

LTE-Advancedのさらなる発展に向けて —Release12 標準化動向—

# LTE-Advanced Release 12 における 高次多値変調／スモールセル検出／干渉制御技術

近年、トラフィックの急増へ対応するため、低送信電力のスモールセルを活用したネットワーク容量の拡大技術がさかんに検討されている。しかし、スモールセルを高密度に設置した場合など、セル間の干渉が増大し、期待する容量拡大効果が得られにくくなる課題がある。本稿では、LTEのRelease 12仕様で新たに導入された高次多値変調技術、スモールセル検出技術、およびセル間干渉制御・除去技術について解説する。

先進技術研究所 5G推進室

武田 和晃 (たけだ かずあき) 原田 浩樹 (はらだ ひろき)

佐野 洋介 (さの ようすけ)

ドコモ北京研究所

劉 (リュウ) 柳 (リュウ)

## 1. まえがき

近年、スマートフォン・タブレット端末の普及や高精細動画サービス・ビデオ通話などの広がりに伴う急激なモバイルデータトラフィックの増加に対応するため、セルの高密度化、特に低送信電力のスモールセル\*1を活用したネットワーク容量の拡大技術がさかんに検討されている。スモールセル環境では、セルあたりのユーザ数が少ない、基地局からの直接波が受信しやすい基地局近傍など（以下、見通し環境と呼ぶ）では受信品質が非常に高い、低モビリティのユーザのみを収容するとい

た、従来のマクロセル\*2環境とは異なる特徴がある。また、ネットワーク容量を拡大するためセルの高密度化が進むと、隣接セル間の干渉が増大し、期待する容量拡大効果が得られにくくなってしまいう課題がある。一方、高速伝送を実現するMIMO (Multiple Input Multiple Output)\*3空間多重の適用により、自セル内においては、送信ストリーム間の干渉が問題となる。そのため、スモールセル間、およびスモールセルとマクロセル間の干渉に加えて、マクロセル内における干渉低減について検討されている。

本稿では、3GPP LTE Release 12

（以下、Rel.12）仕様にて新たに導入された高次多値変調技術、スモールセル検出技術、およびセル間干渉制御・除去技術について解説する。

## 2. SCE技術

### 2.1 SCEシナリオ

Rel.12仕様として策定されたLTE-Advancedにおいて、スモールセルに関する要求条件が規定され[1]、SCE (Small Cell Enhancement) に関する基本検討 (SI : Study Item) が2013年1月のRAN (Radio Access Network)\*4 WG (Working Group) 1で開始された。また、SCEを評価する上で想定するシナリオについて

©2015 NTT DOCOMO, INC.  
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

\*1 **スモールセル**：マクロセル基地局と比較して送信電力が小さい基地局がカバーする通信可能エリアの総称。

\*2 **マクロセル**：1つの基地局がカバーする半径数百メートルから数十キロメートルの通信可能エリア。

\*3 **MIMO**：同一時間・周波数において、複数の送受信アンテナを用いて信号伝送を行

い、通信品質および周波数利用効率の向上を実現する信号伝送技術。

\*4 **RAN**：コアネットワークと移動端末の間に位置する、無線基地局および無線回線制御装置などで構成されるネットワーク。

は、オペレータ間でさらに具体化するための議論が行われ、連名で寄書が提出された[2]。これをベースに以下の4つのシナリオが合意された。

- ①シナリオ #1 (同周波/屋外環境下)
  - ・オーバレイしたマクロセル配下に設置
  - ・屋外設置
  - ・マクロセルと同一の周波数キャリアを使用
- ②シナリオ #2a (異周波/屋外環境下)
  - ・オーバレイしたマクロセル配下に設置
  - ・屋外設置
  - ・マクロセルと別の周波数キャリアを使用
- ③シナリオ #2b (異周波/屋内環境下)
  - ・オーバレイしたマクロセル配下に設置
  - ・屋内設置
  - ・マクロセルと別の周波数キャリアを使用
- ④シナリオ #3 (孤立セル環境/屋内環境下)
  - ・オーバレイするマクロセルは存在せず
  - ・屋内設置

上記評価シナリオにおいて、スモールセルに特化した技術提案がオペレータ、ベンダ各社からなされ、特に高次多値変調技術、およびスモールセル間干渉抑圧技術に関するシミュレーション評価が行われた。

これら評価結果は、テクニカルレポート[3]にまとめられ、スモールセルシナリオにおいて、ピークデータレート・容量の増大効果が認められた。これを受け、仕様検討 (WI: Work Item) において、高次多値変調技術の256QAM<sup>\*5</sup> (256 Quadrature Amplitude Modulation) と、Small cell on/offおよびSmall cell discovery技術の仕様策定に至った。

