

Super 3Gの技術動向

その2 Super 3Gの技術検討

3Gから4Gへのスムーズな移行を進めるために検討されているSuper 3Gについて、第2回となる今回は、技術詳細として現在標準化で検討されている想定技術について述べる。

あべ たさゆき いしい みなみ かとう やすひろ ひぐち けんいち
安部田 貞行 石井 美波 加藤 康博 樋口 健一

1. まえがき

Super 3Gは前回解説したように、3GPP (3rd Generation Partnership Project) において、Evolved UTRA and UTRAN というスタディアイテム名あるいはLTE (Long Term Evolution) と称して基本検討が開始された。要求条件については2005年6月に合意され、その要求条件を満たすための具体的な技術検討も開始された。2006年6月には基本方式の実現性に関するスタディアイテムの検討がほぼ完了し、詳細仕様に関するワークアイテムの検討が開始された。本稿では、スタディアイテムで検討されている提案技術について解説する。

2. 物理レイヤ技術コンセプト提案

2005年6月の3GPP TSG RAN WG1の会合において、以下に示す周波数分割複信 (FDD: Frequency Division Duplex)^{*1}方式、および時分割複信 (TDD: Time Division Duplex)^{*2}方式によるそれぞれ3つのコンセプトが提案された (表1)。

2005年11月のRAN WG1において、FDD (paired spec-

表1 提案された無線アクセス方式

| デュプレックス方式 | 上りリンク | 下りリンク |
|-----------|-------------|-------------|
| FDD | SC-FDMA | OFDMA |
| | OFDMA | OFDMA |
| | MC-WCDMA | MC-WCDMA |
| TDD | MC-TD-SCDMA | MC-TD-SCDMA |
| | OFDMA | OFDMA |
| | SC-FDMA | OFDMA |

MC-TD-SCDMA (MultiCarrier Time Division Synchronous Code Division Multiple Access): 中国で採用が予定されている第3世代移動通信であるTD-SCDMAを高速化するためにマルチキャリア化したもの。

trum) およびTDD (unpaired spectrum) において、高い共通性 (high commonality) が非常に重要であり、同じ無線アクセスにすべきという提案が多数の企業により合意された。このFDD/TDDにおける共通の無線アクセス方式として、周波数利用効率が高いとされる直交周波数分割多元接続 (OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) が、基地局から移動端末への下りリンクに、SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) が移動端末から基地局への上りリンクに採用されることが、2005年12月のプレナリ会合で承認された。

以下、この無線アクセス方式の特徴について解説する。

2.1 下りリンク OFDMA

直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) は、高速データレートの広帯域信号を多数の低速データレートのマルチキャリア信号を用いて並列伝送することにより、マルチパス干渉 (遅延波からの干渉) に対して耐性の高い高品質信号伝送が実現できる。さらに、OFDMは狭帯域幅のサブキャリア信号を用いるために、サブキャリア数を変更することにより1.25~20MHzまで広範囲な信号帯域幅のスペクトルに柔軟に対応できる。一般的にOFDMでは、各OFDMシンボル^{*3}の先頭にCyclic Prefixと呼ばれるガード区間を設けることにより、前シンボルの遅延波が次のOFDMシンボルに及ぼすシンボル干渉およびサブキャリア間の直交性の崩れに起因するサブキャリア間干渉を除去できる。E-UTRA (Evolved UTRA) では、このCyclic Prefixを用いるOFDMベースの無線アクセスをベースラインにしている。以下、OFDMベースの無線アクセスの特徴について述べる。

*1 周波数分割複信: 双方向の送受信方式の1つ。上りリンクと下りリンクに異なる周波数帯域を割り当てる方式であり、同時に送受信が可能。

*2 時分割複信: 双方向の送受信方式の1つ。上りリンクと下りリンクに同一の周波数帯を使用し、異なる時間を割り当てることにより双方向通信が可能。

*3 シンボル: 伝送するデータの単位であり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各サブキャリアには複数のビット (例えばQPSKなら2bit) がマッピングされる。

