



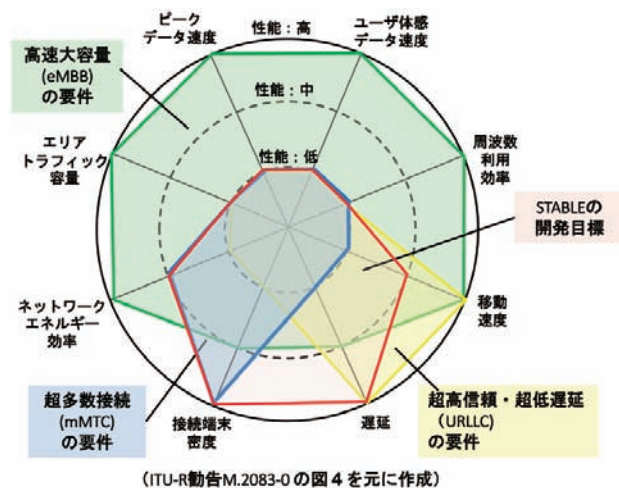
超多数接続と低遅延を実現する 無線アクセス技術：STABLE



国立研究開発法人情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク総合研究センター 研究員 **もりやま まさふみ**
森山 雅文

1. はじめに

我が国において、第5世代移動通信システム (5th Generation mobile communication: 5G)^[1]の商用サービス開始が目前に迫っている。5Gでは図1に示す利用シナリオを想定して、高速大容量通信のeMBB (enhanced Mobile Broadband)、IoT (Internet of Things) デバイス等の超多数接続のmMTC (massive Machine-Type Communications) 及び超高信頼超低遅延のURLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communications) が要件として定められている。国立研究開発法人情報通信研究機構ワイヤレスシステム研究室では、低遅延を必要とするIoT端末 (例えば、コネクテッドカーやドローン) の超多数接続に関する研究を進めている。5Gにおける超多数接続シナリオにおいては低遅延性を求めていることから、将来のシステムを見据え、超多数接続と低遅延を両立できるシステムが必要になると考えている。



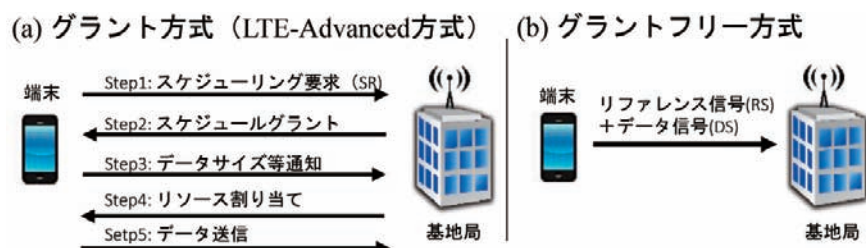
■図1. 5Gにおける3つの利用シナリオとSTABLEの位置付け

具体的な数値目標として、超多数接続のシナリオに対する遅延時間の要件は10秒 (頻繁に送出されない小サイズのパケットの場合)^[2]であるのに対して、本研究開発においては5ミリ秒以内に通信を完了する (端末が信号を生成して送信し基地局にて信号処理を終えるまでの時間) ことを目指している。多数接続においては、符号分割多重を用いず同一周波数かつ同一タイミングで送信できる端末数を5台として、周波数分割多重及び空間分割多重を併用して100万台/km²の接続密度を目指している。我々はこのシステムをSTABLE (Simultaneous Transmission Access Boosting Low-latency) と名付け研究開発を行っているので紹介する。

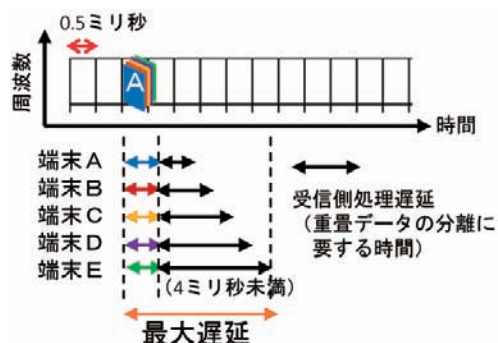
2. 超多数接続及び低遅延を実現する技術

STABLEにおいて、低遅延の実現にはグラントフリー (Grant Free: GF) という技術を用いている。図2にグラントフリーの概要図を示す。LTE-Advancedにおいては、端末が基地局に対してデータを送信する際は、図2 (a) に示すように、基地局から通信の許可であるグラントが必要となるため、このネゴシエーションが10ミリ秒程度の通信遅延を発生させている。STABLEにおいては、この手続きを省略して、図2 (b) のように各端末がグラントを得ずに即座にデータを送信させることができる。本研究開発ではこれをグラントフリーとする。STABLEにおいては、端末識別用のリファレンス信号 (Reference Signal: RS) を各端末が用意して、RSをペイロードであるデータ信号 (Data Signal: DS) と一緒に送信することでグラントフリーを実現している。RSは端末識別の他に無線回線の通信路状態を推定するための伝搬路推定用の信号としても利用できる。

