

知っておきたいキーワード

LTE

小西 聡†

† 株式会社KDDI研究所

"Introduction of LTE" by Satoshi Konishi (KDDI R&D Laboratories Inc., Saitama)

キーワード：LTE, SAE, OFDMA, MIMO, 周波数スケジューリング

LTEとは？

LTEという用語を聞いたことがある読者は多いと思いますが、詳しく知らない方も少なくないと思います。本稿では、LTEという名称の由来からシステム概要、さらには、さまざまなアプリケーションへの対応について概説します。

まずは、LTEの由来です。LTEはLong Term Evolutionの略であり、もともと3GPP (3rd Generation Partnership Project) という技術標準化団体の“UTRA-UTRAN Long Term Evolution”というプロジェクト名がLTEという用語の発端です。第3世代(3G)システムの長期的な進化(Long Term Evolution)を目指して、3GPPが2004年11月にワークショップを開催しました。そこでは、高速パケット伝送の必要性やAll-IP化の流れを鑑み、パケット交換のみのシステムアーキテクチャを想定し、20MHzという広い

帯域幅まで適用可能で、かつ、高速で低遅延な無線アクセスシステムの技術検討を行うことが合意されました。同年12月より3GPPにおいて、LTEが研究課題(Study Item)として承認され、正式にプロジェクトとして技術検討が開始されました。

ここで、UTRAやUTRANは、Universal Terrestrial Radio AccessやUTRA Networkの略称であり、それぞれ3GPPで技術標準仕様化された3Gの無線インタフェース技術や無線ネットワークの名称です。これらの名称は、一般的になじみが薄いですが、NTTドコモやソフトバンクモバイル、イー・モバイルが使用しているWideband CDMA(W-CDMA)システムに相当します。ちなみに、W-CDMAシステムのほかに、3GPP2(3rd Generation Partnership Project 2)が技術標準仕様書を作成したcdma2000システムも3Gシステムであり、KDDI (au) が使用しています。

なお、LTEプロジェクトでは、UTRAとUTRANの進化ということで、それぞれ、Evolved UTRA (E-UTRA)とEvolved UTRAN (E-UTRAN) という名称を使用しています。

上記のように厳密に言うと、“LTE”はシステム名称や技術名称ではなく、プロジェクト名です。しかしながら、“LTEシステム”という用語が広まっていることから、本稿でも“LTEシステム”という用語を使用します。ただし、読者の皆さんは、“LTEシステムとは、正確には、LTEプロジェクトで技術標準化されたE-UTRAとE-UTRANを指す”と理解してください。

LTEプロジェクトでのE-UTRAやE-UTRANの検討と同様に、パケット交換型アーキテクチャに適したコアネットワークの改良を目的とした“SAE (System Architecture Evolution) プロジェクト”の技術検討が、2004年12月から着手されました。SAEでのコアネットワークを、

☞ EPC (Evolved Packet Core) と呼んでいます。また、E-UTRANとEPCを合わせたシステム全体をEPS (Evolved Packet System) と呼んでいます。

LTEやSAEでのインタフェースや構成要素を図1に示します。E-UTRANはeNodeBのみから構成されているのに対し、EPCには、P-GW (Packet Data Network Gateway) やS-GW (Serving Gateway), MME (Mobility Management Entity) といったノードが存在します。P-GWは、外部のIPネットワークとのインタフェースを担当するため、ユーザ端末(以下、3GPPの用語である“UE: User Equipment”を使用)へのIPアドレスの付与のほか、サービス品質(QoS: Quality of Service)の制御、WiMAXやcdma2000など3GPP以外のシステムとのインタワークも担当します。S-GWは、P-GWとeNodeBの間のユーザトラフィックデータの送受信を行うと

