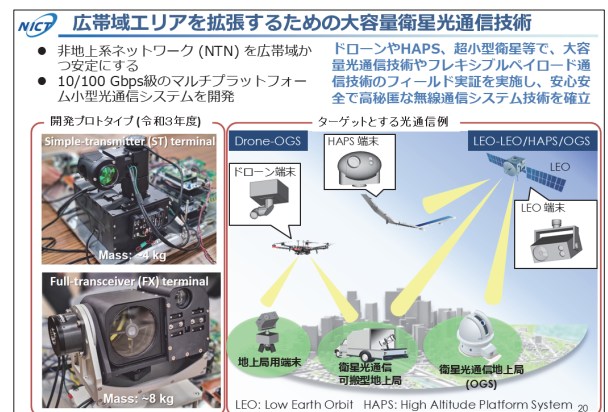


スライド 14

4.1.1 [非地上] 非地上系ネットワーク (NTN) に向けた光空間通信

低軌道衛星の増加に伴い、衛星の大量生産時代が到来しています。NICT では、機器を共通化・汎用化して衛星光通信を普及させるため、小型の光送受信端末の研究開発を進めています。

プロトタイプは 10 キログラム以下で、HAPS (高高度プラットフォーム) という航空機の 2 倍の高度を飛行する飛翔体、LEO (低軌道周回衛星)、ドローンなど、マルチプラットフォームに搭載可能です。これらの光通信端末により、空のネットワークの大容量化を実現し、3 次元ネットワークの拡大を目指しています。

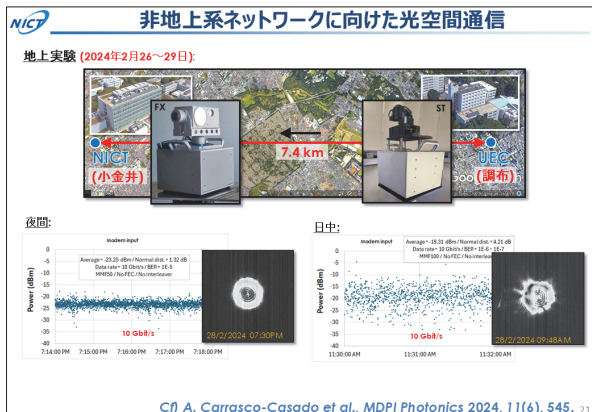


スライド 16

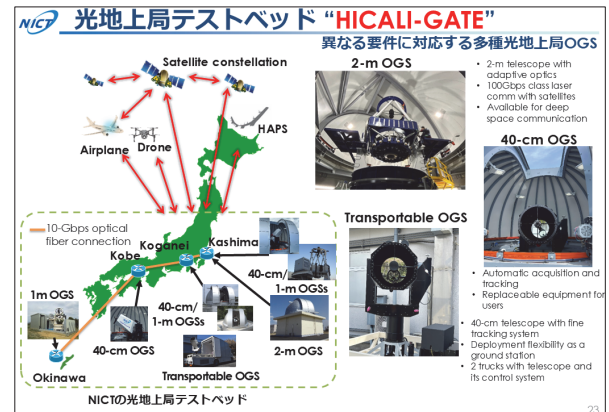
4.1 無線ネットワーク技術 (非地上, 地上, 屋内)

それでは無線のネットワークを、非地上系ネットワーク、地上系ネットワーク、屋内ネットワークの 3 つに分類して研究例をご紹介します。

将来的には HAPS や非静止衛星と地上との通信を視野に入れているのですが、大気中で光空間通信をすると信号が揺らぎます。この影響を確かめるために、2024 年 2 月に東京都内で約 7 キロメートルの距離で実証実験を行いました。毎秒 10 ギガビットの信号伝送において夜間は安定的に、また日中も若干の受光信号強度のばらつきはあるものの信号伝送が可能であることが確認できました。高度 20 キロメートルの HAPS と地上との通信を想定し、大気の揺らぎは地表付近で大きいことを考慮して、地表の 7 キロメートル程度の伝搬で模擬実験を行ったものです。



スライド 17



スライド 19

昨年のワイヤレス・テクノロジー・パークでは、同じ機材を用いて約 2 メートルの距離で 10 ギガビット毎秒の映像伝送実験を行い、3 日間実演しました。現在、この技術を段階的に空中プラットフォームへ搭載する準備を進めています。



スライド 18

4.1.3 [地上] サイバー空間とフィジカル空間を効率的に連携する無線システム評価技術

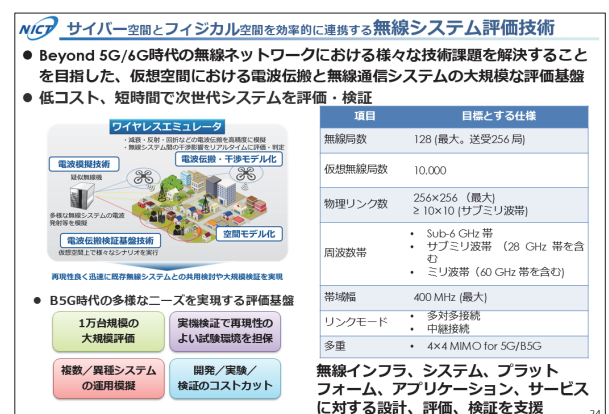
先ほどご紹介したサイバーフィジカルシステム (CPS) の実現に向けて無線通信システム評価技術の研究開発を進めています。低コスト・短時間で次世代システムを評価・検証するため、実際に無線システムを設置してサービスを提供する際の手間を大幅に削減する取り組みを行っています。