(1) 周波数ダイバーシチを用いる信号送信法

広帯域伝送では、前述のマルチパスにより周波数領域の受信レベルが変動する周波数選択性フェージング^{*4}の影響をいかに有効に利用するかが鍵となる。OFDMベースの無線アクセスにおける信号送信法としてはLocalized FDMA (図1(a))とDistributed FDMA (図1(b))の2通りの方法が用いられる。Localized

FDMAとは、連続する複数のサブキャリア(無線リソースブロック)をまとめて特定のユーザに割り当てる方式であり、Distributed FDMAは全帯域を用いて複数のユーザに離散的に割り当てる方式である。

① Localized FDMA

データチャンネルには、周波数領域の伝搬路の変動を利用したパケットスケジューリングが適用される。すなわち、周波数領域において、受信信号レベルの高いユーザを選択する。移動端末は1無線リソースブロックを送信する周波数単位ごとにチャンネル品質(CQI: Channel Quality Indicator)を測定し、測定したCQI情報を上りリンクの制御チャンネルにより基地局に報告する。基地局は、複数ユーザから通知されたCQI情報を基に、時間フレームの最小単位であるサブフレームにおける無線リソースブロックをスケジューリングにより選択されたユーザに送信する。各ユーザのCQIに応じた最適なLocalized FDMA信号の割当てを行うことにより、図1(a)に示されるように受信信号レベルの高い周波数ブロックをもつユーザを選択できるのでユーザ間のダイバーシチ効果(マルチユーザダイバーシチ)を得ることができ、ユーザスループット^{*5}およびセルスループット^{*6}の向上が可能となる。

② Distributed FDMA

共通制御チャンネルのように複数ユーザに同報するチャンネルでは、周波数領域で離散的なサブキャリアを用いるDistributed FDMAで信号送信することにより、低速データレートのチャンネルに対しても広帯域周波数帯域幅のチャンネル変動の平均化効果(周波数ダイバーシチ効果)を得られる。さらに、Localizedおよび

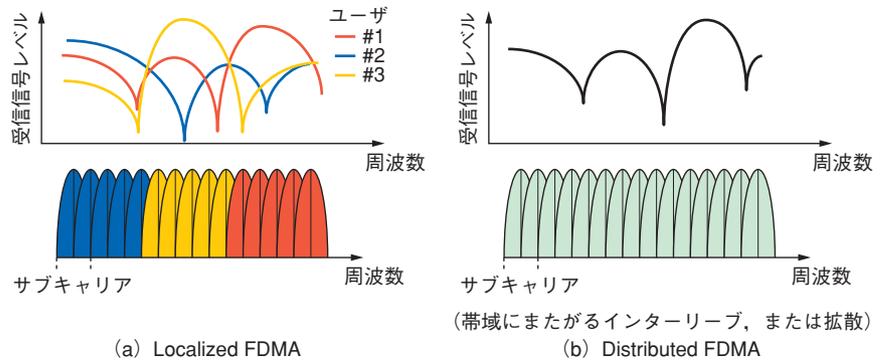


図1 LocalizedおよびDistributed FDMA信号送信法

Distributed FDMA信号を組み合わせた信号送信法も検討されている。

(2) MIMOチャンネル伝送を用いる高速信号伝送

E-UTRAの下りリンクにおける目標ピークデータレートである100Mbit/sを実現するため、MIMO (Multiple Input Multiple Output) 多重伝送の適用が検討されている。MIMO多重伝送では、複数の送信アンテナから同一の無線リソース(時間、周波数、コード)を用いて異なる情報データを送信することにより、ユーザ/セルスループットを向上することができる。受信機では、送信アンテナごとの直交パイロットチャンネルを用いて測定した、送信アンテナごとのチャンネル変動値を基に送信信号分離を行う。OFDMに、MIMO多重伝送を適用した場合、直接拡散符号分割多元接続(DS-CDMA: Direct Sequence Code Division Multiple Access)^{*7}などのシングルキャリアベースの無線アクセスと異なり、他の送信アンテナ信号との信号分離をマルチパス干渉の影響を受けることなく高精度に実現できる。したがって、OFDMはMIMO多重伝送との親和性に優れているため、高速信号伝送に適している。2送信および2受信アンテナブランチ(以下、2×2)のMIMO多重伝送を用いた場合の平均受信 E_b/N_0 に対するスループット特性を図2に示す。信号帯域幅は20MHzで、マルチパスモデルとして典型的な都市のチャンネルモデルであるTypical Urbanチャンネルモデルを用いた。図に示すように、2×2のMIMO多重伝送を用いることにより、20MHzの信号帯域で要求条件である100Mbit/s以上のスループットを実現できることが分かる。