多数接続の実現においては、非直交多元接続 (Non-

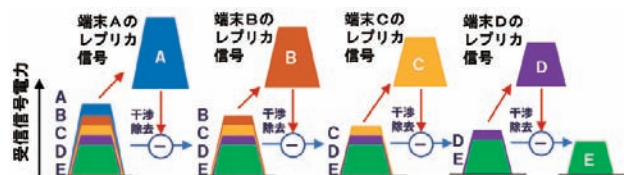


■図2. グラントフリー方式の概要



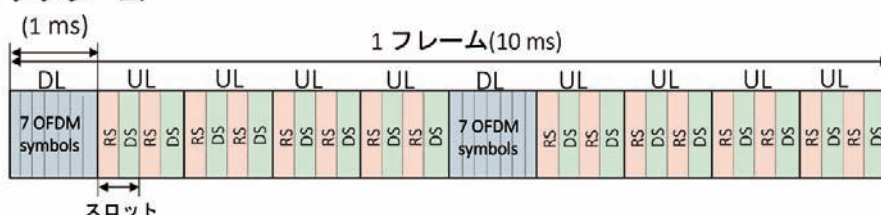
■図3. 非直交多元接続 (NOMA) による5台の端末の同一周波数帯・同一時間領域の共用の例

Orthogonal Multiple Access : NOMA) を利用している。図3にNOMAの概要を示す。NOMAは同一周波数帯・同一時間領域を共用する方式であり、膨大なIoT端末を多数接続させるために有望な技術である^{[3][4]}。NOMAの適用は同時送信を可能とし、信号送信の待ち時間の減少に資するため遅延の短縮にも有効である。ただし、NOMAを利用する場合、各端末のDSが基地局において重畳されて受信されることになるため、基地局では各端末からの端末局間干渉を抑圧・除去する技術が必要となる。今回実証実験を行ったSTABLEでは、この技術として、受信信号強度の大きい順に1端末ずつ逐次的に信号を判定し、その信号を除去していく逐次型干渉抑圧・除去 (Successive Interference Cancellation : SIC) を利用した。SICの概念図を図4に示す。各端末固有のRSを利用して、信号を送信した端末を識別するとともに、端末と基地局間の通信路特性を推定する。この推定値を用いて、重畳信号のうち受信信号強度の一番大きい端末から送信された信号を再現 (レプリカ信号と呼ぶ)



■図4. 逐次型干渉・抑圧除去 (SIC) の概念図

1サブフレーム



■図5. STABLEのフレーム構成 (TDD)

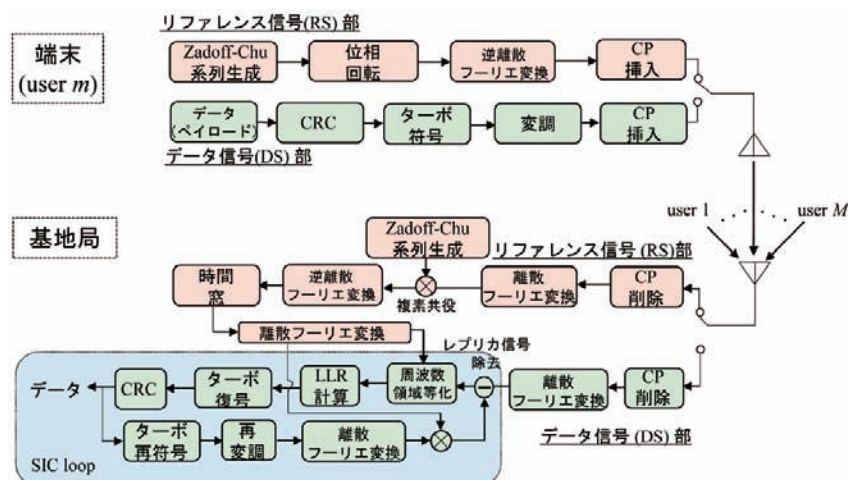
し、重畳信号から差し引くことで干渉が除去される。この処理を繰り返すことで、重畳されたデータ信号から、各端末のデータを分離し復元することが可能となる。SICは逐次的に信号を復元する方式であるが、同時に複数端末の信号を復元する並列型干渉抑圧・除去 (Parallel Interference Cancellation : PIC)^[5]の研究も行っている。PICを利用する干渉除去では10台の同時接続を目標としている。

また、STABLEではグラントフリーやNOMAの他にも通信品質を向上させる技術を適用して通信の安定化を図っている。具体的にはダイバーシチ技術^[6]、連送技術^[6]等を適用している。