従来は、簡易的な電波伝搬モデルを使った評価やさまざまな条件での評価を行った上で試験局を申請し、人手をかけてさまざまな場所に機器を設置して評価するという手順を繰り返す必要がありました。これをモデルの精緻化と計算機内での検証により、設置回数を最小限に抑えるような無線システム評価技術の研究開発を行っています。現在のところ、ワイヤレスエミュレータや電波エミュレータという技術により、100 を超える無線局への対応や、コンピュータ上での 1 万規模の仮想無線局構築が可能になりました。

4.1.2 [非地上] 光地上局テストベッド “HICALI-GATE”

総務省から令和 3 年度の補正予算をいただき、光地上局 (OGS: Optical Ground Station) の整備を進めています。茨城県鹿嶋市の NICT 拠点には、私たちの背丈を超える直径 2 メートルの光学系 (主鏡) を持つ OGS を設置しました。また、小金井、神戸、沖縄には直径 1 メートルまたは 40 センチメートルの OGS を設置し、さまざまな場所で衛星や HAPS の信号を受信できる環境を用意しています。

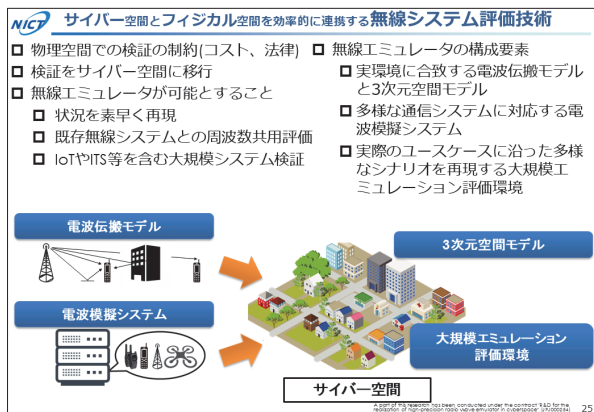
さらに、トランスポータブル OGS というトラックに搭載可能な移動型地上局も開発しました。これにより、信号を受けたい場所まで移動し、例えば小金井から都心まで移動して信号を受け、そこから地上のネットワークを経由してサービスを提供するような実験も可能になっています。



スライド 20

このように物理空間での検証の制約をサイバー空間での検証に移行することで、時間とコストの大幅な削減を実現しようとしています。そのためには電波の伝搬モデルを精緻化する必要がありますので、さまざまな場所で測定を行い、それに合わせたモデルを作成し

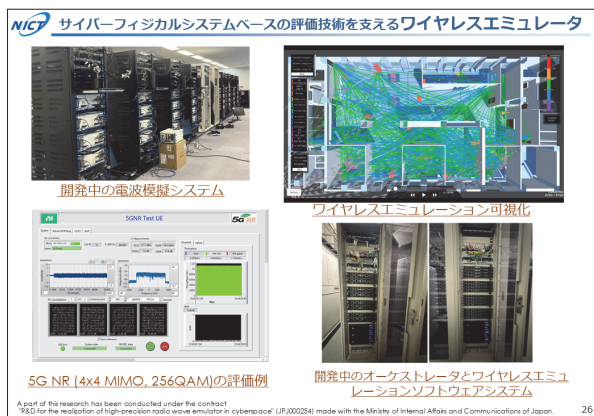
ています。3次元空間モデルでは、ビルや反射の多い建物などの環境をコンピュータ内に再現しています。



スライド 21

USRP (Universal Software Radio Peripheral) というソフトウェア無線モジュールを用いた電波模擬システムや、Linux サーバー上での再現環境を構築しています。

実験結果として、5G NR (New Radio) の 256QAM 評価を実現し、コンステレーションを確認できるようになりました。また、ビルフロアでのデータ転送シミュレーションでは、メガビットから 10 メガビット級のデータ転送を可視化し、人とアクセスポイント間の電波強度をリアルタイムで模擬しながら最適解を見つけることが可能になっています。



スライド 22

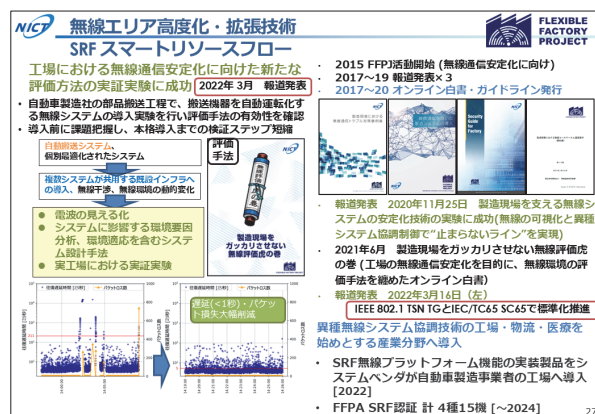
4.1.4 「屋内」無線エリア高度化・拡張技術 - スマートリソースフロー (SRF)

工場や建物内の無線通信の高度化を目指し、「スマートリソースフロー (SRF)」技術の研究開発を約 20 社と共同で進めています。屋内の無線通信環境では、持ち込み機器を禁止することで、ある程度きれいな電波環境を作ることには可能ですが、障害物があるために想定どおりの環境を作れないことがあります。そうした場合に、アクセスポイントや機材を最適に配置することで思いどおりのデータ

