ヘテロジニアスネットワーク

Heterogeneous Network

大塚裕幸 Hiroyuki Otsuka†

Summary

近年、モバイルデータトラフィックが急増している。その対策として、マクロセル内にピコセルを重畳しトラフィックをピコセルにオフロードするヘテロジニアスネットワーク (HetNet) があり、5G においても重要な技術として期待されている。本論文では、まず HetNet の基本的な仕組みと特徴について述べる。次に、HetNet の問題点を克服する技術として、ユーザ端末をピコセルへ積極的にオフロードするセル範囲拡張技術 CRE、及びマクロとピコセル間の干渉を低減する干渉制御技術について述べる。また、システムレベルシミュレーションの結果を用いて、HetNet 及び CRE によるユーザスループットの改善効果を示す。

Key Words

トラフィックオフロード、セル範囲拡張、干渉制御、ユーザスループット、高周波数帯

1 はじめに

スマートフォン及び動画画像アプリの普及により、モバイルデータのトラフィックは近年急速に増加しており、今後もこの伸びは続くと考えられている。このモバイルデータトラフィックを効率良く最も単純に処理する技術としてヘテロジニアスネットワーク (HetNet: Heterogeneous Network) がある。HetNet はマクロ基地局が管理するマクロセル内に、マクロ基地局に比べて送信電力が小さいピコ基地局を重畳する。これによりマクロセル内のトラフィックをピコ基地局にオフロードすることを目的とする⁽¹⁾。

無線周波数の側面から見ると、マクロセルとピコセルの周波数が同じ場合 (以下、シングルバンド HetNet と呼ぶ) と、周波数が異なる場合 (以下、マルチバンド HetNet と呼ぶ) に大別することができる。どちらの場合も、マクロ基地局とピコ基地局の無線リソースは独立であり、マクロセル内のピコ基地局の数を増やすと無線リソースは増加するため下り回線のユーザ端末 (UE: User Equipment) のスループット (実効通信速度) を向上することができる。したがって、HetNet においてはいかにピコ基地局の無線リソースを有効に活用できるかが重要である。また、HetNet には UE の消費電力を低減できるといった効果も期待できる。マクロセルからピコセルにオフロードした場合、ピコセルの半径はマクロセルのそれより小さいので、上り回線にお

ける UE の送信電力は小さくすることができる。

マクロセル内に複数のピコセルが存在する HetNet では、ピコセル間の干渉を防ぐため、ピコ基地局の送信電力はマクロ基地局に比べて小さい。したがって、マクロセル内の UE はピコ基地局に接続されにくい。これに対しては、UE の接続先をピコ基地局に促す技術が重要である。シングルバンド HetNet では、更にマクロセルとピコセル間の干渉も生じる。これに対しては、マクロ基地局からの干渉を低減する技術が重要である。

マルチバンド HetNet の特徴は、マクロセルからピコセルへのオフロードに加えて、マクロセルとピコセルの同時利用による高速通信、すなわちキャリアアグリゲーション (CA: Carrier Aggregation) を実現できることである。UE はマクロ基地局とピコ基地局の両方に接続し、周波数の異なる複数の帯域を同時に利用することができる⁽²⁾。例えば、第 5 世代移動通信システム (5G) においては、既存の周波数帯と 5G の周波数帯である 3.7GHz, 4.5GHz, 28GHz 帯を同時に利用する CA が可能になる。5G のネットワーク構成は 2 種類あり、一つは 5G 単独で構成する SA (Stand Alone)、もう一つは第 4 世代移動通信システム (4G) と 5G が連携する NSA (Non Stand Alone) である⁽³⁾。NSA タイプの 5G では、4G のマクロセルと 5G のピコセルが重畳するネットワーク構成になり、これまで以上に HetNet 技術が重要になると思われる。