(3) SFN combiningを用いるマルチキャスト信号伝送

OFDMベースの無線アクセスにおいては、ガード区間

*4 周波数選択性フェージング: 建物などに反射して異なる経路で到来する信号(電波)が受信されることにより、受信信号の周波数軸上における受信レベルが様でなくなること。
*5 ユーザスループット: 1ユーザが単位時間内に誤りなく伝送できるデータ量。

*6 セルスループット: 1つのセル内で単位時間内に通信できるデータ量。
*7 直接拡散符号分割多元接続: ユーザごとに異なる符号を用いて信号系列を直接拡散することで、同一周波数帯域内において複数のユーザのアクセスを可能とする方式。W-CDMAに採用されている方式である。

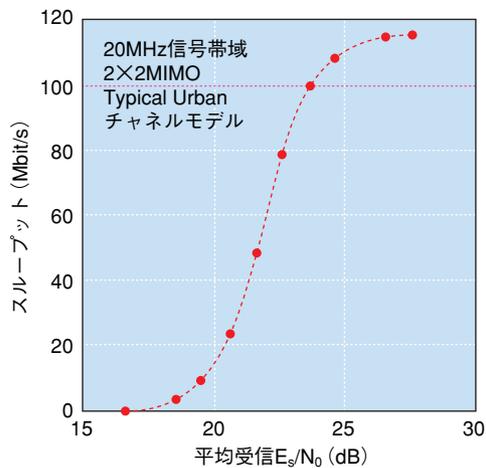


図2 2×2MIMO多重伝送を用いた場合のスループット特性

内に到達した遅延波はシンボル間干渉およびサブキャリア間干渉を生じることなく、すべて有効信号電力として利用することができる。したがって、異なるセルサイトから同一の無線リソースで同一の情報データを送信した場合、ガード区間に到達した信号は、あたかも遅延波のように希望波信号として合成することができる。ガード区間の同一の情報データ信号は、受信機には合成信号として入力するため、SFN (Single Frequency Network) 合成あるいはsoft-combiningと呼ばれる。このため、OFDMでは複数の基地局からの信号を容易に合成できる特徴を持ち、このSFN合成を用いるマルチキャスト/ブロードキャストがOFDMの重要な技術として検討されている。マルチキャスト/ブロードキャストでは、複数のセルサイトからの送信信号を合成受信するために、通常の1セルサイトとの通信を行うユニキャストと比較してガード区間長を長くする必要がある。しかしながら、前述のようにガード区間に到達した複数セルサイトからの送信信号はすべて希望波信号電力となるため、高速データレートの高品質受信を実現することができる。

2.2 上りリンク SC-FDMA

上りリンクは下りリンクと異なり、移動端末の低消費電力化が非常に重要な要求条件である。特に送信部の電力増幅器は移動端末の消費電力で大きな割合を占める。つまり、同じ最大送信電力の電力増幅器を仮定した場合、ピーク電力対平均送信電力比 (PAPR: Peak-to-Average Power Ratio) が低いほど、同じ受信性能を実現できるカバレージ

エリアを増大することができる。以下、SC-FDMA無線アクセスの特徴について述べる。

(1) 可変帯域SC-FDMA

上りリンクにおいては前述のように移動端末の低消費電力化の観点から、送信すべきトラフィックのデータレートに応じた最小の送信電力でデータチャンネルを送信する。送信信号帯域幅を広くすると周波数領域の伝搬路変動を平均化する周波数ダイバーシチ効果は増大する。しかしながら、必要以上に信号帯域幅を拡大すると無線伝搬路の推定に必要なパイロット信号の電力密度が低減するため、伝搬路の推定精度の劣化に起因して受信特性が劣化する。したがって、図3に示すような送信トラフィックの情報レートに応じた可変帯域幅のSC-FDMA無線アクセスが用いられる。