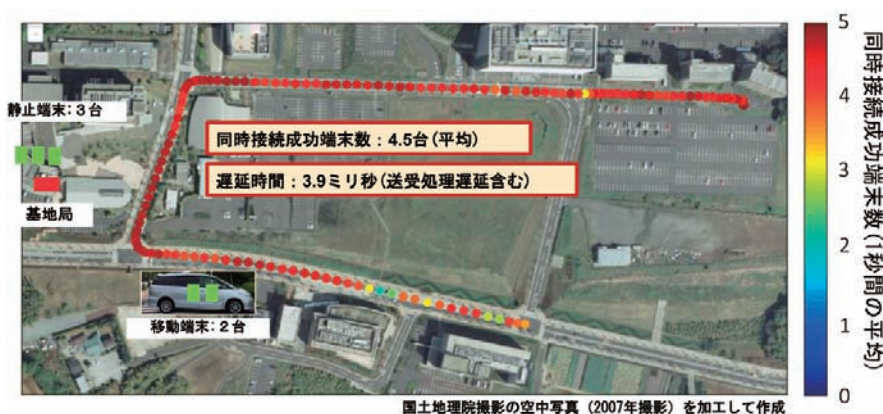
3. STABLEの物理層

図5にSTABLEのフレーム構成を示す。1フレームは10個のサブフレームで構成されておりアップリンク (Up Link : UL) とダウンリンク (Down Link : DL) の比は8 : 2の時分割複信 (Time Division Duplex : TDD) である。LTE-Advancedでは下りのサブフレーム数は上りよりも多いが、STABLEにおいては、IoTの多数接続を目指しているためアップリンクの割合を高めている。

アップリンクのサブフレームは2つのスロットから構成されており、各スロットはRSとDSの組である。上記で述べたようにRSは端末識別と伝搬路推定のために用いられ、DSはペイロードの伝送のために利用される。各端末はNOMAを実現するために各スロットを同一周波数及び同一タイミングで送信する。図6にSTABLEにおける物理層の信号処理を示す。リファレンス信号 (RS) 部における伝搬路推定の方法については紙面のスペースの都合上、文献 [7] を参考にしていただきたい。データ信号 (DS) 部においては、送信側でデータ (ペイロード) に巡回冗長検査 (Cyclic Redundancy Check : CRC) によるパリティビットを付加した後、ターボ符号を用いた誤り訂正符号化 (符号化率1/2または1/3を選択) が行われる。次に変調 (BPSK、QPSK及び16QAMから選択) が実施され、最後にCP (Cyclic Prefix) が付加さ



■ 図6. STABLEの物理層の信号処理



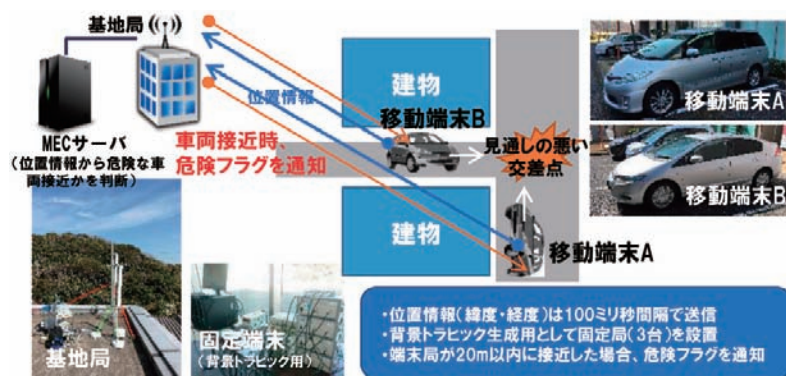
■ 図7. 同一周波数帯を用いた5台の端末からの同時伝送屋外実験の結果

れてシングルキャリアを用いてRSとDSが交互に送信される。基地局では各端末からの信号が重畳されるが、SICにより各端末のDSを復調することができる。基地局では、まず、重畳DSはCPが除去され、その後、離散フーリエ変換により周波数領域の信号に変換される。その信号は他の端末のレプリカ信号が除去された後(1回目のSICではレプリカ信号は存在しない)周波数領域等化^[6]が行われる。その後、ターボ符号の復号において誤り訂正するために対数尤度比(Log-Likelihood Ratio: LLR)が計算されターボ復号が送られる。ターボ復号により誤りが訂正された信号はCRCでエラーがないか確認された後、エラーがなければデータを出力するとともにレプリカ信号が作成される。レプリカ信号はターボ符号による再符号化、再変調及び離散フーリエ変換により実施される。受信信号からレプリカ信号を除去して復調するループ(図6中、SIC loop)を繰り返すことにより全ての端末の信号を復調することができる。