通信を実現する研究です。その研究成果として、無線レイアウトの配置方法やトラブル対処法をまとめた資料を公開し、世の中の役に立つような取り組みも行っています。

スマートリソースフローの具体的な成果としてスケジューリングの最適化により遅延時間のばらつきを大幅に削減することに成功しています。従来は遅延が大きくなる時間帯がいくつも存在していましたが、適切なスケジューリングにより安定した通信を実現できるようになりました。

これらの技術は IEEE や IEC での標準化活動を通じて、安定化技術として広く利用されることを目指しています。



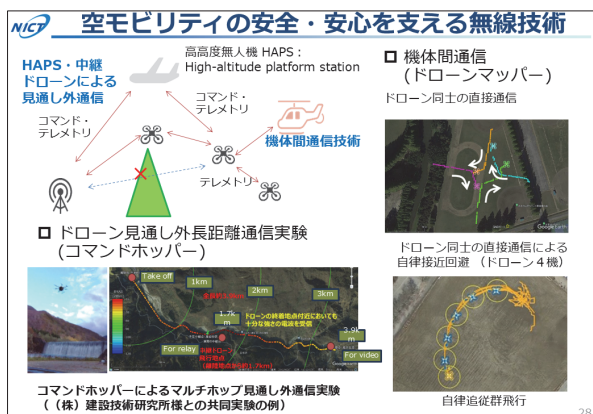
スライド 23

4.1.5 「非地上」空モビリティの安全・安心を支える無線技術

私たちはモビリティの安全安心を支える無線技術としてドローンの安定した飛行を支えるドローン間通信技術の研究開発も行っています。基地局とドローン間で山を越えると見通し外になり、4G/5G の電波も届かない場所が存在します。そのような環境においては、中継ドローンを配置してマルチホップ通信を行い、通信範囲を拡大する取り組みを進めています。

さらに、ドローン同士の直接通信により、ぶつかりそうになったら避けたり、複数のドローンが一つのドローンに追従して群飛行したりといった協調動作を実現しています。

実証実験では見通し外になる位置関係で 2 キロメートルずつ離れた地点にドローンを配置し、ダムの撮影映像を中継伝送しました。地上との通信に頼らず、機体同士の通信により、電波が届かない場所でも危機回避や効率的な物資輸送を可能にすることを目指した研究開発です。



スライド 24



スライド 25

4.2 レジリエント ICT

通信が困難な場所や状況下でもネットワーク通信手段を確保するための「レジリエント ICT」技術の研究開発も進めています。

4.2.1 タフフィジカル空間レジリエント ICT 基盤技術

大規模災害時でも通信手段を確保するため、タフな物理環境下におけるレジリエント ICT 基盤技術の研究開発を進めています。東日本大震災から 14 年が経過しましたが、そのような大規模災害時でも、建物が壊れて人が立ち入れない場所でも通信を活用した作業ができる環境づくりを目指しています。

協調型ロボットサービスでは、安全な場所から人が出した指示に従い、ロボットが協調してサービスを提供します。電波が届かない場所にロボットが行ってしまうと作業ができなくなるため、電波のある場所を予測して移動指示を出し、電波状況のデータを作成しながら作業を進めます。もし一度通信が途切れても、別のロボットが近くまで行って通信を回復させることも考慮しています。目指しているのは、**make before break** (通信が切れる前に別の経路を確保) です。

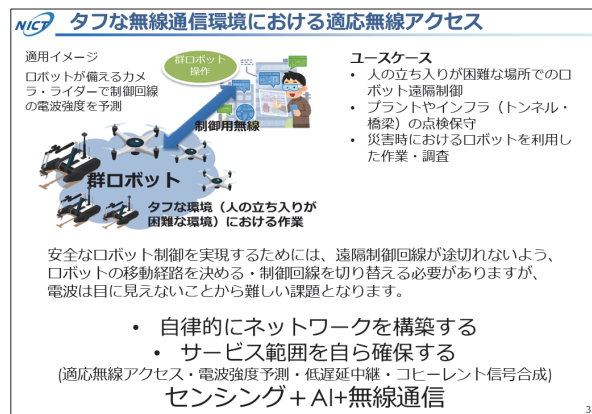
この他にも、火山などの異常な動きをカメラで捉え、無線通信で伝送して解析する「映像 IoT 技術」や、インフラサウンド (人が聞こえ

ない低周波音)を検知し、気圧の変化から地殻変動を察知して地震や津波の早期発見を目指す「レジリエント自然環境計測技術」などを研究しています。



スライド 26

レジリエント ICT の活用場面としては、プラントやトンネル、橋梁など、人の立ち入りが困難な場所でのロボット遠隔制御によるインフラ点検・補修を目指しています。そのためには、限られた環境で自律的にネットワークを構築し、不要な場所にロボットが行かないようサービス範囲を確保する必要があります。そのために、状況をセンシングし、AI 技術により最適なネットワークを構築して無線通信を実現する取り組みを進めています。