(2) 周波数領域のSC信号生成法

上りリンクのSC-FDMA無線アクセスにおいても、下りリンクOFDMAと同様に、LocalizedおよびDistributed FDMA双方の信号送信法が用いられる。Localized FDMAは通常システム帯域の1部の連続した周波数を割り当てるFDMAと同一である。下りリンクと異なる点は、上りリンクではシングルキャリアの送信のみを許容する点である。Localized FDMAは主にデータチャンネルで用いられる。上りリンクにおいても時間・周波数領域の伝搬路変動を利用したスケジューリングが検討されており、基地局からLocalized FDMAでデータチャンネルを送信するサブフレームおよび周波数帯域が割り当てられる。一方、Distributed FDMAは、図1(b)に示すように離散的な周波数成分 (スペクトラムがくしの歯のように離散的になる) を用いた信号送信法であるが、下りリンクのOFDMAの場合と異なり、時間領域においてはマルチキャリア伝送のような送信信号のレベル変動はない。したがって、PAPRの増大を招かない。Distributed FDMAは、くしの歯状に広い帯域に信号を拡散することにより、周波数ダイ

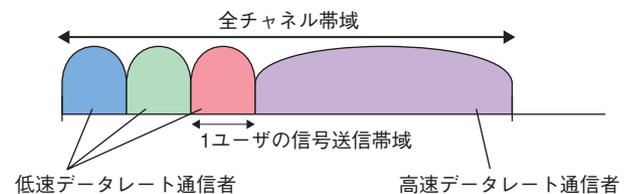


図3 可変帯域幅のSC-FDMA無線アクセス

バーシチ効果を得ることができることから、共通チャネルなどへの適用が検討されている。SCのDistributed FDMA信号の周波数領域での生成法としてDFT (Discrete Fourier Transform)-Spread OFDMが提案されている。DFT-Spread OFDMの送信ブロック構成を図4に示す。DFT-Spread OFDMは、高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform)^{*8}処理を用いることにより、下りリンクのOFDMアクセスと同一のクロック周波数、サブキャリア間隔を実現でき、SCのDistributed FDMA信号をOFDMと共通的に生成できるメリットがある。

(3) Cyclic Prefixを用いる周波数等化の適用

SC-FDMAアクセスでは、自チャネルの遅延波からの干渉 (マルチパス干渉) を抑圧する等化器が必要になる。周波数領域の等化処理は、時間領域処理に比較して演算処理量を小さくできるため実用に適している。周波数領域の等化処理は、ブロック単位で時間領域信号を周波数領域の信号に変換する必要があるため、ブロック間干渉の影響をなくすためにCyclic PrefixをFFTブロックごとに設けている。

3. 無線アクセスネットワークアーキテクチャと無線インタフェースプロトコル

2005年6月に承認された要求条件の中で、アーキテクチャと無線インタフェースプロトコルに関連するものは以下の項目がある。

- ・低制御遅延・低伝送遅延
- ・シンプル化
- ・低コスト化
- ・現行と同等もしくはそれ以上のサービス提供能力

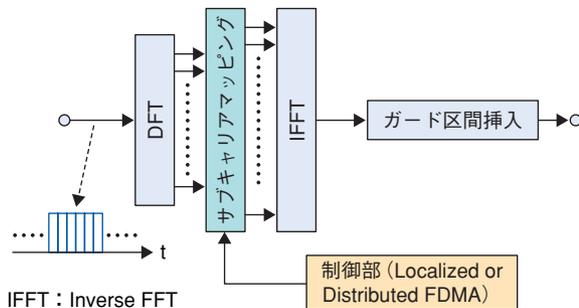


図4 DFT-Spread OFDM ブロック構成

これらの要求条件を満たすためには、機能分担の変更も含めた検討を行い、新しいネットワークアーキテクチャおよびプロトコルの採用も視野において検討を進める必要がある。これらについても現在3GPPにて精力的に検討が進められている。以下に現状の3GPPで議論されている主な項目について、その方向性や状況を述べる。

