

セルラ分散 MU-MIMO 通信システム

— 基本設計概念と干渉対策 —

安達文幸[†] 高橋領[†] 松尾英範[†] Sijie Xia^{††} Chang Ge^{††} 陳強[†]

東北大学電気通信研究機構

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号

E-mail: [†]{fumi-yuki.adachi.b4, ryo.takahashi.b4, hidenori.matsuo.b5, qiang.chen.a5}@tohoku.ac.jp,

^{††}{xia.sijie.p2, ge.chang.q2}@dc.tohoku.ac.jp

あらまし 超高密度移動通信システムでは、同一周波数をごく近距離で再利用することになるから、強い同一周波干渉が発生し、それが大容量化と高信頼性を制限してしまう。干渉問題の解決が最も重要な技術課題の一つになる。そこで、5G以降のシステムでは、干渉問題解決を念頭に置いて超高密度無線アクセスネットワーク(RAN)を設計しなければならないだろう。従って、5G以降のシステムでは5Gシステムまでとは異なったセルラ構成にせざるを得ないのではないか。本稿では、5G以降のシステムのための大容量でかつ信頼性が高く、適応性と拡張性に優れた超高密度 RAN の実現を目指し、再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムの基本構想を述べたうえで、それに適した干渉対策の基本構想を紹介する。

キーワード 5G, RAN, セルラシステム, 分散アンテナ, MU-MIMO

Cellular Distributed MU-MIMO Communication System

— Architecture Design and Interference Countermeasure —

Fumi-yuki Adachi[†], Ryo Takahashi[†], Hidenori Matsuo[†], Sijie Xia^{††}, Chang Ge^{††}, Qiang Chen[†]

Tohoku University ROEC, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: [†]{fumi-yuki.adachi.b4, ryo.takahashi.b4, hidenori.matsuo.b5, qiang.chen.a5}@tohoku.ac.jp,

^{††}{xia.sijie.p2, ge.chang.q2}@dc.tohoku.ac.jp

Abstract In ultra-dense mobile radio communication systems, severe co-channel interference is produced by reusing the same radio resource in a very close distance and this interference limits the enhancement of capacity and reliability of the system. Hence, the interference countermeasure will become one of key technical issues in beyond 5G systems. The ultra-dense radio access network (RAN) needs to be designed with interference countermeasure in mind and its system structure will become different from those of 5G systems. In this report, we will present the architecture of reconfigurable cellular distributed MU-MIMO system aiming at the realization of ultra-dense RAN having a large capacity as well as enhanced reliability, adaptability, and scalability. Then, we will introduce a concept of interference countermeasure suitable for the reconfigurable cellular distributed MU-MIMO system.

Keywords 5G, RAN, cellular system, distributed antenna, MU-MIMO

1. はじめに

第5世代移動通信システム(5Gシステム)[1],[2]による新しい通信サービスが始まった今、5G以降のシステムの実現に向けて、5G高度化システム[3]と6Gシステム[4]研究開発が活発に繰り広げられている。移動通信データトラフィックはおよそ46%の年平均成長率(CAGR: Compound annual growth rate)で増加していると言われている[5]。5G以降のシステムではより広帯域な通信サービスが期待されることから、更なる通信の大容量化が求められている。そこで、通信帯域幅の広帯域化と共に基地局配置の高密度化(超小セル化)によるスペクトル利用効率の向上が必要になっている。前者に関してはミリ波帯からテラヘルツ帯に至る超高周波数帯の利用が期待される。後者に関しては、単純な超小セル化はハンドオフ制御などが頻繁に発生することから好ましくない。そこで、単純な超小セル化ではなく、マルチユーザ

マルチ送受信アンテナ(MU-MIMO)通信技術[6]を併用する必要がある。

限られた周波数帯域幅を利用して広い通信サービスエリア内の多数のユーザに通信サービスを提供するために、同一周波数を離れた場所で再利用することが必須であり、このような移動通信システムはセルラシステムと呼ばれる[7]。無線通信を提供する基地局のネットワークは無線アクセスネットワーク(RAN)と呼ばれる。スペクトル利用効率の向上を狙って基地局配置を高密度化すると、強い同一周波干渉が発生してスペクトル利用効率の向上が制限されてしまう。干渉問題の解決が最も重要な技術課題の一つになる。