## 2.2 変調方式の高度化

Rel.8~11の仕様では、変調方式としてQPSK (Quadrature Phase Shift Keying)<sup>\*6</sup>、16QAM、および64QAMがサポートされている。変調多値数<sup>\*7</sup> (1シンボル<sup>\*8</sup>で送信できるビット数) の大きい変調方式は、受信信号対雑音および干渉電力比 (SINR: Signal-to-Noise plus Interference Ratio) の高い領域で用いることができる。屋内環境や屋外の見通し環境に設置されたスモールセルでは受信SINR<sup>\*9</sup>が高くなるため、変調多値数の大きい変調方式の利用可能性が、従来のマクロ環境下と比較してさらに高くなる。そこで、Rel.12では、ピークデータレートの向上を期待して、1シンボル当り最大8bitを送信することができる256QAMが、下りリンク向けに新たに導入された。具体的には、受信SINRに対応したユーザ端末 (UE) からのCQI (Channel Quality Indicator)<sup>\*10</sup>報告に基づいて、基地局ではこれら変調方式と誤り訂正符号の符号化率<sup>\*11</sup>との組合せであるMCS

(Modulation and Coding Scheme)<sup>\*12</sup>を決定する。ただし、256QAMを導入する際に、CQIによる上りリンクのフィードバック情報量、およびMCSを通知する下り制御情報量の増大を避けるため、図1に示すように、既存のCQIおよびMCSの一部を256QAMに対応したCQIおよびMCSに置き換えている。結果として、256QAMを含むCQI/MCS表および含まないCQI/MCS表がサポートされることになり、これらは上位レイヤ信号により切り替えられる。例えば、UEの受信品質測定結果に基づいて、その結果があらかじめ決められたしきい値よりも良い場合は、256QAMを含むCQI/MCS表を設定する。こうすることで、受信品質の良好な屋内および見通し環境で256QAMを利用可能とし、高いピークスループットを実現することができる[4]。

## 2.3 Small cell on/offおよびSmall cell discovery技術

### (1)課題

Rel.12 SCEでは、Rel.10/11におけるHetNet (Heterogeneous Network)<sup>\*13</sup>よりも高密度にスモールセルを集中配置するシナリオが想定され、そのような高密度スモールセルの効率的な運用を促進する技術が検討された。高密度スモールセル環境では、従来のマクロセル環境と比べて各セルのカバーエリアが狭いため、図2に示すように一部のスモールセルにトラフィックが偏るような状況