ともに、UEがeNodeB間にもたがったハンドオーバー時のユーザトラフィックデータの管理を行います。MMEは、

UEとEPCの間でペアラと呼ばれるIPパケットフローの管理や、UEの移動管理などを行います。

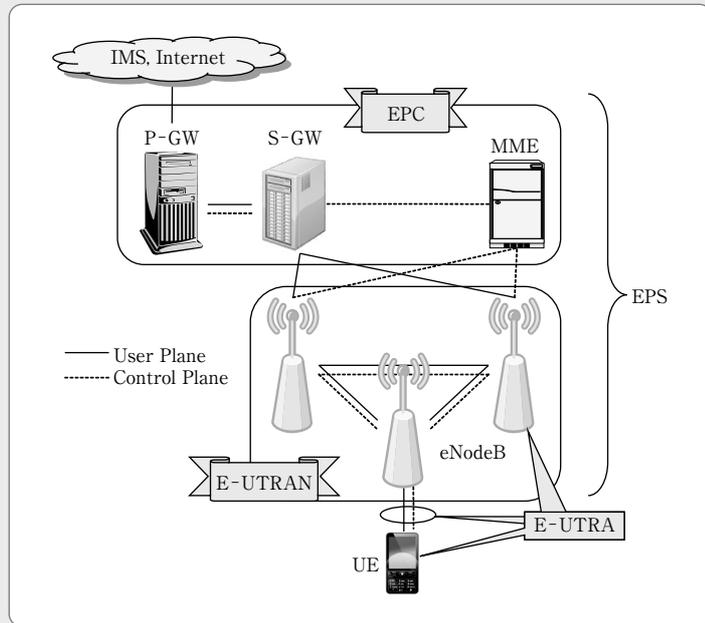


図1 LTEとSAEでのインタフェースと構成要素

LTEシステムの商用サービス

北欧の通信事業者であるTeliaSoneraが世界で初めて、2.6GHzを用いたLTEシステムの商用サービスを2009年12月14日よりスウェーデンのストックホルムとフィンランドのオウルで開始しました。

日本では、NTTドコモ、KDDI、ソフトバンクモバイル、イー・モバイルの4の通信事業者がLTEの導入を表明し、表1に示すように、2009年6月に、総務省から1.5GHz帯と1.7GHz帯の周

波数が、各社に割当てられました。4社とも上りリンクと下りリンクが異なる周波数帯を使用する、周波数分割複信方式(FDD: Frequency Division Duplex)を採用するため、表では一社につき二種類の周波数帯が記載されて

います。表1に示すように、日本では、NTTドコモが2010年末に商用サービスを開始する予定であり、他の三社も順次LTEシステムの商用化を進める予定です。

表1 LTE導入予定の日本の通信事業者に割当てられた新たな周波数帯

事業者	イー・モバイル	NTTドコモ	ソフトバンクモバイル	KDDI
周波数帯域幅[MHz]	10	15	10	10
周波数帯[MHz]	1749.9~1759.9, 1844.9~1854.9	1447.9~1462.9, 1495.9~1510.9	1427.9~1437.9, 1475.9~1485.9	1437.9~1447.9, 1485.9~1495.9
LTE導入時期	2012年以降	2010年12月	未定	2012年12月

LTEシステムの概要

3GPPでは、システムの技術標準仕様をReleaseという用語で区分しています。俗に、LTEシステムの技術標準仕様は、E-UTRAとE-UTRAN用のRelease 8 (Rel-8)とRelease 9 (Rel-9)の仕様書の内容を指します。なお、Rel-9は、Rel-8のマイナーチェンジという位置づけであり、Rel-8とRel-9の技術標準仕様はそれぞれ、2009年3月と2010年3月に確定しました。

LTEシステムの特徴的な要素技術は、OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)とMIMO (Multiple Input Multiple Output)です。以後はこの二つの技術について簡単に説明します。

まず、OFDMAは、デジタル放送でも使用されているOFDMを、複数のユーザが同時に送受信できるように拡張されたものです。図2に示すように、LTEシステムでは、OFDMAのサブキャリアを、リソースブロックと呼ばれる12サブキャリアからなる無線リソースの割り当て単位に分割し、UEには、

リソースブロック単位で無線リソースを割り当てます。これは単に、同時に複数のUEに対して無線リソースが割り当てられるため、複数のUEが同時に通信できる、ということになりますが、実はそれだけではありません。マルチパスによって、“UEごとに周波数軸でのSINR (Signal to Interference and Noise Ratio)が異なるため、UEごとにSINRの良いリソースブロックを割り当てることが可能になります。この結果、ユーザにとっても、システムにとっても効率の良いシステム運用が実現できます(図3)。