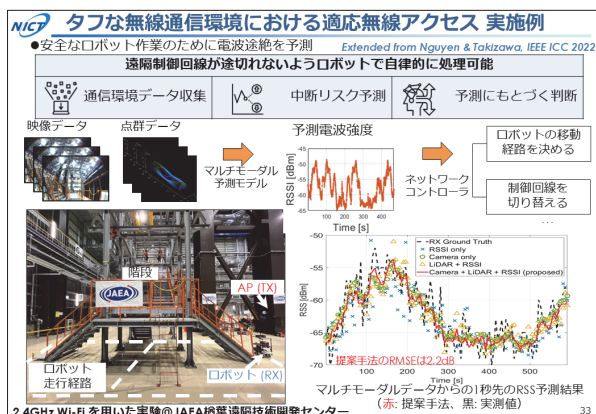


スライド 27

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の樹葉遠隔技術開発センターでの実験では、階段近くの反射が多い複雑な環境でも通信の確立に成功しました。ロボットからの映像データや LiDAR で撮った点群データを無線通信で別の場所に送り、そこで解析して動作指示を出すシステムを実証しています。

そのために必要となるのが「予測電波強度」です。右側に複雑な図がありますが、右下のグラフで赤い線が予測結果を示しています。その他の線はカメラのみなどによる結果です。黒い波線は実測値ですが、予測結果はそれと大きく変わらない、あるいは、カメラのみ

の場合よりもしっかりと予測できていることが分かります。現在はこのような実験を通して手応えを感じているところです。



スライド 28

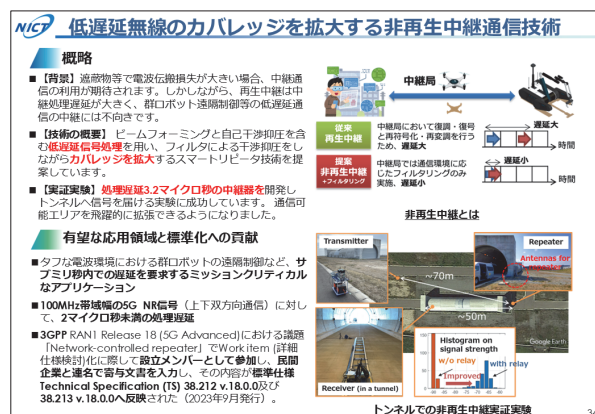
4.2.2 低遅延無線のカバレッジを拡大する非再生中継通信技術

「タフフィジカル」という要素の中に、もう一つ「低遅延無線」というキーワードがあります。これは、途中で弱くなった信号を中継局で増幅する際に生じる遅延に関するものです。従来の再生中継では、いったん信号をデジタルに変換し、再びアナログに戻す処理を行うため、遅延が増えてしまいます。これに対して、すべてを非再生方式とし、デジタルに戻さずに増幅を行うことで遅延を低減します。その結果、例えば 1 ミリ秒という制約がある場合でも、通信のカバレッジを広げることが可能になります。このような低遅延化のための研究開発を進めています。

これには自己干渉抑圧を確実にしながら、低遅延の信号処理を実現する技術も含まれています。赤字で示しているように、中継処理が 3.2 マイクロ秒の中継器を開発した事例や、5G NR 信号において 2 マイクロ秒未満の処理遅延を確認した事例があります。これにより、本来であれば直接通信ができないトンネル内でも、外側に中継器を設置することで通信が可能になります。しかも外側に設置するため通信距離が長くなり、その分カバレッジを広げることができます。

右下のヒストグラムをご覧くださいと、中継がない場合は横軸の電波強度が非常に小さい領域の数値（赤）が高くなっていますが、中継を行うことで電波強度がある程度高い領域の数値が増加していることが分かります。

さらに、この技術は作業や点検用途に限らず、3GPP において「network-controlled repeater」という項目があるため、企業の方々と協力して文書を作成し、標準仕様策定に向けた取り組みも行っています。



スライド 29

4.3 ネットワーキング

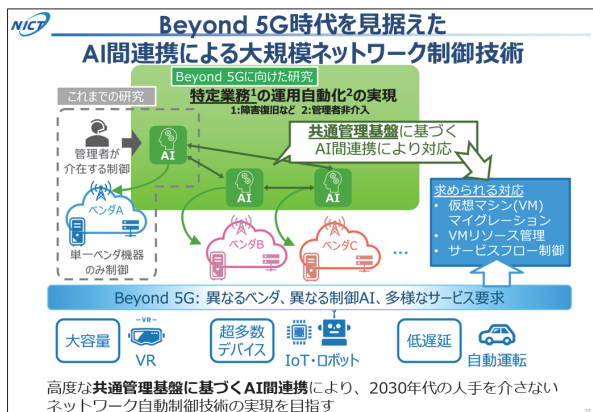
続いて、無線の話から少し離れてネットワーキングについてお話しします。

4.3.1 計算機能と AI を融合したネットワークアーキテクチャ

将来的に、ネットワークのオペレータは減少していきます。人員も減っていく一方で、IoT 機器は増加し続けています。その結果、1 人あたりが操作・監視しなければならない機器の数は膨大に増えていくという現状があります。そこで、省力化を目指して、複数の AI を組み合わせて協調作業させ、通信品質を安定させる取り組みを進めています。

安定化の一つの方法として、障害が発生したときの復旧を自動化しています。ネットワークサービスを提供する機能をコンピュータにインストールしていますが、障害時には別の場所に移す必要があります。これを事前に予測し、実際に事故が起きたときには迅速に回避する仕組みを過去のデータを見ながら適切に判断して実行します。こうした運用自動化によって、オペレータの負荷を徐々に軽減し、AI 中心の運用へと移行していくというストーリーを描いています。そして、その AI を中心に据えたオペレーションを企業の方々と共同で実施していく取り組みを進めています。