2. では HetNet の基本的な仕組みと問題点について述べる。3. では、マクロセルからピコセルへ積極的にトラフィックをオフロードする技術について

† 工学院大学, 東京都
Kogakuin University, Tokyo, 163-8677 Japan

図1 HetNetの基本構成

述べる。また、システムレベルシミュレーションを用いたユーザスループット特性からその効果を説明する。4.ではマクロセルとピコセル間の干渉制御技術について述べる。5.では、2GHz帯マクロセルと28GHz帯3セクターピコセルから成るマルチバンド HetNet の構成を紹介するとともに、そのユーザスループット特性を示す。

2 HetNet の仕組みと問題点

図1に HetNet の基本構成を示す。大電力のマクロ基地局が管理するマクロセル内に複数の小電力のピコ基地局が管理するピコセルを配置し、マクロセルからピコセルにトラフィックをオフロードすることにより UE のユーザスループットを向上することができる。通常のセルラ方式では、マクロ基地局間は X2 インタフェースで接続されている。HetNet においてもマクロ基地局とピコ基地局間は X2 インタフェースにより接続されている⁽¹⁾。また、HetNet においてはマクロセルとピコセル間を横断するハンドオーバー機能が保証されている。例えば NSA タイプの 5G では 4G の基地局がこの機能をつかさどる。

UE がマクロセルとピコセルのどちらの基地局に接続されるかを理解することは重要である。基本は図2の接続シーケンスに従って UE の接続先を決定する。まず UE がマクロ基地局及びピコ基地局からの下り制御信号を受信する。次に、UE はそれらの受信電力 (RSRP: Reference Signal Received Power), すなわち $RSRP_{pico}$ と $RSRP_{macro}$ の結果をマクロ基地局に報告し、マクロ基地局はそれらの結果を基にその UE の接続先を決定する。あるいは

図2 HetNetにおける接続シーケンス

UE で受信した信号の信号対雑音干渉電力比 (SINR: Signal-to-Interference plus Noise Ratio) の結果を基に接続先を決定する。

しかしながら、ピコ基地局の送信電力はマクロ基地局に比べて小さいため、トラフィックオフロードの目的でピコ基地局を追加したのにもかかわらず UE がピコ基地局に接続されにくいといった問題がある。

また、シングルバンド HetNet におけるマクロセルとピコセル間の干渉という側面からみると、例えばピコ基地局に接続されている UE はマクロ基地局から下り回線の干渉を受け、その UE の受信 SINR が小さくなりスループットが低下するといった問題

がある。このように、マクロセルとピコセル間の干渉管理が重要である。

3. と 4. に、これらの問題を克服する技術を紹介する。

3 ピコセルの拡張技術

マクロとピコ基地局間の送信電力の差によって UE がピコ基地局に接続されにくいといった問題を解決する技術として、セル範囲拡張 (CRE: Cell Range Expansion) 技術がある^{(1), (4)}。図 3 にその CRE 技術の原理を概略的に示す。この CRE 技術は、まずセル選択をする段階で UE に対してピコ基地局からの下り制御信号電力に正のオフセット値 (CSO: Cell Selection Offset) を加える。次に、その CSO を加えたピコ基地局からの下り制御信号電力とマクロ基地局の下り制御信号電力とを比較することにより UE の接続先を決定する。すなわち CRE はより多くの UE をピコセルにオフロードする技術である。したがって、図 3 に示すように CRE によって見掛け上のピコセルのエリアが大きくなる。例えば、マクロセル内のトラヒックが増加したとき、ネットワーク (あるいはマクロ基地局) がマクロセルに存在する UE に CRE を発動し、ピコ基地局からの下り制御信号電力に正の CSO を加えた $RSRP_{pico}$ と通常のマクロ基地局からの下り制御信号電力から得られる $RSRP_{macro}$ を比較することにより、UE の接続先を決定する。しかしながら、CRE は見掛け上の受信電力を用いて接続先を決定するため、CRE によってピコ基地局に接続された一部の UE はマクロ基地局から非常に大きい下り回線の干渉を受ける。したがってその UE はピコセルの無線リソースを活用できるが、その受信 SINR は悪くな