\*5 QAM: デジタル変調方式の1つで、波の振幅と位相をビット列に対応させている。定義されるパターン数に応じて16QAM、64QAMなどの種類がある。

\*6 QPSK: デジタル変調方式の1つ。位相の異なる4つの信号を組み合わせることでより、同時に2ビットの情報を送信可能。

\*7 変調多値数: データ変調における信号位相

点の数。例えば、QPSKの場合は4、16QAMの場合は16である。

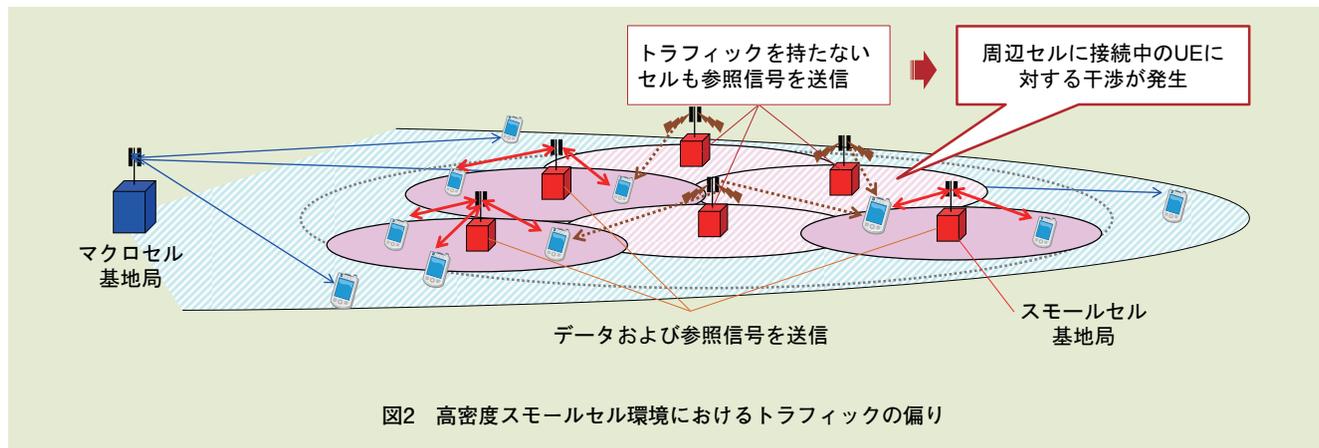
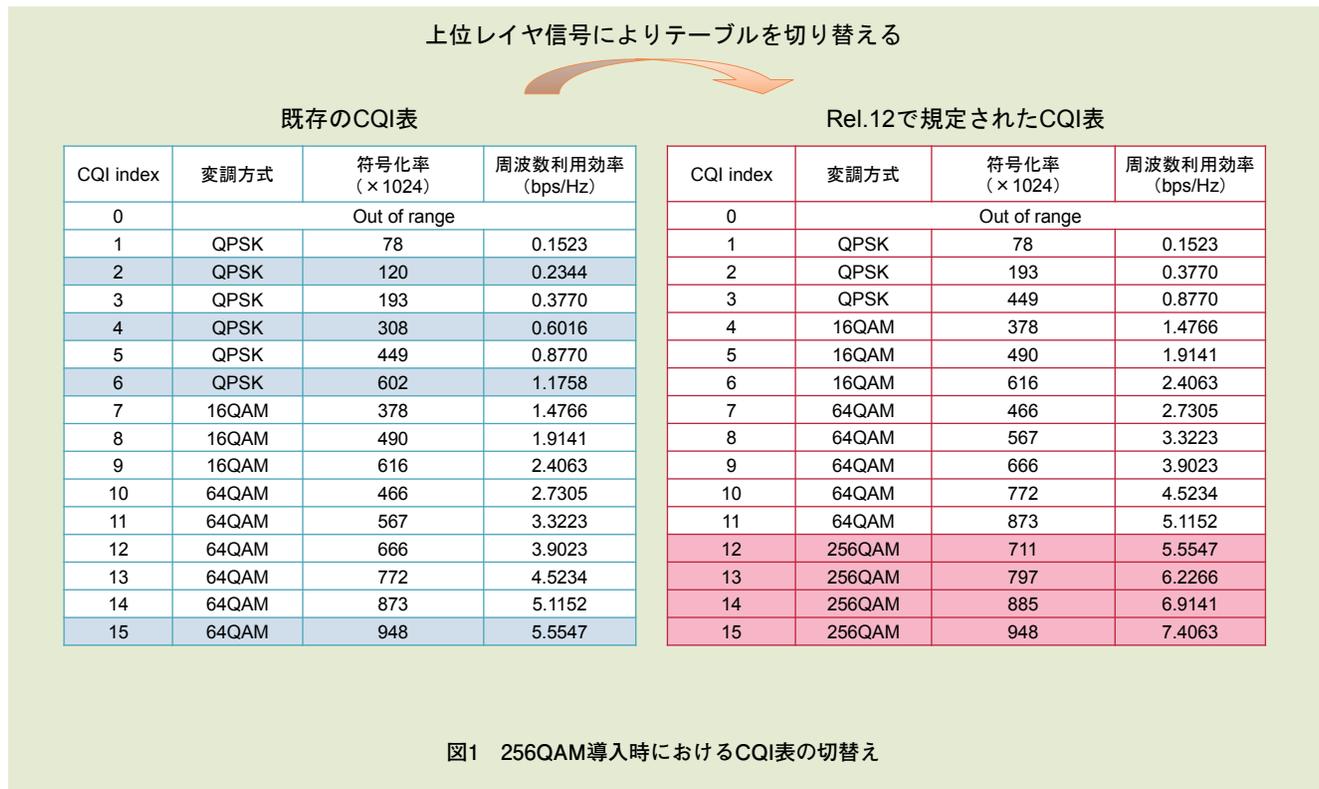
\*8 シンボル: 伝送するデータの単位であり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各サブキャリアには複数のビット (例えばQPSKなら2bit) がマッピングされる。

\*9 受信SINR: 所望波信号の受信信号電力と、

それ以外の干渉波信号と雑音電力の和の比。

\*10 CQI: 移動局で測定された下りリンクの伝搬路状況を表す受信品質指標。

\*11 符号化率: 情報ビット数と、その情報ビットを誤り訂正符号化した後のビット数との比。例として、符号化率が3/4の場合は、情報ビット数3に対し、誤り訂正符号化により4ビットを生成する。



がたびたび生じ得る。そのような状況においてもUEによるセルの発見および受信品質測定がいつでもできるよう、トラフィックがないセルもSS (Synchronization Signal), CRS (Cell-specific Reference Signal)<sup>\*14</sup> およびシステム情報などの制御情報

を送信し続けており、特に毎サブフレームで送信されるCRSは周辺セルでの下りリンク通信への大きな干渉となる。セルの高密度化を進めていった場合、このCRS送信によるセル間干渉が増大し、スモールセルの導入による容量増大効果が得られに

くなくなってしまうという課題がある。(2)Small cell on/offおよびSmall cell discovery技術  
この課題を解決するため、Rel.12 SCEでは図3に示すようにトラフィックを持たないセルの参照信号送信を停止することにより、周辺の通信中

\*12 MCS：適用変調を行う際にあらかじめ決めておく変調方式と符号化率の組合せ。  
\*13 HetNet：電力の違うノードがオーバーレイするネットワーク構成。従来のマクロ基地局のエリア内に、より送信電力の小さいピコ基地局、フェムト基地局、リレー基地局などが重畳配置されるネットワーク。  
\*14 CRS：下りリンクの受信品質測定などに用