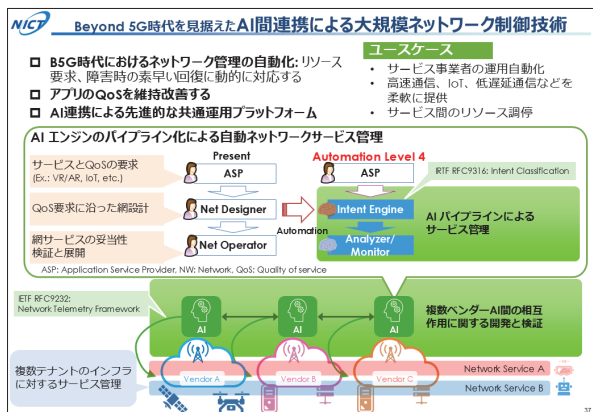
目指しているのは、5G や Beyond 5G において提供される、大容量・低遅延・超多数デバイス接続といった異なる特徴を持つ多様なサービスに対して、それぞれに最適化されたネットワークオペレーションを実現することです。



スライド 30

自動ネットワークサービス管理も重要な要素です。ここではインテントエンジンの実現が必要になります。お客さまが VR サービスや IoT サービスをやりたいと言っても、通信の詳細な要求まで指定することは困難です。組織内でもネットワークに詳しくない人から「どうにかしてほしい」という要求が多く寄せられます。そこで、人の意図（インテント）を理解してネットワークサービスにマッピングする作業を自動化する取り組みが必要だと考えています。

さらに、インテントエンジンについては IRTF (Internet Research Task Force) で標準化に向けて議論しています。また、ネットワークのテレメトリ（混雑状況、故障、機器の障害などの情報収集）についても IETF (Internet Engineering Task Force) などの場で標準仕様策定を進めています。



スライド 31

4.4 光ネットワーク・電波融合技術

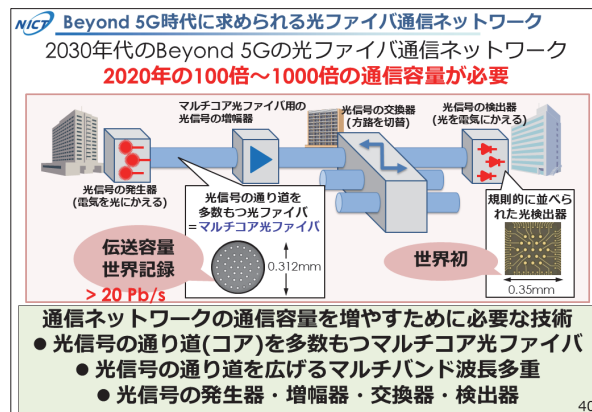
最後が光技術です。光通信技術を用いたネットワークと、光と電気、光と電波を融合する技術を紹介します。

4.4.1 マルチコア光ファイバ通信

光ファイバ通信において、2030 年には現在の 100 倍以上、さらに 2030 年代から 2040 年代にかけては 1000 倍のデータが流れると予測されています。現在の技術では対応できないため、1000

倍規模の研究開発を進める必要があります。

NICT が取り組んでいる方法の一つが、マルチコア光ファイバです。これは、からしレンコンのようなイメージで、ファイバの中に複数のコアがある構造です。それぞれのコアに別々の信号を入れることで、単純に言えばコアの数だけ通信容量を増やすことができます。受信側では、空間的に分離された信号を同時に一つのデバイスで検波して電気に戻すアレイ型検出器を開発しています。これにより、大容量化と同時に省電力化、小型化を実現しています。

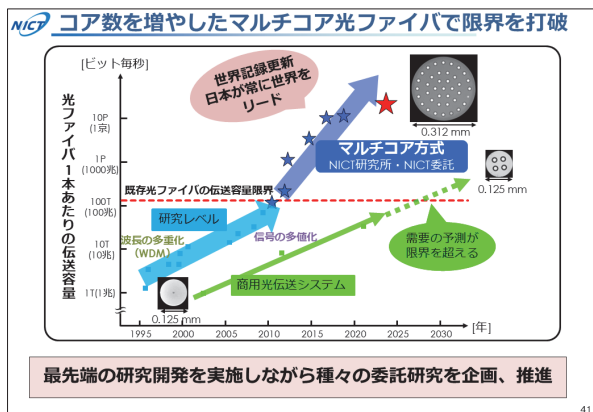


スライド 32

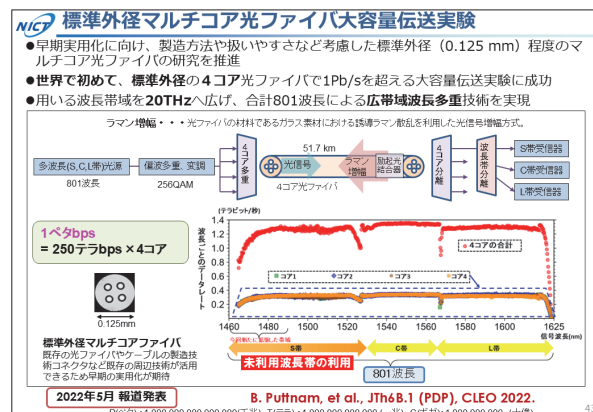
波長多重を用いた場合の光ファイバ通信の伝送容量と、商用サービスでの容量の推移を見ると、研究レベルと商用システムは徐々に差が縮まってきていますが、ある時点を超えると、1本の光ファイバで送れる限界を上回る予測になります。ファイバの中に大量かつ強力な光を投入すると、発熱によってファイバが損傷したり、人にとって安全性の問題が生じたりするため、この課題を解決する必要があります。そこで私たちは、先ほども触れたマルチコア光ファイバ通信の研究開発を進めています。