表 1 主なシミュレーション諸元

項目	マクロ基地局	ピコ基地局
セル構成	19 マクロセル, 3 セクタ / マクロセル	4 ピコ基地局 / マクロセクタ
無線周波数	2 GHz	
信号帯域幅	10 MHz	
セル半径 (ISD)	289 m (500 m)	—
送信アンテナ高	32 m	10 m
送信電力	46 dBm	30 dBm
送信アンテナ利得	14 dBi	5 dBi
アンテナダウンチルト角	15 度	0 度
UE, 配置 (分布)	30 UEs / マクロセクタ, 2/3 クラスタ分布	
スケジューリング	プロポーションアルファ	
トラヒックモデル	フルバッファ	
適応変調符号化	15MCS (Modulation and Coding Scheme), QPSK ~ 256-QAM	
MIMO	2x2 シングルユーザ MIMO	

ることが予想される。

次に、シングルバンド HetNet における CRE の効果について述べる。具体的には、大規模なシステムレベルシミュレーションを用いて平均ユーザスループットと下位 5% ユーザスループット (スループットが下位から数えて 5% に位置する UE のスループット) を評価する。表 1 に主なシミュレーション諸元を示す。無線周波数はマクロ、ピコセル共に 2GHz で、帯域幅は共に 10MHz である。また、適応変調符号化においては、高次の変調方式である 256-QAM (Quadrature Amplitude

図3 CRE 技術によるピコセルの拡張

図4 CSOに対する全てのUEを対象とした平均と下位5%のユーザスループット

Modulation) を用いている^{(5), (6)}。

図4にシミュレーション結果を示す。横軸は正のCSOであり、左縦軸はマクロセル内に存在する全てのUEを対象とした平均ユーザスループット、右縦軸は下位5%ユーザスループットを示す。また、比較としてマクロ基地局だけの場合、すなわちホモジニアスネットワーク (HomoNet: Homogeneous Network) の特性も併せて示す。HetNetはHomoNetに比べ大幅にユーザスループットを改善できることが分かる。また、CSOを大きくするに従って平均ユーザスループットは徐々に劣化する。またCSOがある値までは下位5%ユーザスループットが増加し、CSOがその値を超えると大幅に減少する。図5はマクロとピコ基地局に接続されるUEの割合を示しており、CREによりピコ基地局に接続されるUEの割合が増加することが証明されている。図6は、CSOに対するピコ基地局に接続されたUEの平均ユーザスループットを示している。CSOが大きくなると多くのUEがピコセルにオフロードされるが、ピコ基地局に接続されたUEの平均ユーザスループットは徐々に減少することを表している。

CSOの設定方法は、マクロセル内に存在する全てのUEに対して、平均ユーザスループットをなるべく維持しながら下位5%ユーザスループットが最大となるように、ある固定値のCSOを定義するのが一般的である。例えば図4の結果から判断するとCSOは4~6dBが最適値となる。

下位5%ユーザスループットを良くしようとする平均ユーザスループットが劣化するという問題を解決するために、個々のUEに対してそれぞれ最適

図5 CSOに対するUEの接続比率

図6 CSOに対するピコ基地局に接続されたUEの平均ユーザスループット

なCSOが存在するという視点から適応制御型CREが提案されている。固定値のCSOではなく、UEのマクロ基地局からの制御信号の受信SINR特性に応じて2種類のCSOからそれぞれのUEは最適なCSOを選択する、という検討結果が報告されている^{(7)~(10)}。

4 マクロとピコセル間の干渉制御技術

HetNetにおいては干渉の回避が極めて重要であることを2.で述べた。干渉制御技術はこれまで幾つか検討されているが、この章ではシングルバンドHetNetにおけるマクロセルとピコセル間の干渉を時間領域で回避する拡張セル間干渉制御 (eICIC: enhanced Inter-Cell Interference Coordination) 技術について述べる^{(11), (12)}。