3.1 Super 3G アーキテクチャ

従来の3Gシステムの技術的特徴の1つに、複数の基地局を介して同時に通信を行うソフトハンドオーバー方式の採用が挙げられる。アーキテクチャ上もソフトハンドオーバーをサポートするため、基地局の上位局である無線ネットワーク制御装置 (RNC: Radio Network Controller)^{*9}に主要な無線機能を集中して配置する構成となっている。Release 5^{*10}で機能追加されたHSDPA (High Speed Downlink Packet Access) では、パケット系トラフィックに親和性の高い共有チャネル (SCH: Shared CHannel) を採用し、基地局のスケジューリング機能による高効率伝送を実現している。このHSDPAの機能追加部分は、従来のRelease 99^{*10}アーキテクチャへの整合性が適切に考慮されているが、HSDPAは主に基地局の機能で構成される点や単一の基地局とのみ通信を行いハンドオーバーの際に基地局を切り替えるハードハンドオーバーを行う点で従来とは異なる部分も多く、RNCと基地局間の機能の重複や制御が複雑化している部分がある。

これに対してSuper 3Gでは、飛躍的なパフォーマンスの向上や装置の低コスト化の実現を最重要課題と位置付け、ソフトハンドオーバーを非採用とすることで、共有チャネル型のアクセス方式に適した機能配置の実現や無線制御のシンプル化を目指すことを基本方針としている。

システム構成上の大きな特徴として、従来のRNC機能を図5の基地局のeNB (evolved Node B) およびコアネットワーク系装置のMME/UE (Mobile Management Entity/User Plane Entity) に分散して配置し、RNC自体を削減することを前提としている。装置種類が削減されることにより、開発規模の削減や運転管理面での稼働が軽減できるというメリットがある。また、装置処理遅延の削減など、基本的なパフォーマンスの向上も期待される。

従来RNCに配置されていた機能 (RRM (Radio Resource Management), RRC (Radio Resource Control), PDCCP (Packet Data Convergence Protocol)^{*11}, RLC (Radio Link

*8 高速フーリエ変換: 時間領域の信号の中に含まれる周波数成分とその割合を抽出する処理を高速に計算する手法。一方、周波数領域の信号から時間領域の信号を作成することをIFFTと呼び、同一の計算手法で実現できる。

*9 無線ネットワーク制御装置: 3GPP上規定されている、無線リソースの管理、移動端末の制御、基地局の制御を行うノード。

Control), MAC (Medium Access Control)) は, 図6のようにeNBとMME/UPEに適宜配置されるが, その中で特徴的な点について説明する.

(1) RRCとRRM機能

RRCはRRMと連動し, 呼受付制御やハンドオーバなど移動端末の基本的動作を制御する重要な機能である. 共有チャネル型のアクセス方式では無線リソースの多くがMAC機能レベルで管理されるため, 図6のようにRRCをMAC機能同様にeNBに配置することでRRMとの連携が容易になり, 処理遅延の短縮化や周波数利用効率の向上を図ることができる. また, 同一eNB内に閉じたセル間ハンドオーバはeNB内での処理が可能となるため, 多セルを收容する装置構成ではメリットが大きい. 一方, eNBをまたがるハンドオーバは, eNB間にてRRCおよびRRM情報の送受を行う.

(2) RLCとMAC機能

RLCとMACは送受信信号の多重分離, 再送, 順序整列などの機能を有し, 実効スループットや伝送遅延品質を左右する重要な機能である. 従来の3GシステムではRLCレイヤの再送機能がRNCに配置されているため, 高速スループットを目指すには以下の課題があった.

- ・再送処理には, RNCと基地局間の伝送遅延と装置内処理遅延が含まれ, RTT (Round Trip Time)^{*12}の短縮が困難
- ・最適スループットを得るには, RNCと基地局間で高速なフロー制御機能が必要