この分野では、私たちの研究所や NICT のファンディングを受けた研究者たちが、別々に、あるいは共同で研究開発を行っており、毎秒のビット数で 100 テラ、1 ペタ、10 ペタといった大きな節目の記録は日本から発信してきました。そして現在、赤い星印で示した 20 ペタの世界記録を私たちが保持しています。

ただし、この光ファイバは現在世の中に敷設されている直径 0.125 ミリメートル（125 ミクロン）のファイバよりも太く、そのため現時点では実用化に至っていません。そこで、この直径を既存の細さと同等にしながらかコアを高密度に詰め込むことで、実用化を早める取り組みを国内で進めています。



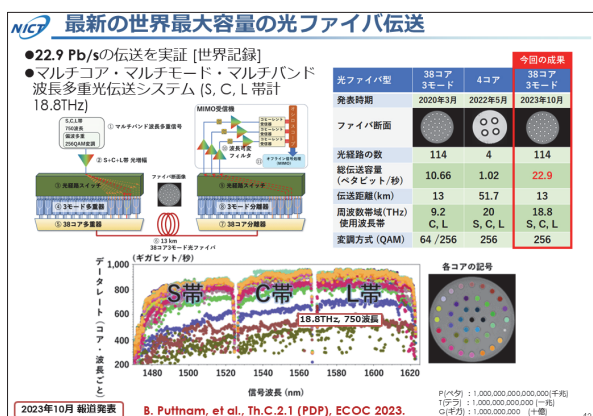
スライド 33



スライド 35

4.4.2 標準外径マルチコアファイバを用いた伝送への挑戦

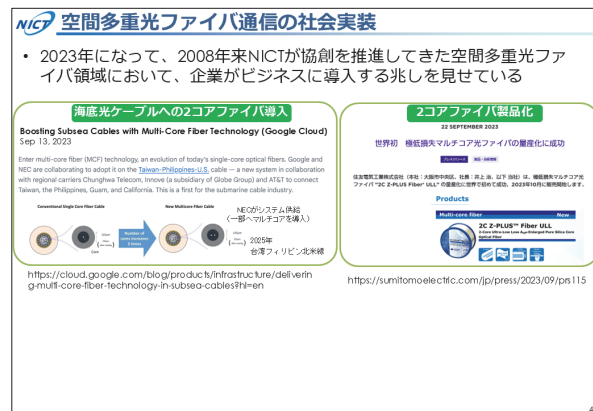
直径 300 ミクロン程度の 38 コアファイバでは、毎秒 20 ペタビットを超える伝送を実証しました。これは日本のブロードバンドトラフィック(2020 年時点で約 20 テラビット/秒)の約 1000 倍のデータ通信能力です。各コアの各波長でどれだけデータを流したかをプロットすると、38 コアで 750 波長を使用し、これらを合計すると毎秒 20 ペタビットを超える伝送が可能になります。



スライド 34

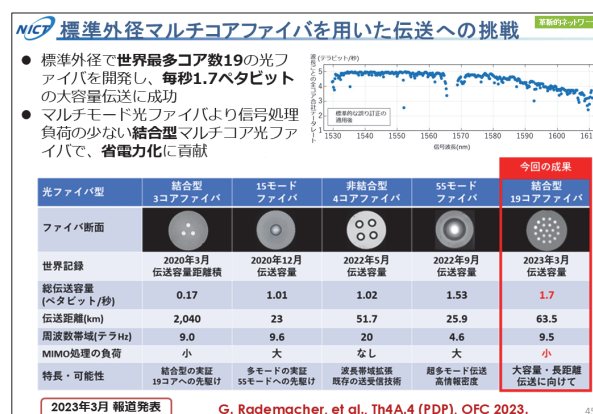
標準外径 125 ミクロンの 4 コアファイバでも、波長多重を活用して毎秒 1 ペタビットを超える大容量伝送を実現しています。これは 2020 年の日本におけるトラフィックの 50 倍の伝送を 1 本の光ファイバで実現したことになります。

企業の方々がそれぞれの技術を駆使して、実用化が進んでいる状況です。



スライド 36

4 コアファイバでは、それぞれのコア間の信号干渉がほとんどないという特徴があります。一方で、より多くのコアを詰めると干渉が起きますが、外部で信号処理を行うことで、さらなる伝送容量の増加を実現する取り組みも並行して進めています。