いられる各セル固有の参照信号。

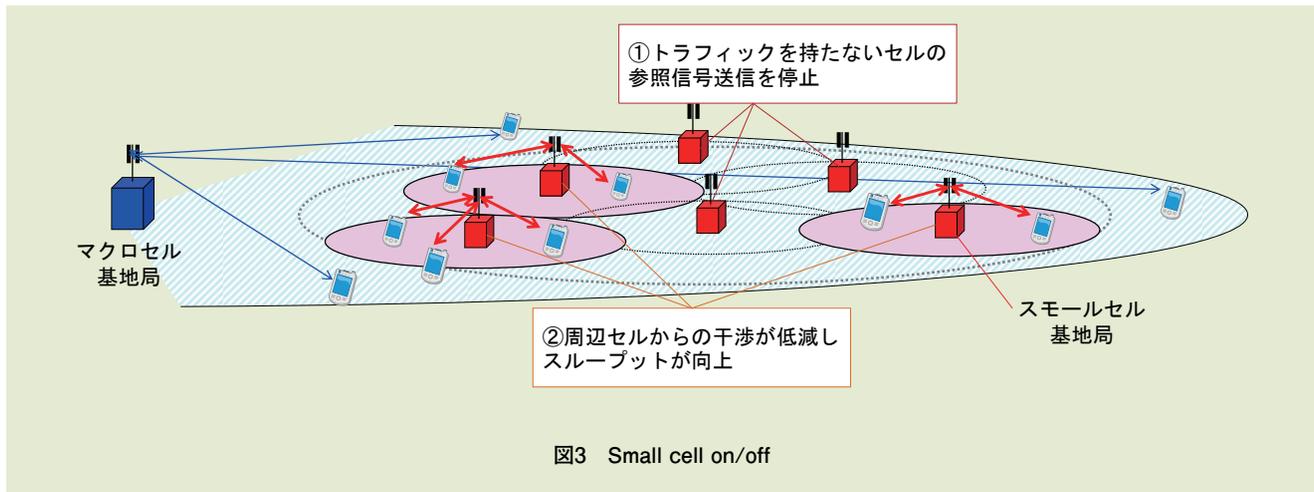


図3 Small cell on/off

UEに対する干渉を低減しスループットを向上させるSmall cell on/off技術が規定された[5]。しかし、OFF状態となったスモールセルがSSやCRSの送信を完全に停止してしまうと、UEはOFF状態のセルを検出し、受信品質を測定することができない。すなわち、通信中のUEがOFF状態のセルに近づいたときには、セルを素早くON状態に戻し、UEとの通信を確立する必要があるが、UEがOFF状態のセルを検出できていないと、通信を開始するまでに長い接続遅延時間（Transition time）が必要となってしまう。そこで、UEがSmall cell on/offを行っているスモールセルを効率的に発見できるようにするため、セル発見用信号（Discovery signal）を用いるSmall cell discovery技術が併せて規定された。図4にDiscovery signalを用いるSmall cell on/offの概要を示す。

Small cell on/offを適用するスモールセルは、40ms以上の長周期でDiscovery signalを送信する。Dis-

covery signalはセルがOFF状態でも送信されるため、UEはOFF状態のセルに近づくと、そのセルを発見しネットワークへ報告を行う。これにより、適切なタイミングでセルをON状態へ移行することが可能となり、UEがそのセルと通信を開始するまでの遅延時間（Transition time）を最小限に抑えることができる。また、Discovery signalを長周期送信とすることで、OFF状態のスモールセルからのDiscovery signal送信が周囲のセルに与える干渉は、Small cell on/offを適用していない時に全サブフレームで送信されるCRSによる干渉と比較し、非常に小さく抑えられる。

Discovery signalはSSおよびCRSが周辺スモールセル間で同期して長周期で送信される構成となっているが、UEには接続中のセル（例えばマクロセル）からのアシスト情報として、Discovery signalの送信周期および基準サブフレームからの送信タイミングオフセットが通知される。

これにより、UEは周辺の複数スモールセルからのDiscovery signalを受信するために行う、受信信号観測のタイミングを限定することが可能となり、バッテリー消費などの負担を抑えることができる。また、複数のスモールセル間に同一のセルID<sup>\*15</sup>を適用する共用セルID運用を効率的にサポートするため、SSおよびCRSに加え、CSI-RS（Channel State Information-Reference Signal）<sup>\*16</sup>をDiscovery signalに含めて長周期で送信することが規定された。セルIDを共用するスモールセル間では同一のSSおよびCRSが用いられるため、セルIDに応じて送信リソースが決定されるCRSについては周辺スモールセルのCRSとデータ信号との衝突がなくなり、CRS干渉を回避することができる。一方、UEは各スモールセルをSSおよびCRSによって識別・測定することができなくなる。そのため、Discovery signalとして個別のCSI-RSパターンを各スモールセルから送信させることに