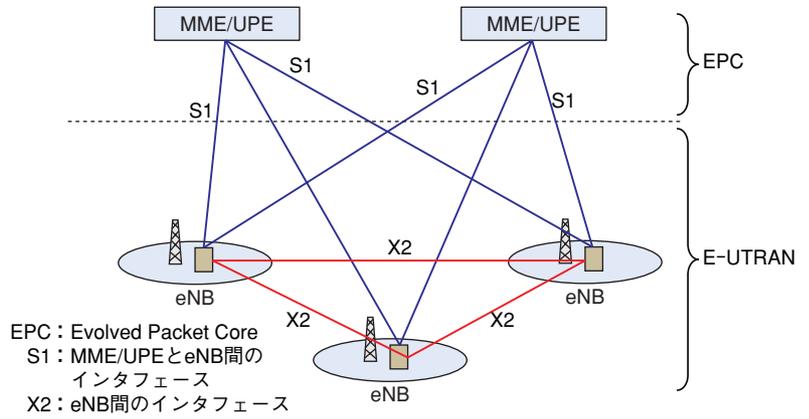


図5 Super 3GシステムにおけるUTRANアーキテクチャ

Super 3Gは無線ピーク伝送速度が100Mbit/sであり, TCPレベルでも同様の速度を得るにはRTTの短縮が極めて重要である. そこでSuper 3Gでは, 図6のようにRLC, MACをeNBのみに配置することでRTTの最小化を図るとともにフロー制御機能を不要とする. ただし, ハンドオーバ時にeNBに滞留している未送信データに関しては, 従来, 基地局 (MAC) では破棄しRNCの再送機能 (RLC) で救済していたが, Super 3GではeNB間で転送する機能を新たに追加する.

(3) セキュリティ機能

ユーザデータや非アクセス層 (NAS : Non-Access Stratum) のプロトコルに関するセキュリティはMME/UPEに配置する. ただし, RRCに関するセキュリティはeNBに配置する前提としている. 近年はオフィスなどの屋内エリアのカパレッジや無線容量を確保するため基地局の小型化/経済化が進み, 以前より身近な場所

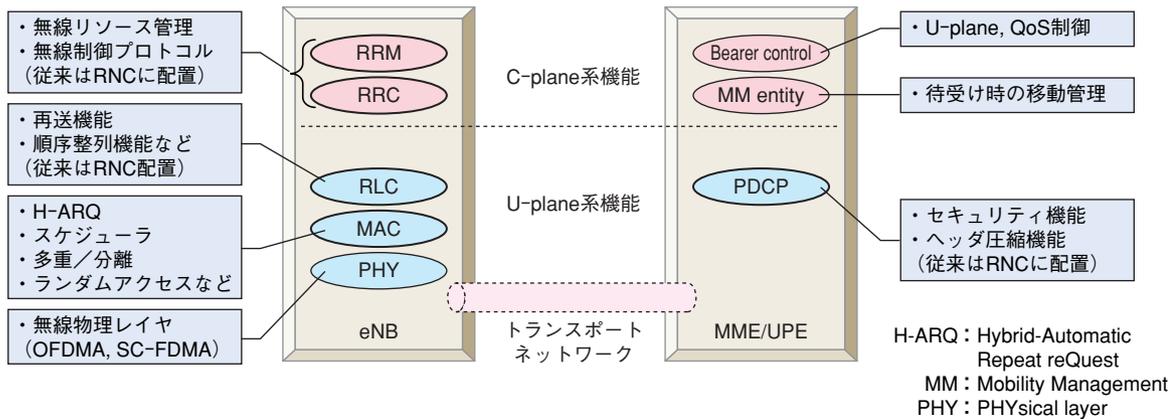


図6 Super 3Gシステムにおける機能の配置イメージ

* 10 Release **: 3GPP仕様のバージョンを示す. Release99は1999年に最初の標準仕様として策定された. HSDPA機能は2005年にRelease5として追加策定されている.

* 11 PDCP : レイヤ2におけるサブレイヤの1つで, 秘匿, 正当性確認, 順序整列, ヘッダ圧縮などを行うプロトコル.

* 12 RTT : 装置間の往復伝送に要する遅延時間であり, 再送時では初回送信と再送を行うまでに要する時間.

に設置される傾向があり、一般ユーザが基地局に不正にアクセスするリスクも増えると予想される。したがって、通信の秘密を遵守するため高いセキュリティが必要なユーザデータやNASのプロトコルに関しては、ドコモの管理する局舎内に設置されるMME/UEに配置することになった。

(1)~(3)以外にも、冗長性や負荷分散を目的としたMME/UEとeNB間のプーリング機能^{*13}、基地局間通信をサポートするトランスポートネットワークレイヤ、MBMS (Multimedia Broadcast Multicast System)^{*14}やLCS (LoCation Service)^{*15}技術をサポートするためのネットワーク同期などに関して検討を進めている。