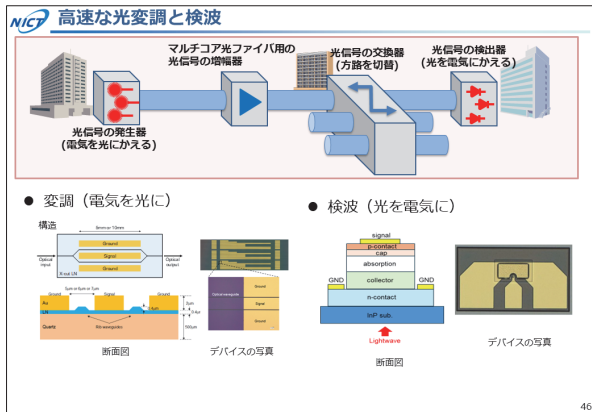


スライド 37

4.4.3 高速な光変調と検波

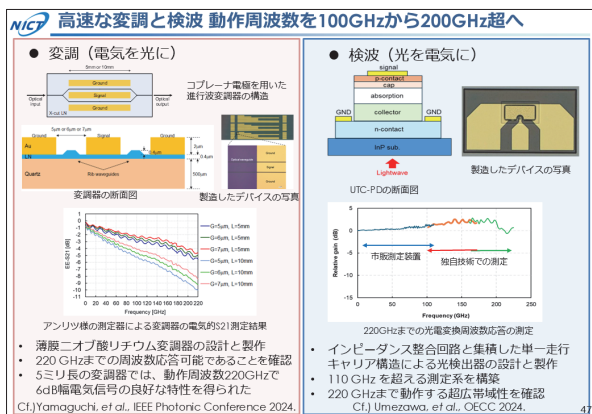
現在の光通信は、コンピュータから出てきた信号を光信号に変

換し、光ファイバ中を伝送させています。途中で信号を増幅し、経路を切り替え、端点で検波して電気信号に戻します。この過程で使用する光変調器や検波器といったデバイスの動作周波数を速くすれば、より多くの信号を流すことができます。



スライド 38

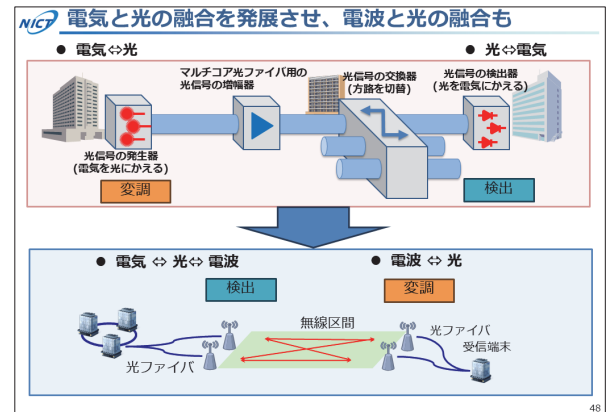
現在の商用製品は約 60GHz で動作していますが、これを 200GHz まで高速化する研究開発を進めています。光変調器についてはアンリツ様の測定器を使用して電気特性を評価し、200GHz での動作を実証しました。検波器についても独自技術により 200GHz までの検波を実現しています。自分たちで測定系を組んで確認できてはいますが、より安定な測定システムが望まれます。このような送受信デバイスの高速化により、さらなる大容量通信が可能になると考えています。



スライド 39

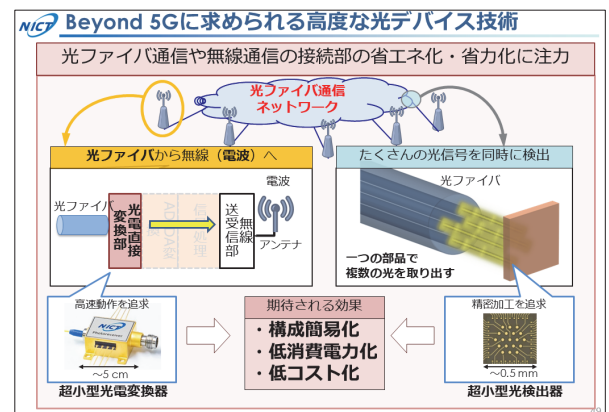
4.4.4 電気と光の融合から電波と光の融合へ

変調と検出について光ファイバを中心にお話してきましたが、途中に無線区間が挟まる場合もあります。具体的には、まず信号を検出し、電気信号を光ファイバに寄せ、さらに電波に変換し、再び光に戻すといった流れになります。このように光と電波を自在に変換・制御する取り組みを進めています。



スライド 40

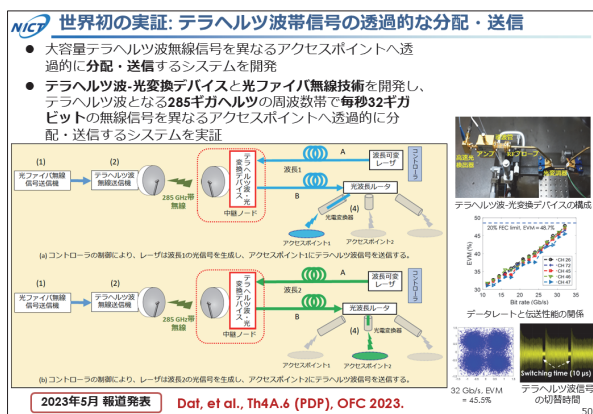
光ファイバ信号を無線に変換する方法には「デジタル処理を行わない方式」を採用しています。光電直接変換によってアナログ信号のまま無線信号へと変換することで、変換器の小型化を実現しようとしています。できるだけ多くの信号を同時に取り出す部品を内製し、構成の簡易化、消費電力の削減、コストの削減を進めています。