\*15 セルID：セルごとに付与される識別情報。

\*16 CSI-RS：無線チャネルの状態を測定するためにアンテナごとに送信される参照信号。

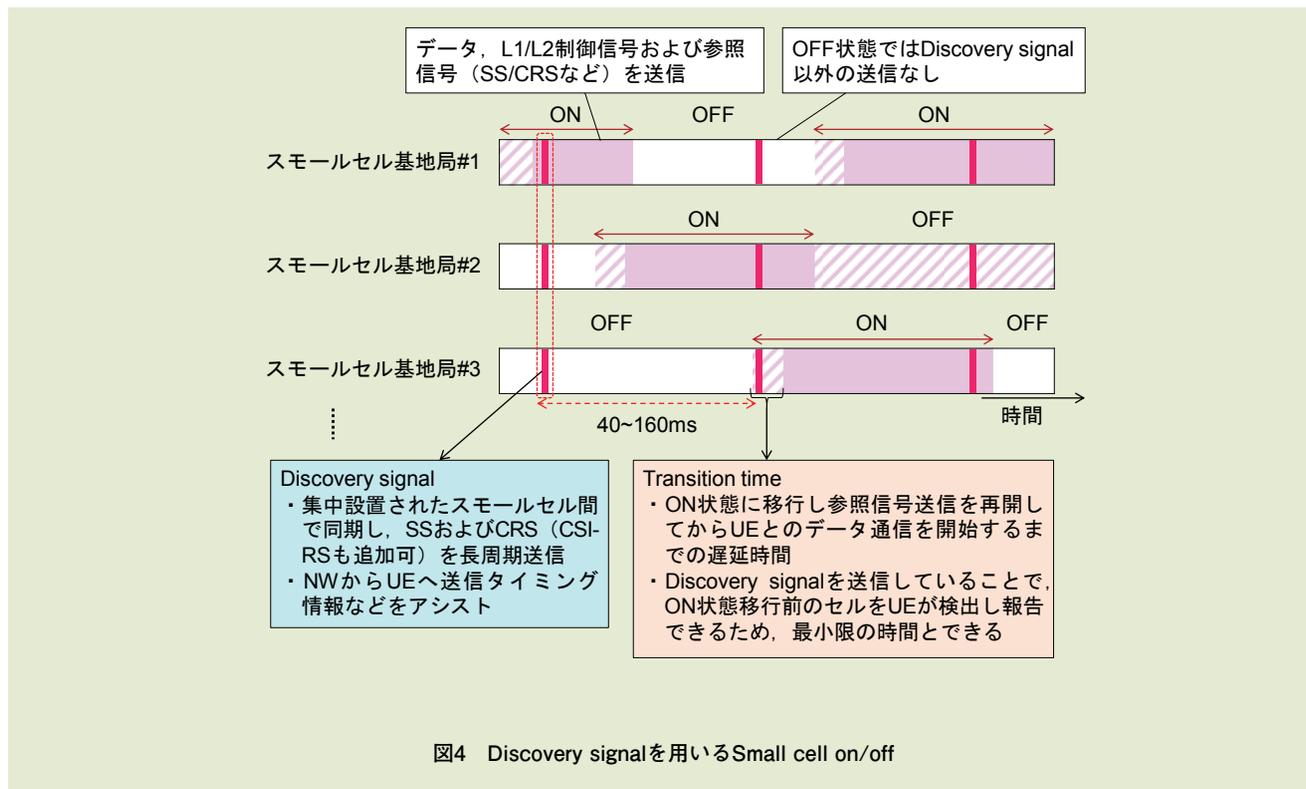


図4 Discovery signalを用いるSmall cell on/off

よって、UEが個々のスモールセルを識別し、受信品質を測定することができる[6].

### 3. 移動機における干渉除去技術

マクロセルの高密度化により、図5に示すように、隣接するマクロセルからの干渉信号が増大している。また、2.1節で述べたSCEシナリオ#1のような運用形態においては、マクロセルとスモールセル間の干渉はさらに大きくなるのが想定される。一方、同じく図5に示すとおり、接続基地局近傍では隣接セルからの干渉は小さくなるが、スループット向上のためMIMO空間多重の適用が想定されることから、送信ストリーム

間の干渉が問題となる。

Rel.12では、上記の隣接セル間干渉、および送信ストリーム間干渉の低減のため、NAICS (Network Assisted Interference Cancellation and Suppression) 受信機、およびSU-MIMO (Single User-MIMO) 受信機の適用がそれぞれ検討された。