従って、5G以降の超高密度システムでは、干渉問題解決を念頭に置いてRANを設計しなければならないだろう。さやに厄介なことは、超高周波数帯の電波は直進性が強く、送受信点間に存在する建造物などにより通信路遮断が頻繁に発生することである。通信路遮断による通信品質劣化

の救済を目指すならば、アンテナを物理的に離して配置する分散無線通信技術がより重要になってくるだろう。以上より、5G以降の超高密度システムでは5Gシステムまでとは異なったセルラ構成にせざるを得ないのではないかと。

本稿では、5G以降のシステムのための大容量でかつ信頼性が高く、適応性と拡張性に優れた超高密度 RAN の実現を目指し、再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムと干渉対策の基本構想を紹介する。

本稿の構成は以下のようになっている。まず第2章では、再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムの基本構想を述べる。そして、第3章で、セルラ再構成の例や干渉対策について紹介する。第4章では、セルラ分散 MU-MIMO システムにおける干渉対策に関する筆者らの取り組みについて簡単に紹介する。

2. セルラ分散 MU-MIMO

2.1 超小セル化

本稿では便宜上、5G以前のシステムの基地局をマクロセル基地局と呼ぶことにする。マクロセルを超小セル化すると、マクロセルの中に超小セル基地局が多数存在することになり、ハンドオフなどが頻繁に発生し、通信を継続するための制御信号伝送トラフィックが増加してしまう。

これを避けるには二つの方向が考えられる(図1参照)。一つは、マクロセル基地局に局所的に多数のアンテナ素子を配置し、超小セルシステムの各セルを覆うくらいの狭ビームを多数形成して MU-MIMO を行う大規模集中 MU-MIMO である。もう一つは、マクロセル内の多数の超小セル基地局の無線信号処理、通信データ処理と無線制御に関わる機能を集約局(つまり元のマクロセル基地局であり、以降では単に BS と呼ぶ)にまとめ、無線部(周波数変換器や無線信号電力増幅器など)は元の超小セル基地局(以降では単に分散アンテナと呼ぶ)に残した大規模分散 MU-MIMO である。この大規模分散 MU-MIMO の BS 機能は大規模集中 MU-MIMO における BS の無線信号処理・通信データ処理・無線制御機能と同じである。

各基地局の無線制御機能を集約局にまとめて配置する集中型 RAN (Centralized RAN: C-RAN) [8] が知られている。大規模分散 MU-MIMO は、超小セル基地局の無線部を除いた無線信号処理と通信データ処理とに関わる機能を無線制御機能と共に集約局にまとめて配置した、マクロセル基地局レベルの C-RAN と言っても良いだろう。

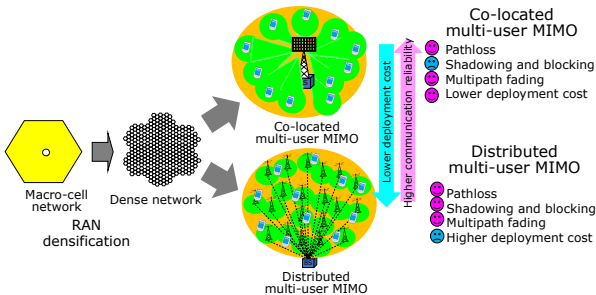


図1 超高密度化へのアプローチ

2.2 ユーザ中心の仮想小セルの形成

集中か分散かに関わらず大規模 MU-MIMO では無線信号処理に要求される演算規模が膨大になってしまう。そこで、無線信号処理能力に合わせて、互いに強い干渉を与え合う近隣のユーザをひとまとめでとした仮想小セル(ユーザクラスと呼ぶ)を多数形成し、集中 MU-MIMO では多数のビー