3.2 チャンネル構成のシンプル化

従来の3Gシステムでは回線交換をベースとし、かつパケット交換にも対応できるよう、複数種のチャンネルを用いて逐次チャンネルを切り替えて使用していた(図7)。ここで論理チャンネルとは、伝送情報を用途ごとに区分するチャンネルであり、報知情報用の報知チャンネル(BCCH: Broadcast Control CHannel)、移動端末個別制御信号用の個別制御チャンネル(DCCH: Dedicated Control CHannel)、ユーザデータ用の個別通信チャンネル(DTCH: Dedicated Traffic CHannel)、マルチキャスト・ブロードキャストデータ用のMTCH (MBMS Traffic CHannel)などのチャンネルがある。一方、トランスポートチャンネルはこれらの論理チャンネルを物理チャンネルへ対応付けるためのチャンネルであり、共有チャンネル(DL/UL SCH)や上りのランダムアクセス(RACH: Random Access CHannel)に対応するチャンネルなどがある。これに対して、Super 3Gは前述のとおりパケット交換を対象としたシステムであり、パケット伝送に最適

化しつつ、さまざまなQoS (Quality of Service) に対応可能とするため、ほとんどのサービスや制御情報を図7のようにSCHを用いて伝送する方向で検討が進んでいる。これによりチャンネルの種別数を減らすことができ、システムのシンプル化や制御負荷の軽減を図ることができる。

チャンネル種別数が減ることでチャンネル種別間の遷移パターンも減らすことができる。具体的には、3GシステムではRRC状態が定義されており(図8)、移動端末は無線リソースの利用効率を高く保つ目的で通信トラフィック量に応じて各状態を切り替えながら通信していた。一方、Super 3GシステムではRRC_IDLEとRRC_CONNECTEDの2状態に状態数が削減されたため、状態遷移に伴う処理負荷軽減および処理遅延の低減を図ることができる。

3.3 シグナリングの最適化

制御遅延の短縮化およびシステムのシンプル化を目的として、従来の3Gシステムにおける制御信号や信号手順の冗長性を排除し、各種制御信号を可能な限り短くかつ少ない信号数とする方法が検討されている。具体的には、QoSのネゴシエーションが不要なベアラを定義し、このベアラ上で早期に信号伝送を開始すること、移動端末とコアネットワーク間の制御信号(NAS)と無線制御信号(RRC)との一括伝送などが提案されている。このような改善を行うことで、データ送受信までの接続設定時間を従来の3Gシステムより格段に短縮することができる。従来ではRRCとNASの信号は独立なものとして、順番に送受信していたのに対し、例えば、図9(b)のようにRRCとNASの信号を一括伝送することで、ネットワークと移動端末間の往復信号数を2往復程度に削減することを目標としている。