ちなみに、既存のCDMAを用いた3Gシステムでは、全帯域を時間単位でUEに割り当てる“時間スケジューリング”のみでした。しかし、LTEシステムでは、OFDMAを用いることで、時間スケジューリングのみならず、周波数軸方向の“周波数スケジューリング”という、2次元の無線リソース割当てが可能になり、無線リソース割当ての自由度も高まります。

このように、周波数スケジューリングによって得られるスループットの増

加量を、“周波数スケジューリング利得”と呼びます。周波数スケジューリング利得は評価対象のセルラ環境や無線リソースの割当てアルゴリズムによって異なりますが、スループット全体では、約20~50%の利得が得られます。

次に、MIMOについて簡単に説明します。図4に示すように、MIMOは、同一の無線リソースを用いて、複数の信号を同時に送受信する技術です。このためには、複数の送受信アンテナに加えて、複数信号を同時に送受信するための送受信機での信号処理が必要です。一般的に、一つの送信機から一つの受信機に対して一つの無線リソースを用いて複数の信号を送信すると、信号同士が互いに干渉し合い、送信信号を正しく受信できなくなります。このような事象を避けるためには、送信された信号を分離する必要があり、送受信機の情報交換と送受信機での信号処理が必要となります。具体的には、ZF (Zero Forcing)やMMSE (Minimum Mean Square Error), MLD (Maximum Likelihood Detection), Codebookを用いたPrecodingなど、