ムの中から各ユーザクラス方向に近い狭ビームを、分散 MU-MIMO では多数の分散アンテナの中から各ユーザクラスに近い分散アンテナを、それぞれ必要数(ユーザ当たり1ストリーム伝送を仮定したとき多重ユーザ数以上)だけ選択して、ユーザクラス毎の小規模 MU-MIMO 通信を並列実行することが現実的である。

本稿では、BS の無線信号処理能力で実現可能な MU-MIMO のユーザ数を念頭にユーザクラスを形成することを考えている。以降では、分散 MU-MIMO を対象に仮想小セルの形成、そしてセルラ化とセルラ分散 MU-MIMO システム構想について述べる。なお、集中 MU-MIMO についても同様にセルラ化が可能である。

ユーザクラス毎に実行する分散 MU-MIMO 信号伝送系を図2に示す。無線信号処理機能は BS に配置され、分散アンテナに配置される機能はベースバンド信号/無線信号変換である。

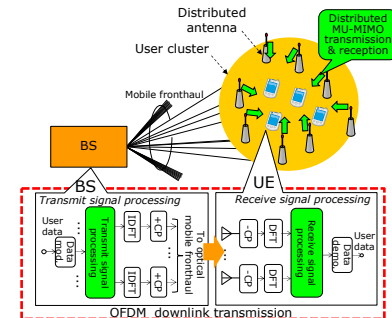


図2 ユーザクラス毎分散 MU-MIMO 信号伝送系

図2では、1アンテナ素子を分散配置する例を示したが、複数アンテナ素子を用いる小規模アレーアンテナを分散配置することもあり得る。このときはビーム形成を行うことができるのでクラス間干渉の更なる低減が期待できるものの、建物などによる通信路遮断の影響を受け易くなる。

以上のように、各 BS セルを更に分割し、クラス毎分散 MU-MIMO を並列実行する。これは、BS セルという小規模エリアへのセルフリー通信[9]の適用例とすることができるだろう。

2.3 セルラ化

ユーザは移動することから、ユーザの移動に合わせて動的にユーザクラスを形成する必要がある。多数のクラス

に対してクラス毎分散 MU-MIMO を並列実行するのであるが、BS の無線信号処理機能で扱うクラス群の中であれば、ユーザが一つのクラスから他のクラスに移動しても通信を継続でき、ハンドオフという接続制御処理は不要である。そこで、BS の無線信号処理能力を超えない最大のクラス数が、BS で扱える通信エリア(いわゆるセル)の広さを決定することになる。つまり、図3に示すように、各 BS が接続制御と無線信号伝送を担当するセルに広い通信サービスエリアを分割したうえで、各セル内をさらに多数のユーザクラスに分割する。

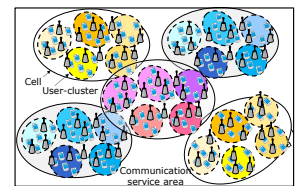


図3 セル/クラス構成の模式図

通信サービスエリア内のセル数は、BS の無線信号処理能力を考慮して予め決定しておくことができる。そして、分散アンテナの配置状況(具体的には位置情報)を基に必要数だけのセルを形成すればよい。以上より、BS の無線信号処理能力に制約がある下では、分散 MU-MIMO か集中 MU-MIMO に関わらず、広い通信サービスエリアをカバーするために多数の BS を配置することが避けられない。各 BS のセル内であればユーザがどのクラスに移動しても、ハ

ンドオフという接続制御を必要とせず無線信号処理だけで通信を継続できる。もし、BS の無線信号処理能力が十分に高ければ、一つの BS で広い通信サービスエリアをカバーできるので、完全セルフリー通信システムを実現できる。

ところで、多数の BS を仮想化してクラウドコンピューティングに基づくクラウド RAN とすることで、分散アンテナ配置に合わせてセルを構成できる。また、アンテナ配置の変更に合わせて柔軟にセルを再構成することもできる。そして、各 BS は自セル内のユーザの接続制御と無線信号伝送・通信データ処理を実行する。本稿では、このような移動通信システムを再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムと呼んでいる。