#### 3.1 隣接セル間干渉を低減するNAICS受信機

(1)従来のMMSE/MMSE-IRC受信機

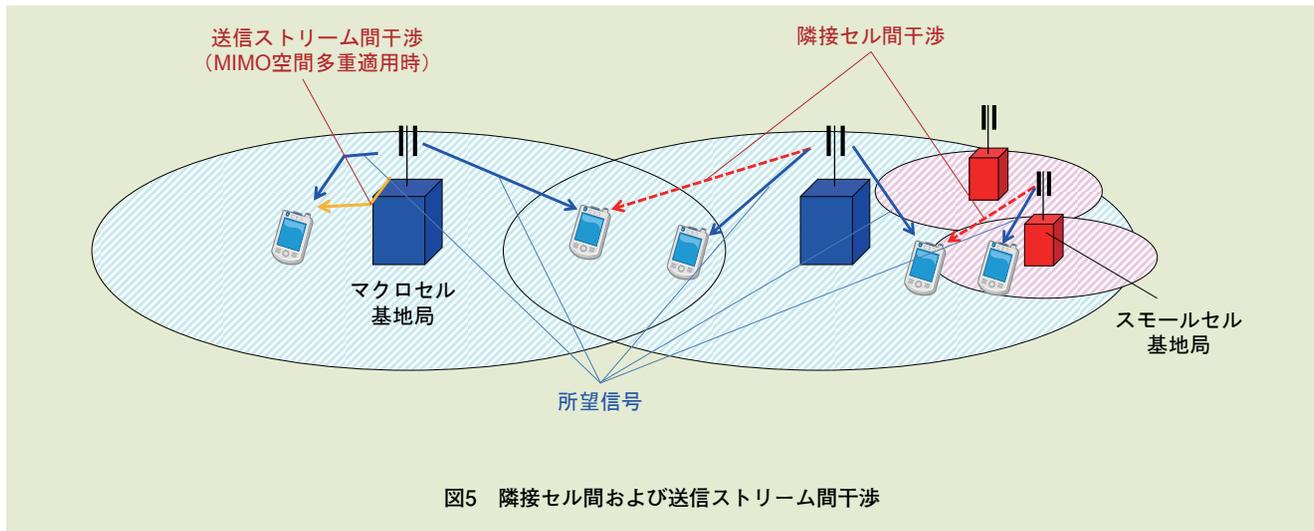
Rel.8の仕様では、最小平均二乗誤差規範 (MMSE: Minimum Mean Squared Error) \*17に従ったMMSE受信機を想定して移動機の性能規定が策定されているが、ここにおいて標準となるMMSE受信機では、隣接

セルからの干渉信号の影響を移動機における雑音と等価であると仮定して受信処理を行うため、それ自体を抑圧することができない。そのため、特にセル境界のような高干渉エリアでは、隣接セルからの干渉によりスループットが制限されてしまう。そこで、Rel.11の仕様では、隣接セルからの干渉の影響を低減するため、干渉抑圧合成 (MMSE-IRC (Interference Rejection Combining) \*18) 受信機が検討され[7]、このMMSE-IRC受信機を想定した性能規定が策定された[8]。MMSE-IRC受信機は、複数の受信アンテナを利用して、干渉信号の到来方向に対してアンテナ利得\*19の落ち込み点 (ヌル) \*20を作ることによって干渉信号を抑圧することが

\*17 最小平均二乗誤差規範 (MMSE) : 平均二乗誤差を最小とるように信号を復調する方法。

\*18 IRC : 干渉信号の到来方向に対して、アンテナ利得の落ち込み点を作り干渉信号を抑圧する方法。

\*19 アンテナ利得 : 基準アンテナに対する放射電力の比。



でき、主にセル境界近傍のスループットを改善することができる[9]。また、Rel.8をベースとしたネットワークであれば、特に基地局側の設定を変更せずに利用できるという利点も有している。

## (2) NAICS受信機の特長

一方、Rel.12におけるNAICS受信機では、セル境界近傍におけるさらなるスループット改善のため、より高度な干渉除去技術の適用が検討された。具体的には、MMSE-IRC受信機と比較して、一層の干渉低減効果が期待される逐次干渉キャンセラ (SIC: Successive Interference Cancellation)<sup>\*21</sup> [10]、および最尤推定法 (MLD: Maximum Likelihood Detection)<sup>\*22</sup> [11]の適用が検討された。ただし、移動機側でこれらの受信処理を適用するためには、干渉信号を一度送信シンボルレベルまで復調させる必要がある。例えば、SICの場合では、シンボルレベルまで復調した干渉信号と推定したチャネル

行列<sup>\*23</sup>を用いて干渉レプリカ信号を生成し、これを受信信号から減算することで、干渉信号を効果的にキャンセルする。しかし、Rel.8~11の仕様に準拠した基地局では、干渉信号の復調のために必要な隣接基地局の制御情報が移動機側へシグナリング<sup>\*24</sup>されないため、上記のような受信処理は困難である。したがって、NAICS受信機では、接続基地局から移動機に対し、干渉信号の送信シンボルレベル<sup>\*25</sup>の復調を可能とするため、隣接基地局の制御情報をシグナリングする機能が新たにサポートされた[12]。ただし、シグナリングオーバーヘッドを低減するため、隣接基地局における一部の制御情報 (物理セルIDやCRS情報など)のみがシグナリングされ、不足する情報を移動機側で推定する構成となっている。よって、上記のシグナリングや移動機の推定により得られた隣接基地局の制御情報を用いることにより、干渉信号に対するSICもしくはは