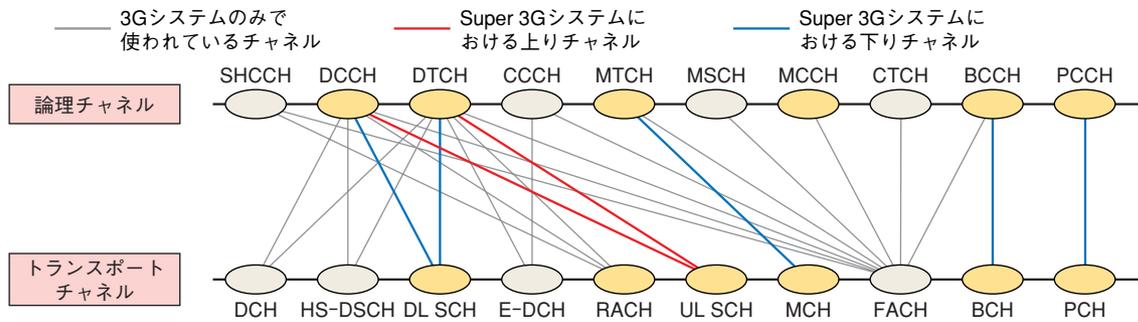


図7 3GとSuper 3Gシステムにおけるチャンネル構成

*13 プーリング機能: 複数の装置と接続性を有し、呼ごとに接続先を変更可能とする機能。

*14 MBMS: マルチメディアデータを不特定多数の相手に配信するブロードキャスト、または特定した相手に配信するマルチキャストを行うシステム。

*15 LCS: 移動端末の位置を特定するサービス。

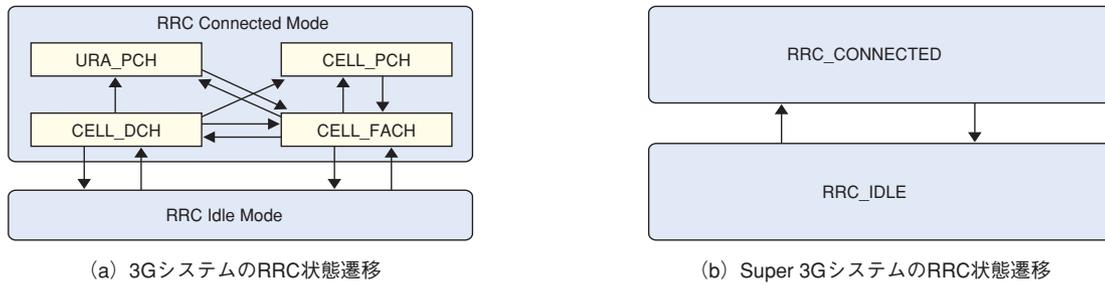


図8 3GとSuper 3GシステムにおけるRRC状態

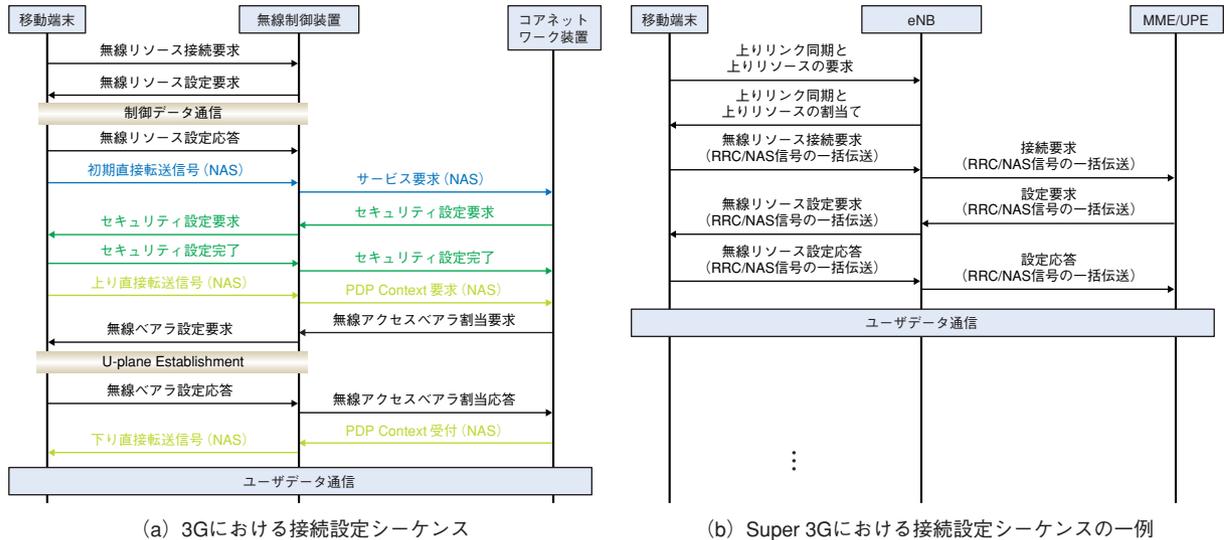


図9 接続設定シーケンスの一例

4. あとがき

Super 3Gは、4Gへのスムーズなマイグレーションを可能とするとともに、3G技術が長期的に発展することにより、3Gスペクトラムを長期にわたって効率的に使用し、競争力を維持し続けることに大きな意義がある。今後、さまざまな新しい技術・システムが生まれ、携帯電話システムと競

合・協調の場面も想定される。移動通信事業者としては、現在運用しているスペクトラムおよび将来移動端末に割り当てられるスペクトラムの効率的使用が重要である。3Gと3Gの発展を本流として技術開発と事業運営を進めていく中でSuper 3G、4Gの流れが大きな役割を果たすことになる。