2.4 セルとクラスタの形成手法

クラスタ形成は各 BS で行うが、その前に通信サービスエリア内にセルが形成されていなければならない。セル形成は通信サービスエリア全体を対象とした処理になる。しかも、通信サービスエリア内に存在する多数のユーザの位置情報などを基にセル形成をするのは実用的ではない。そこで考えられるのは、通信エリアに配置された分散アンテナの位置情報に基づいてセルを形成することである。第 3 章で説明する RAN 管理装置でセル形成を行う。次に、ユーザの位置情報を基にクラスタを形成する。

セルおよびユーザクラスタの形成には拘束条件付き K 平均アルゴリズム[10]を用いることができる。セル形成(分散アンテナのクラスタ形成のことを以降ではセル形成と呼ぶ)の拘束条件はセル数とセル当たりの分散アンテナの許容最大数であり、ユーザクラスタ形成の拘束条件はクラスタ数とクラスタ当たりの最大ユーザ数である[11]。

3. セルラ分散 MU-MIMO 通信システム

3.1 基本構成

RAN を仮想化すれば、分散アンテナ配置状況に対応したセルの再構成が可能になる。このような超高密度 RAN の実現を目指した再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムの構想を図 4 に示す。RAN 管理装置(RAN coordinator)は、通信サービスエリア内に配置するセル数やセル当たりのユーザクラスタ数の決定、分散 MU-MIMO 無線信号伝送に関する各種パラメータの決定を担う。

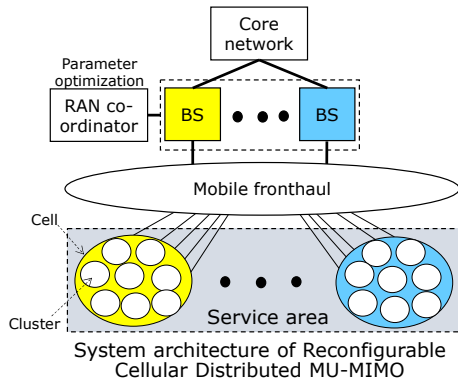


図 4 セルラ分散 MU-MIMO 通信システムの構想

各 BS が通信を提供するセルの位置は必ずしも固定ではない。通信サービスエリア内に形成されたセルのどれを各 BS が担当するかは決定は、RAN 管理装置が担う。BS とセルとの対応付けが決定された後に実行するクラスタ形成、セル内の接続制御と無線信号処理は各 BS が担うことになる。第 2 章ですでに述べたように、BS の信号処理能力が向上

すれば、BS 数を削減でき、完全セルフリー方式に更に近づく。しかし、複数の仮想 BS から構成される RAN は、巨大な仮想 BS を一つ設置するより災害に堅牢である。

以上述べたセル再構成を行うセルラ分散 MU-MIMO 通信システムは単純な超小セル化とは異なり、大容量でかつ信頼性が高く、適応性と拡張性に優れていることが特長である。

3.2 プロアクティブなセル再構成

セルラ分散 MU-MIMO 通信システムでは、セル内クラスタ間干渉(以降、セル内干渉と呼ぶ)と隣接セルのクラスタからの干渉(以下ではセル間干渉)が発生する。互いに強い干渉を与え合う近隣ユーザ同士をひとまとめでしてユーザクラスタを形成することで比較的ユーザ密度の低い場所をクラスタ境界とすることができ、セル内干渉を軽減できる。同様にセル間干渉を最小化するように予めセル構成を決定しておくことが望ましい。平均的なユーザ分布に従ってアンテナを配置する。そして、ユーザクラスタ形成と同様にアンテナクラスタを形成し、これをセルとみなす。ユーザ密度が低く分散アンテナが少ないエリアがセル境界になるので、セル間干渉を低減できると期待される。