MLDの適用が可能となり、隣接セルからの干渉信号を一層効果的に低減することができる。

## (3) NAICS受信機によるスループット改善効果

NAICS受信機によるスループット改善効果を図6に示す。ここでは、マクロセル環境を想定し、干渉信号電力レベルと雑音電力レベルの比 (INR: Interference-to-Noise power Ratio) が十分に大きい2つの隣接セルがあるケースを前提に模擬している。また、所望信号については、セル境界近傍におけるMIMO送信ダイバーシチ<sup>\*26</sup>を想定し、符号化変調方式をQPSK (符号化率1/3)とした。一方、干渉信号については、MIMO空間多重および64QAMを想定した。これにより、NAICS受信機は、既存のMMSE-IRC受信機と比較して、最大スループットに対する70%値を達成するための所要受信SINRを約1.0dB程度 (スループット特性で約10%程度) 改善できることがわ

\*20 ノル: ビームパターンにおいて、アンテナ利得が極小となる方向。

\*21 干渉キャンセラ (SIC): 複数の信号が合成された受信信号から1つずつ信号を検出、キャンセルしながら信号分離を行う方法。ZF (Zero Forcing) やMMSEによる検出法よりも高い性能を有する。

\*22 最尤推定法 (MLD): 受信した信号と受信

される可能性のある信号の系列すべてと比較し、受信信号のパターンに最も近い組合せを見つけ出す方法。

\*23 チャンnel行列: 各送信アンテナと、受信アンテナ間の伝搬路 (チャネル) の振幅および位相の変動量で構成される行列。

\*24 シグナリング: 基地局と移動局間で、通信に必要な情報 (例えば帯域幅や符号化

変調方式など) を事前に共有すること。

\*25 送信シンボルレベル: デジタル変調された信号 (シンボル) のこと。ここでは、受信した信号を、デジタル変調された信号まで復調することを意味する。

\*26 送信ダイバーシチ: 送信アンテナ間のチャネルの変動の違いを利用してダイバーシチ利得を得る技術。

かる。

### 3.2 送信ストリーム間干渉を低減するSU-MIMO受信機

(1)従来のMMSE受信機およびSU-MIMO受信機の特長

Rel.8の仕様では、MIMO空間多重適用時の移動機の性能規定は、前述したMMSE受信機を想定して策定されている。MMSE受信機は、3.1節に記載したとおり、隣接セル間干渉は抑圧できないが、MIMO空間多重適用時には、複数の受信アンテナを利用して送信ストリーム間干渉を抑圧することができる。

Rel.12におけるSU-MIMO受信機では、上記の送信ストリーム間干渉をさらに高度な受信処理により低減し、基地局近傍にある移動機のスループットを改善することが検討された。具体的には、MIMO空間多重時の送信ストリーム間干渉をMLDにより低減することを想定した移動機の性能規定が策定された[8]。なお、SU-MIMO受信機はMMSE-IRC受信機と同様、Rel.8をベースとしたネットワークであれば特に基地局側の設定を変更せずとも適用可能な技術であり、NAICS受信機のような新たなシグナリングは規定されていない。