4. 実験システム実証実験

実験試験局(搬送周波数: 2586MHz、チャンネル帯域幅: 1.4MHz)を開局して2種類の実証実験を横須賀リサーチパーク内において実施した。最初の実験は同一周波数帯を用いた5台の端末(うち、2台は時速30km程度で移動する同一車両内に設置)からの同時接続を実施して、基地局における同時接続特性を評価した。端末の送信電力は200mWである。

図7に実験の結果を示す。2台の端末を載せた車両の走行ルート上に1秒ごとにプロットした色により、同時接続(データ伝送)に成功した端末の数(1秒間(=500回の伝送)の平均値)を示している。走行ルート上の多くの地点で5台の端末からの同時接続が成功していることが分かる。同図に示した走行ルート全体にわたる同時接続成功端末数の平均値は4.5台となり、端末当たりのデータ伝送成功率は90%以上であることを確認した。また、5台同時接続時の遅延時間(干渉抑圧・除去等の信号処理による遅延を含む。)



■ 図8. 安全運転支援システム実験の概要

は、3.9ミリ秒以下を確認した。

2番目は日本電気株式会社と連携して実験を行ったもので安全運転支援システムにSTABLEを利用した場合の検証である^[8]。最初の実験ではアップリンクのみの評価であったが、この実験は日本電気株式会社が開発したMulti-access Edge Computing (MEC) サーバを接続しシステム全体として性能を検証した。図8に安全運転支援システムの概要を示す。このシステムは、平時において、2台の移動端末及び3台の固定端末と多数接続を行っている。MECサーバは2台の移動端末の位置を監視しており、2台の移動端末が交差点に接近して衝突の危険があると判断した場合は、基地局に対して危険が迫っている旨の情報(危険フラグ)を端末に伝えるよう通知する。基地局においてはMECからの情報(危険フラグ)を遅延なく2台の移動端末に送信する。基地局が危険フラグを送信する際は、通信の信頼性を向上させるために3台の固定端末との通信の優先度を下げて、2台の移動端末との通信成功率を向上させる無線資源の割当て制御も実施している。この実証実験の結果、移動端末A及びBは交差点に進入する前に遅延なく危険フラグを受け取ることに成功した。移動局とMECサーバとの間の往復遅延(End-to-End (E2E) 遅延)は100mミリ秒以内を実現した。

5. おわりに

本稿では、多数接続と低遅延を実現させるSTABLEを紹介した。STABLEは多数接続にはNOMAを利用し、低遅延にはグラントフリーを適用し多数接続と低遅延の両方を実現できるシステムである。我々はSTABLEの試作機を作成して実環境において性能を発揮できるか確認を行った。その結果、同時接続時のアップリンクについて90%以上の通信成功率を達成した。この際のアップリンクの通信遅延時間は4ミリ秒以下を実現した。また、安全運転支援シス

テムとしてMECサーバと連携して実験を行い、STABLEがシステムとして利用できることを示した。今後はより高品質な送信電力制御の実現、接続数及び信頼性の更なる向上等に取り組み、一層の性能向上を図っていく予定である。

(2019年2月13日 ITU-R研究会より)

参考文献

- [1] ITU-R Recommendation M.2083-0, "IMT Vision- Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", Sep. 2015.
- [2] 3GPP Technical Report (TR) 38.913 version 14.3.0 Release 14, Oct. 2017.
- [3] S.Yang, P.Chen, L.Liang, J.Zhu and X.She, "Uplink Multiple Access Schemes for 5G : A Survey," ZTE communications. Vol.15, No.S1, Jun.2017.
- [4] K.Higuchi and A Benjebbour, "Non-orthogonal Multiple Access(NOMA)with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access," IEICE Transactions on communications, Vol.E98-B, No.3, Mar. 2015.
- [5] 滝沢賢一、森山雅文、手塚隼人、大堂雅之、村上誉、石津健太郎、児島史秀、"多数デバイスを収容する携帯電話網に関する高効率通信方式"、電子情報通信学会 信学技報 RCS2016-116、2016年10月、No.257, pp.125-130.
- [6] M.Moriyama, K.Takizawa, M.Oodo, H.Tezuka and F.Kojima, "Experimental Evaluation of a Novel Up-link NOMA System for IoT Communication Equipping Repetition Transmission and Receive Diversity," IEICE transactions on communications, Aug. 2019.
- [7] M.Moriyama, K.Takizawa, M.Oodo H.Tezuka and F.Kojima, "An Improvement of Channel Estimation for Up-link NOMA Systems," International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Nov. 2018.
- [8] 日本電気株式会社、"NEC、自動運転の安全性向上に向けた適応ネットワーク制御技術のフィールド実験をNICTと共同で実施"、日本電気株式会社プレスリリース、2019年5月。