分散 MU-MIMO 通信では多重ユーザ数と同じかそれ以上の分散アンテナが必要である(ユーザ当たり1ストリーム伝送を仮定)。このため、ユーザ密度が高い市街地では郊外地よりもより多数の分散アンテナを配置しなければならない。市街地であっても、ユーザが集中する商業エリアや鉄道駅周辺などには特に多数の分散アンテナを配置しなければならない。再構成を行うセルラ分散 MU-MIMO 通信システムでは、このような不均質な分散アンテナの配置に合わせてセルを構成できる。

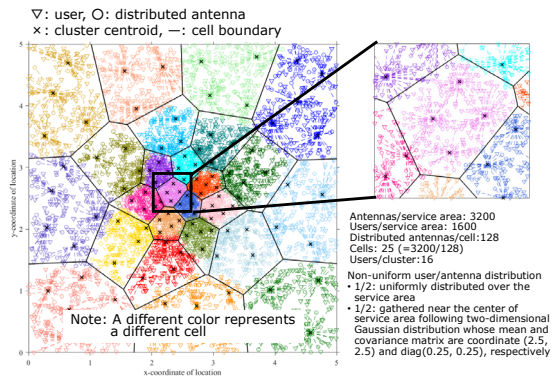


図 5 セル/クラスタ構成の一例

ユーザ分布が不均質で分散アンテナも不均質に配置したときのセル/クラスタ構成の例を図 5 に示す[11]。各ユーザは単一アンテナを有し、1 ストリーム伝送を行うものとする。合計で1,600ユーザが通信サービスエリア内に分布しているが、エリアの中心領域にユーザが高い密度で分布していると仮定している。通信エリア内に合計で3,200本の分散アンテナをユーザ分布に合わせて配置している。従って、通信サービスエリアの中心領域により多くの分散アンテナを配置している。16 ユーザを多重する MU-MIMO 通信を考える。そして、平均 8 クラスタでの分散 MU-MIMO 通信を並列実行する無線信号処理能力を各 BS が保有しているとする。このとき、各 BS が通信サービスを提供できる最大ユーザ数は128(=16×8)であり、それに必要な分散アンテナの必要最小数は128である。これより、通信サービスエリアに形成するセルの数は25(=3200/128)、そしてセル当たりのユーザ数の平均は64(=1600/25)となる。また、各セル内に形成されるユ

一ザクラスタ数はおよそ $4(=64/16)$ になる。

3.4 干渉対策

セルラ分散 MU-MIMO 通信システムにおいて、全ての BS で同一無線リソースを用いてクラスタ毎分散 MU-MIMO 通信を並列実行すると、セル内干渉 (Intra-cell interference) とセル間干渉 (Inter-cell interference) という 2 種類の干渉が発生する (図 6)。これら干渉の存在により、RAN の超高密度化によって得られるスペクトル利用効率の向上が制限されてしまう。効果的な干渉対策が必要とされる所以である。

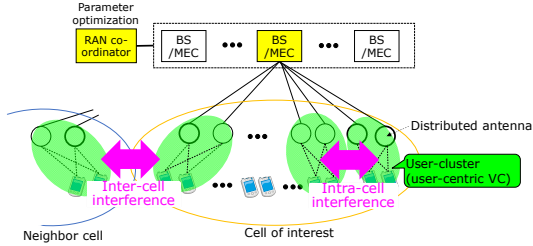


図 6 セル内干渉とセル間干渉

セル間干渉制御技術として良く知られているのが部分周波数再利用 (FFR: Fractional frequency reuse) [12] である。FFR では、図 7 に示すように、隣接セルのセル端領域とは異なる部分帯域 (全帯域幅のうちの一部の帯域) を自セルのセル端領域に割り当てる。セル内領域には同一の帯域が割り当てられる。これは、セル内部領域とセル端領域に同時に通信機会を割り当てる周波数領域スケジューリングの例 (図 7(a) 参照) である。