図7 eICICの動作原理

基本的な eICIC の動作原理を図 7 に示す。サブフレームはデータ送信する際の基本単位であり、4G の LTE では 1ms で定義されている。灰色のサブフレームは通常を送信データを含み、白色のサブフレームはデータを含まないサブフレームを表している。この白色のサブフレームは ABS (Almost Blank Subframe) と呼ばれ、制御用の信号のみで構成される。この ABS はマクロ基地局に適用され、ピコ基地局に接続されている UE が多くのデータ通信をできるような構成となっている。すなわち、マクロセルからの強い下り回線の干渉を受ける場所に存在しピコ基地局と通信している UE は、マクロ基地局が ABS を送信するタイミング時にはその干渉の影響を受けないでピコ基地局と通信することができる。なお、HetNet に eICIC を適用する場合、マクロセルとピコセルは時間的に同期させる必要があり、またマクロセル側のユーザスループットは低下することになる。

このように、シングルバンド HetNet における eICIC 技術は、マクロ基地局に ABS を適用することによりピコ基地局に接続される UE への干渉を低減し、そのスループットを向上させる技術である。

5 高周波数帯を用いたマルチバンド HetNet

前章までは主にマクロセルとピコセルの無線周波数が同じシングルバンド HetNet について述べた。本章では、マクロセルとピコセルの無線周波数と信号帯域幅が異なるマルチバンド HetNet の構成とその特性評価について述べる。1. で述べたように、5G では高周波数帯での広帯域幅の利用が決定しており、NSA タイプの 5G では 4G のマクロセルと 5G のピコセルが同じエリア内に共存する。

図 8 に、2GHz 帯マクロセルと 28GHz 帯 3 セクターピコセルから成るマルチバンド HetNet の構成を示す^{(13)~(15)}。28GHz 帯を用いた場合、信号の距離減衰が大きくなるため、その信号減衰を補うため送信アンテナ利得の大きいセクタアンテナを適用する。ここでは、ピコセルを 3 セクタ化している。また、マクロ、ピコセルの帯域幅はそれぞれ 10MHz、100 MHz である。

次に、この構成によるマルチバンド HetNet のユーザスループット特性を示す。表 2 に主なシミュレーション諸元を示す。表 2 は表 1 からの変更部分を抽出したものであり、ピコ基地局のアンテナ高は 6m と低くし、送信アンテナ利得はセクタアンテナの効果を見込んで 23dBi としている。図 9 に正の CSO に対するユーザスループットを示す。ピコセルはマクロセルの 10 倍の無線リソースを有して

図8 2GHz 帯マクロセルと 28GHz 帯 3 セクタピコセルから成るマルチバンド HetNet

表2 主なシミュレーション諸元

項目	マクロ基地局	ピコ基地局
セル構成	19 マクロセル, 3 セクタ / マクロセル	4ピコ基地局 / マクロセクタ, 3 セクタ / ピコセル
無線周波数	2 GHz	28 GHz
信号帯域幅	10 MHz	100 MHz
セル半径 (ISD)	289 m (500 m)	—
送信アンテナ高	32 m	6 m
送信電力	46 dBm	22 dBm
送信アンテナ利得	14 dBi	23 dBi
アンテナ ダウンチルト角	15 度	10 度

図9 CSO に対する全ての UE を対象とした平均と下位 5% のユーザスループット

いるため、ピコ基地局に接続された UE のスループットは非常に大きくなる。したがって全ての UE を対象とした平均ユーザスループットも大きくなる。図9の結果から見て分かるように、図4と比べて横軸の正の CSO はかなり大きくしてよいことが分かる。これはマクロセルからの下り回線の干渉がないためであり、ピコ基地局からの制御信号を復号できる限界まで CSO を大きくすることができる。表2の条件では、平均と下位 5% ユーザスループットから CSO は 30~40dB が最適値となることが分かる。

6 おわりに

本論文では、マクロセル内にピコセルを重畳するヘテロジニアスネットワーク HetNet について、その仕組みとそこで利用されるセル範囲拡張技術 CRE、干渉制御技術について解説を行った。また、システムレベルシミュレーションの結果を用いて、HetNet 及び CRE によるユーザスループットの改善効果を示した。

5G においても、4G のマクロセルと高周波帯で広帯域幅を有する 5G のピコセルから成るマルチバンド HetNet は重要な技術であり、その設計法を確立することは重要である。