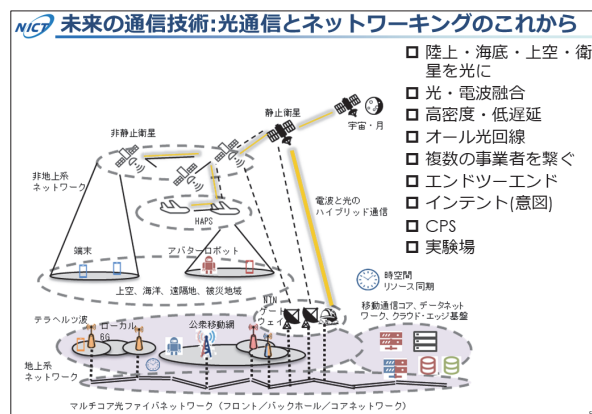
スライド 41

周波数を高めれば通信速度は向上しますが、一方で到達距離が短くなり、障害物があると通信できないという課題があります。これは 100GHz を超える場合に限らず、数十 GHz 帯でも同様です。そこで、中継区間で光ファイバ通信に切り替えて距離を伸ばして、障害物のない場所まで信号を運び、最後に電波に変換するという方法も検討しています。

光波長ルータという技術では、波長の違いにより異なる方向に信号を出力するアレイドウェーブガイドグレーティング(アレイ導波路型回折格子:AWG)というデバイスを使用しています。例えば、波長 A のときは斜め 7 時の方向に、異なる波長のときは 6 時の方向に信号を出力することで、空間的に信号を振り分ける実験を行っています。



スライド 42



スライド 43

5 将来の展望

将来の展望について、これまでお話ししてきた内容をまとめながら、今後の方向性を述べます。

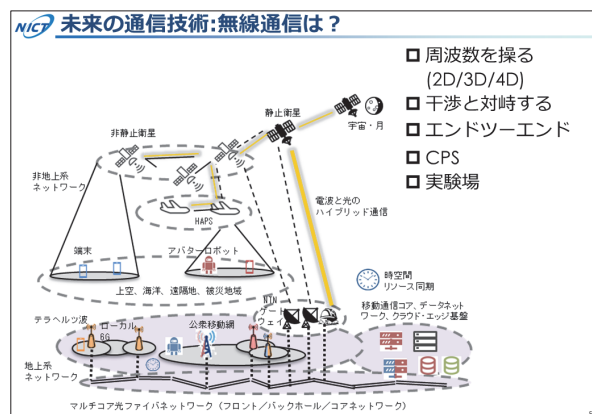
まず光通信とネットワークングについてですが、電波の技術は今後も引き続き発展させていく必要があります。その一方で、光を利用できる場面では積極的に光通信を導入していくことが重要だと考えています。具体的には、陸上や海底だけでなく上空や衛星通信にも光を適用し、最終的には「月まで通信」を目指します。また、電波との組み合わせも不可欠であり、末端部分では電波が必要となるため、光と電波を簡単に相互変換できる技術の開発が求められます。

高密度化や低遅延化も大きなテーマです。一つの光ファイバ内にできる限り多くの信号を詰め込むこと、また光ファイバよりも空間伝送のほうが早いという物理的特性を活かし、低遅延を実現することが必要です。さらに、途中で電気変換を省くことも有効です。こうした取り組みは一つの事業者内だけでは限界があるため、複数の事業者を連携させ、エンドツーエンドでネットワークを最適化していく必要があります。その際には利用者の意図を理解してネットワーク構成に反映させる仕組みを整え、サイバー空間で検証できる環境を構築することが重要です。加えて、現実世界での実験場の整備も欠かせません。

無線通信に関しては周波数の適切な運用が鍵となります。必要な場面で必要な周波数を使い分ける「適材適所」の考え方が重要です。さらに、3次元の周波数制御(地上・上空を含む空間的な周波数運用)に加え、時間軸を含めた4次元的な制御も視野に入れるべきです。

また、干渉への対応も課題です。現在は時間や場所を分けて異なる事業者が周波数を利用する仕組みですが、将来的には同一周波数を動的に共有しながら干渉を抑えつつ、双方が利用できる技術が求められます。

光と電波を組み合わせたエンドツーエンド通信は今後も変わらず重要です。ただし、この分野の実証実験は光通信以上に検証コストが高くなるため、サイバー空間を活用してコストを削減する仕組みを整える必要があります。ただし、サイバー空間だけでは把握できない課題も多いため、現実の実験場との両立が不可欠です。



スライド 44

6 まとめ

本日は、光、無線、ネットワークの領域における私たちの研究開発について紹介しました。



スライド 45

私たちの研究所だけでは実現できないことばかりですので、産業界の皆さま、学術界の皆さまとの協力をより一層強化しながら、NICTの役割を果たしていきたいと考えています。もし私たちが独りよがりな研究をしているように見える部分があれば、ぜひご指摘ください。その理由をしっかりと学び、改善しながら、私たちの役割を果たしていきます。皆さまとのコミュニケーションを通じて相互理解を深められれば幸いです。

技術の芽を確かな流れにしていくためには皆さまとの連携が不可欠です。基礎の段階から分野全体を推進していけるよう、これからも取り組みを続けていきます。



スライド 46

講演者紹介



原井 洋明（はらい ひろあき）

大阪大学大学院 基礎工学研究科 物理系情報工学分野で
博士号(工学)を取得

- 1998 年 郵政省通信総合研究所(現・NICT)に入所
ネットワークアーキテクチャや光ネットワーク、
モバイルネットワーク分野の研究開発と推進に従事
- 2008 年 NICT ネットワークアーキテクチャグループリーダーに就任
- 2011 年 同研究室長に就任
- 2016 年 ネットワーク基盤研究室長に就任
- 2018 年 総合テストベッド研究開発推進センター長に就任
- 2021 年～ NICT ネットワーク研究所長