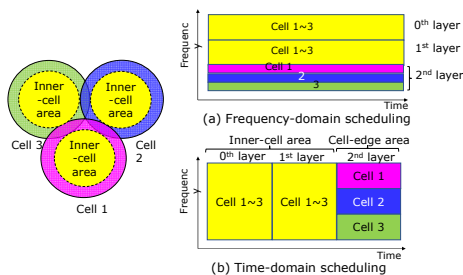


図 7 FFR を利用するセル間干渉制御とスケジューリング

時間領域スケジューリングも可能である (図 7(b) 参照)。なお、セル内領域には全帯域が割り当てられる。スペクトル利用効率の観点からみればどちらのスケジューリングも同じであるが、周波数領域スケジューリングは低遅延 (Low latency) 通信に適している。

セル内干渉制御は、クラスタ毎分散 MU-MIMO 通信を行う各 BS が自律的に実行すべきである。一方、セル間干渉制御については各セルが自律的に実行する方法と、通信エリア内のセル数や各 BS のユーザクラスタ数の最適化、無線信号処理に関する各種パラメータの最適化などを担う RAN 管理装置が実行する方法とがある。本稿では、FFR の枠組みを利用したセル間およびセル内干渉制御について述べる。

なお、干渉の原因は他のクラスタの MU-MIMO 通信における送信信号である。クラスタ毎の全送信電力を低くすれば、干渉が減少することになる。従って、送信電力制御は干渉制御にも重要な関りを持っている。このためにはまず、分散 MU-MIMO 通信におけるユーザ間の送信電力最適割当が必要であり、筆者らはこの問題にも取り組んでいる [13]。

4. 自律分散干渉制御と準自律分散干渉制御

4.1 自律分散干渉制御

セル内干渉制御とセル間干渉制御はクラスタ多層化を基にしたものであり、クラスタ多層化の基本的な考えを模式的に示したのが図 8 である。

セル内干渉制御の制御パラメータは干渉離隔距離である。まず、後述するセル端ユーザを除外したユーザを対象にして、クラスタ当たりのユーザ数の設定値とユーザの位置情報に基づいてユーザクラスタを形成する。そして、互いに干渉離隔距離以上離れたクラスタから成るクラスタ集合を複数形成する。これをクラスタの多層化と呼ぶ。各層内のクラスタは互いに干渉離隔距離以上離れているので、セル内干渉が低減される [14], [15]。図 8 は、セル内に形成した多数のクラスタが複数の層に分けられている例である。なお、最下層は、セル間干渉を強く受けるセル境界に近いユーザ (セル端ユーザと呼ぶ) をまとめて配置したセル端クラスタ層である。このセル端ユーザに FFR の枠組みを基にしたセル間干渉制御を適用する。

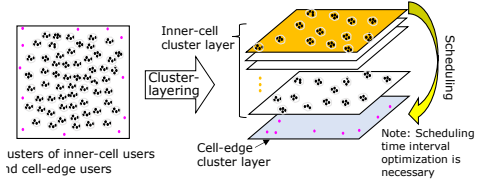


図 8 クラスタ多層化

以上のようにして作成したクラスタ層の各層に順番に通信機会を与えるラウンドロビン (Round robin) 時間領域スケジューリングを行う。

(1) クラスタ多層化

単純にクラスタ多層化を行うと、図 8 の第 1 層 (最上層) に比べて第 2 層、第 2 層に比べて第 3 層に配置されるクラスタの数が減少する。つまり、下層になるほど干渉離隔距離以上にクラスタ間距離が大きくなる。そこで、干渉離隔距離を満たすなら、他の層のクラスタの重複配置を許容する。重複配置を許容したクラスタ多層化の例を図 9 に示す。セル端ユーザクラスタを含めて 3 層に多層化されている。