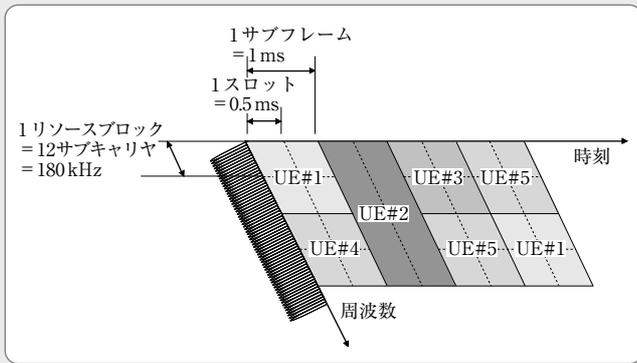


図2 LTEの無線リソース割当て例

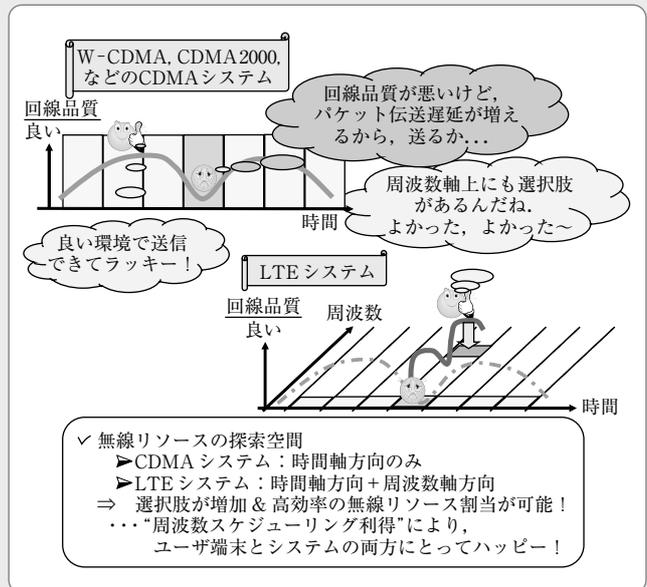


図3 周波数スケジューリング利得

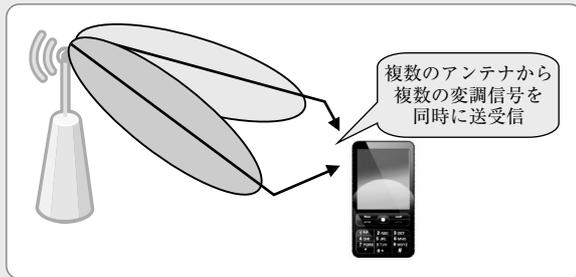


図4 MIMOの概念図

さまざまな方法があります。紙面の都合上、詳細は割愛しますので、興味のある方は参考文献をご覧ください。

このMIMO技術は、OFDMA技術と無関係なようですが、そうではありません。MIMOを用いて複数信号の送受

信を実現するためには、信号分離しやすい条件が必要であり、その条件の一つがSINRです。前述のように、OFDMAでは、UEごとに高いSINRを選択するため、MIMO通信を実現しやすくなるのです。また、OFDMAで用いるガードインタバル(あるいはサイクリックプレフィックスとも言う)が、MIMOによる複数信号の並列伝送の実現に必要な“マルチパス環境”によって生じる、伝送シンボル間の干渉を緩和することも挙げられます。

以上のように、MIMOとOFDMは、非常に優れた技術の組合せだと言えます。

LTEシステムの性能

一般的に、使用可能な周波数帯域幅は、国や地域、通信事業者によって異なります。LTEシステムは、多くの通信事業者が使用しやすいよう、1.4, 3, 5, 10, 15, 20MHzという、さまざまな帯域幅に対応可能です。OFDMAの利点である、さまざまな帯域幅への適用性のほか、LTEシステムでは、帯域幅によらずに、制御チャネルの周波数帯を共通化しています。これによって、ユーザが他の地域に移動し、帯域幅が異なる通信事業者でもすぐに通信可能となります。また、同一通信事業者内でも、基地局によって帯域幅を変えることが可能です。

MIMO通信によって得られるスループットは、送受信アンテナ数や通信環境によって大きく異なります。例えば、送受信アンテナ数がそれぞれ2本ずつの、“2×2 MIMO”のシステムを想定します。この場合、2×2 MIMOによって、二つの伝送信号を誤りなく並列伝送可能という理想的な環境と、セルカバレッジ内に非常に高いSINRを有するUEが、1台のみ存在するという条

件を想定します。この場合、このUEの物理層での最大伝送速度は、下りリンク(eNB→UE)では73.7Mbpsとなります。一方、上りリンク(UE→eNB)では、LTEではMIMOが動作しない仕様となっているため、前述の理想的な環境でも36.7Mbpsとなります。

しかし、実際にユーザが体感するスループットが、上記の理想値に達することは極めてまれです。一つ目の理由は、上記のような常に二つの伝送信号を送信できるような理想環境ではないからです。二つ目の理由は、セルのカバレッジエリア内に複数のUEが存在する場合、無線リソースを複数UEで共有するためです。たとえ、すべてのUEが二つの伝送信号を、誤りなく並

列に送信できたとしても、前述の73.7Mbpsや36.7Mbpsというスループットは、カバレッジエリア内の複数のUEで分け合うこととなります。このほかにも、UEの伝送能力にも依存します。LTEシステムの技術標準仕様では、UEを1～5のカテゴリーに分類しています。例えば、表2に示すように、カテゴリー2のUEの最大伝送速度は下りリンクが51Mbps、上りリンクが25Mbpsです。したがって、たとえセルカバレッジ内に存在するUE数が一つであり、かつ、そのUEが理想環境にいるとしても、下りリンクでは、73.7Mbpsというシステム上の最大スループットを得られない、ということに注意が必要です。

表2 UEカテゴリーごとの対応機能

UEカテゴリー	下りリンクのアンテナ構成 (基地局送信アンテナ数× 端末受信アンテナ数)	下りリンクの最大 伝送速度 [Mbps]	上りリンクの64QAM 対応/非対応	上りリンクの最大 伝送速度 [Mbps]
1	1×2	10.296	非対応	5.16
2	2×2	51.024	非対応	25.456
3	2×2	102.048	非対応	51.024
4	2×2	150.752	非対応	51.024
5	4×2	302.752	対応	75.376