(2)SU-MIMO受信機によるスループット改善効果

SU-MIMO受信機によるスループット改善効果を図7に示す。ここでは、所望信号は接続基地局近傍を

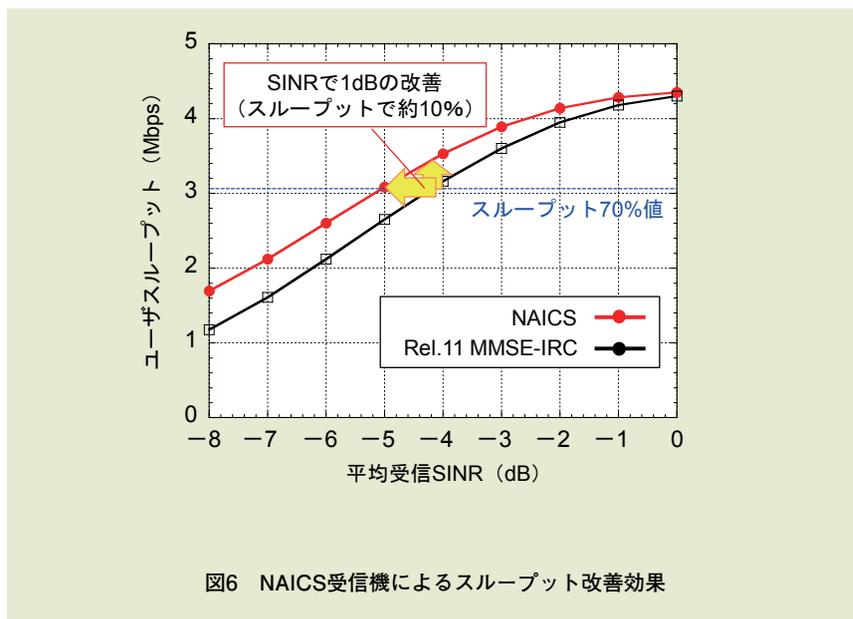


図6 NAICS受信機によるスループット改善効果

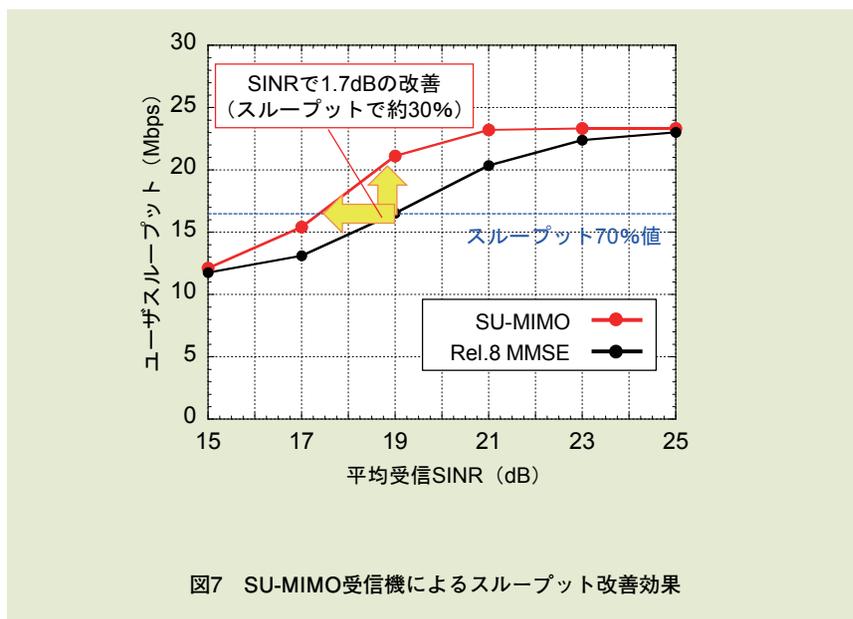


図7 SU-MIMO受信機によるスループット改善効果

想定してMIMO空間多重を適用し、また符号化変調方式は16QAM (符号化率1/2) を想定している。また、隣接セルから到来する干渉はすべて雑音と等価であると仮定している。これにより、SU-MIMO受信機は、既存のMMSE受信機と比較して、

所要受信SINRを約1.7dB程度 (スループット特性で約30%程度) 改善できることがわかった。

## 4. あとがき

本稿では、ユーザスループット\*27、およびネットワーク容量増大を実現

\*27 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。

する技術として、LTE-AdvancedのRel.12仕様で導入された高次多値変調技術、スモールセル検出技術、およびセル間干渉制御・除去技術について解説した。今後もモバイルトラフィックの増加に対応すべく、ユーザスループット、および容量増大を実現する無線インタフェース技術の標準化を推進していきたい。

#### 文 献

- [1] 3GPP TR36.932 V12.1.0: "Scenario and requirements for small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN (Release 12)," Mar.2013.
- [2] NTT DOCOMO, Deutsche Telekom, KDDI, Telefonica, Telianonera, T-Mobile USA: "Scenario and migration for small cell enhancement," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #72 R1-130659, Jan.-Feb. 2013.
- [3] 3GPP TR36.872 V12.1.0: "Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects (Release 12)," Dec. 2013.
- [4] Q. Mu, L. Liu, H. Jiang and H. Kayama: "Small Cell Enhancement for LTE-Advanced Release 12 and Application of Higher Order Modulation," 11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services, Vol.131, pp.794-805, Dec. 2014.
- [5] 武田 和晃, 姜 宇, 原田 浩樹, 石井 啓之: "LTE-Advancedにおけるスモールセル検出用信号を用いるセル間干渉抑圧技術に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.113, No.361, pp.59-64, Dec. 2013.
- [6] 原田 浩樹, 武田 和晃, 永田 聡, 石井 啓之, 岸山 祥久: "LTE SCEにおけるマクロセルとの連携を活用した効率的なスモールセル検出法のためのセル検出用信号に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.113, No.361, pp.53-58, Dec. 2013.
- [7] 3GPP TR36.829 V11.1.0: "Enhanced performance requirement for LTE User Equipment (UE)," Jan. 2013.
- [8] 3GPP TS36.101 V12.7.0: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception," Jan. 2015.
- [9] 寒河江, ほか: "LTE Release 11仕様における移動機干渉除去・抑圧技術の高度化," 本誌, Vol.21, No.2, pp.26-29, Jul. 2013.
- [10] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden and R. Valenzuela: "V BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel," in Proc. ISSSE, pp.295-300, Sep. 1998.
- [11] A. van Zelst, R. van Nee and G. A. Awater: "Space division multiplexing (SDM) for OFDM systems," in Proc. IEEE VTC 2000-spring, pp.1070-1074, May 2000.
- [12] 3GPP TS36.331 V12.4.1: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification," Jan. 2015.