文献

- (1) 岸山祥久, 内野 徹, 永田 聡, 森本彰人, Y. Xiang, “LTE/LTE-Advanced 高度化におけるヘテロジニアスネットワーク容量拡大技術,” NTT ドコモテクニカルジャーナル, vol.21, no.2, pp.10-17, July 2013.
- (2) 内野 徹, 手島邦彦, 武田一樹, “さらなる高速大容量化を実現するキャリアアグリゲーション高度化および Dual Connectivity 技術,” NTT ドコモテクニカルジャーナル, vol.23, no.2, pp.35-45, July 2015.
- (3) 巳之口 淳, 磯部慎一, 高橋秀明, 永田 聡, “3GPP における 5G 標準化動向,” NTT ドコモテクニカルジャーナル, vol.25, no.3, pp.6-12, Oct.2017.
- (4) K. Kikuchi and H. Otsuka, “Proposal of adaptive control CRE in heterogeneous networks,” Proc. PIMRC, NET 7, Sept.2012.
- (5) 中村光寿, 大塚裕幸, “256/1024-QAM を用いた OFDM 伝送の移動通信への適用に関する考察,” 信学技報, RCS2015-97, pp.299-303, June 2015.
- (6) H. Otsuka, R. Tian, and K. Senda, “Transmission performance of an OFDM-based higher-order modulation scheme in multipath fading channels,” Journal of Sensor and Actuator Networks, vol.8, no.2, pp.1-15, March 2019.
- (7) S. Nakazawa, S. Matsuoka, and H. Otsuka, “Adaptive control CRE and its throughput performance in HetNet,” IEICE Commun. Express, vol.4, no.4, pp.117-122, April 2015.
- (8) K. Fujisawa and H. Otsuka, “Throughput performance of adaptive control CRE in multicarrier HetNets,” IEICE Commun. Express, vol.8, no.12, pp.606-610, Dec.2019.
- (9) 藤澤研斗, 大塚裕幸, “3.4GHz 帯を用いたマルチキャリア HetNet におけるパーソナルセル化を目的とした適応制御型 CRE の提案とその効果,” 信学技報, RCS2019-109, pp.45-49, July 2019.
- (10) K. Fujisawa, F. Kemmochi, and H. Otsuka, “Personal-cell scheme using adaptive control CRE for multicarrier HetNets,” Proc. VTC2019-Fall, 8B-5, Sept.2019.
- (11) S. Deb, P. Monogioudis, J. Miernik, and J. P. Seymour, “Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol.22, no.1,

- pp.137-150, Feb.2014.
- (12) N. Naganuma, S. Nakazawa, S. Suyama, Y. Okumura, and H. Otsuka, "Performance evaluation of adaptive control CRE in HetNet with eICIC scheme," IEICE Commun. Express, vol.6, no.4, pp.166-171, April 2017.
- (13) 剣持郁也, 大塚裕幸, "28GHz 帯を用いたマルチキャリア HetNet における適応変調符号化に関する検討," 信学技報, RCS2019-110, pp.51-55, July 2019.
- (14) F. Kemmochi, K. Fujisawa, and H. Otsuka, "Potential design for modulation and coding scheme in mmwave multicarrier HetNets," Proc. VTC2019-Fall, 3P-12, Sept.2019.
- (15) 剣持郁也, 須山 聡, 大塚裕幸, "マルチキャリア HetNet における 28GHz 帯ピコセルのセクター化に

よる改善効果," 2020 信学総大, B-5-8, March 2020.

(2020 年 5 月 13 日受付, 7 月 23 日再受付)

大塚裕幸 (正員: シニア会員)

1983 北大大学院工学研究科電子工学専攻修士課程了。同年日本電信電話公社(現 NTT)入社。1999NTT ドコモ。デジタル無線通信, 移動通信の研究開発に従事。2010工学院大・情報通信工・教授。博士(工学)。著書に「基本からわかる情報通信ネットワーク」(オーム社)がある。