LTEシステムのQoS管理

アプリケーションの普及や進化には、伝送速度の向上が不可欠です。これまで、EメールからWeb閲覧、ビデオストリーミングというように、有線回線の伝送速度が上昇するにつれて、高速かつ低遅延のサービスやアプリケーションが普及しています。一般的に、無線回線の伝送速度は、有線回線よりも遅いのですが、LTEシステムによって、有線回線に引けを取らない伝送速度が期待できます。このため、これまで以上に、ビデオ配信やオンラインゲームの普及が予想されています。また、従来はどちらかというと、上りリンクよりも下りリンクの伝送速度を重視していましたが、LTEでは、上りリンクの高速化に伴い、YouTubeやSNS (Social Networking Service)、ツイッターのような、ユーザがコンテンツを作成し、他のユーザ

と共有するようなアプリケーションの普及が期待されます。

このほか、携帯電話の特徴を活かした位置情報サービスやナビゲーションサービスなども、スマートフォンのような携帯端末画面の拡大や端末性能の向上によって、ますます便利になるでしょうし、携帯電話ならではの新たなサービスへの期待が高まります。

さまざまなサービスが混在するシステムで重要となるのが、QoSです。LTEシステムではさまざまなサービス品質を満足できるよう、9種類のQoSクラスを設定できます。具体的には、QoSクラスID (QCI: QoS Class Identification) ごとに、パケットの許容遅延時間と許容誤りロス率、さらに、QCIの優先度 (1~9) を定義できます。例えば、3GPPの技術標準仕様書では、Real Time Gaming用として、50ミリ秒の許容パケット遅延時間と、 10^{-3} の許容パケット誤りロス率が記載され

ています。また、従来のセルラシステムでは、音声通信は回線交換型のアーキテクチャを採用していましたが、LTEシステムでは、パケット交換型アーキテクチャであるため、LTEシステムで音声サービスを提供する場合は、VoIP (Voice over IP) を使用する必要があります。VoIPでも、従来の回線交換型の音声通信以上の品質確保を目指して、VoIP用のQCIとして、100ミリ秒の許容パケット遅延時間と、 10^{-2} の許容パケット誤りロス率が記載されています。なお、VoIPでは、短いパケット長が周期的に発生します。もし、パケットごとに無線リソース割当情報を通知すると、制御チャネル量が増大します。これを避けるため、LTEシステムでは、Semi-Persistent Scheduling (SPS) と呼ばれる、周期的にパケットが発生するトラフィックに適した無線リソース割当が可能になっています。

LTEの発展型

~LTE-Advanced~

LTEシステムの発展型として、LTE-Advancedシステムの技術標準仕様化

に向けた検討が進められており、2010年12月に、技術標準仕様書の初版が完成する予定です。LTE-Advancedシステムは、最大100MHzの帯域幅やMIMO高度化などによって、伝送速度

のさらなる高速化が実現するため、屋外でも光ファイバ通信にひけをとらない無線通信環境が期待されます。

(2010年5月6日受付)

参考文献

- 1) S. Sesia, I. Toufik and M. Baker: "LTE - the UMTS Long Term Evolution", John Wiley and Sons Inc. (2009)
- 2) 服部武, 藤岡雅宣: "HSPA+/LTE/SAE教科書", インプレスR&D (2009)
- 3) E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj and H.V. Poor: "MIMO Wireless Communications", Cambridge University Press (2007)



小西 聡 1993年、電気通信大学大学院博士前期課程修了。同年、国際電信電話(株)(現、KDDI(株))入社。1995年より、同社研究所(現、(株)KDDI研究所)にて、衛星通信や固定無線通信、セルラシステムなどの無線通信システムに関する研究開発に従事。現在、(株)KDDI研究所無線通信方式グループリーダー。著書に「無線通信技術大全」(リックテレコム社、共著)、博士(工学)。

キーワード募集中

この企画で解説して欲しいキーワードを会員の皆様から募集します。ホームページ (<http://www.ite.or.jp>) の会員の声より入力可能です。また電子メール (ite@ite.or.jp)、FAX (03-3432-4675) 等でも受け付けますので、是非、編集部までお寄せください。(編集委員会)