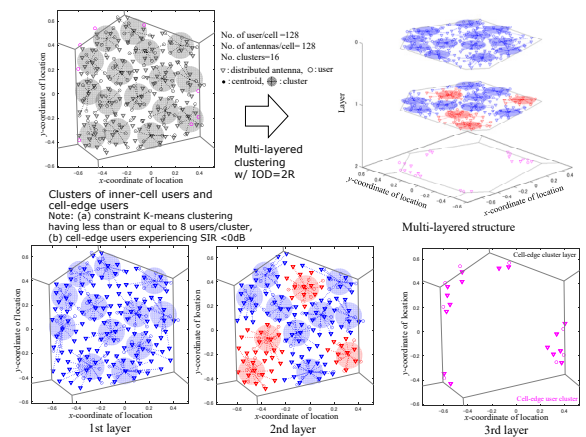


図 9 クラスタ多層化の例

図中の ∇ と \circ が、それぞれ分散アンテナとユーザを表している。ピンク色で表したセル端ユーザを除いて 16 個のクラスタを形成した。図中では、分かり易いようにクラスタ間距離の半分を半径 (R) とした円を描いた。平均クラスタ間距離 ($2R$) を干渉離隔距離とした。各層のクラスタの配置を見て分かるように、各層内のクラスタ間距離が大きくなっている。これによりセル内干渉が低減される。

ところで、干渉距離を満足していても隣接クラスタから強い干渉を受けることがある。このようなユーザをセル端ユーザと同等に扱ってセル端クラスタ層に重複配置することを筆者らは検討している[16], [17].

(2) 棲み分けアルゴリズムによる FFR

図 9 の最下層 (3 番目の層) は、セル間干渉制御を適用するセル端クラスタ層である。伝搬環境に適応し、隣接セル間では互いに異なる部分帯域を割り当てることができる棲み分けアルゴリズムを用いる部分周波数再利用 (FFR) がある [18]. 適応 FFR を用いたときのセル端ユーザへの部分帯域の割り当ての様子を図 10 に示す。

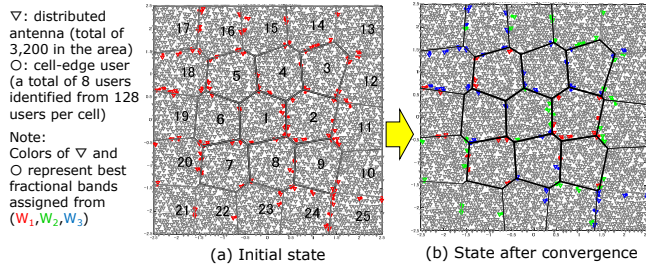


図 10 適応 FFR によるセル端ユーザへの部分帯域割当

棲み分けアルゴリズムによる適応 FFR では、セル端ユーザがセル間干渉レベルを測定して BS に報告し、最もセル間干渉レベルの低い最良部分帯域を決定してそのセルのセル端ユーザに割り当てる。セル間干渉レベルの測定と報告、最良部分帯域の決定と割当という処理を繰り返して行う。図 10 は、3 部分帯域の一つを各セル端に割り当てる場合であり、初期割り当てでは全てのセル端に同じ部分帯域 (赤色) を割り当てている (図 10(a)). およそ 100 回程度の繰り返しで棲み分けが収束する。図 10(b) は、100 回繰り返し後の部分帯域の割当て結果を示している、隣接セル端では異なる部分帯域が割り当てられていることが見て取れる。

適応 FFR の採用により、各 BS が自律的に部分帯域の棲み分けを行えるので、適応性及び拡張性の高い RAN が実現できる。適応 FFR における帯域分割損の救済を狙とした上位 2 帯域棲み分けへの拡張も検討している[19].

4.2 準自律分散干渉制御

準自律分散干渉制御では、全 BS を見渡した RAN 管理装置がセル間干渉制御を、各 BS がセル内干渉制御を、それぞれ分担して実行する。準自律分散干渉制御では、グラフ彩色アルゴリズムを用いて、まずセル間干渉制御を実行し、次いでセル内干渉制御を実行する[20]. そこで、システム帯域を等分に分割し、各部分帯域を異なる色に 1 対 1 に対応付ける。そして、色の全体集合をいくつかの部分集合に分ける。この部分集合は、各セルのセル端クラスタ層を彩色するために割り当てられる。部分集合内の色の最小必要数は 2 である。色の総数が 6 で、色の部分集合数が 3 の例を図 11 に示す。

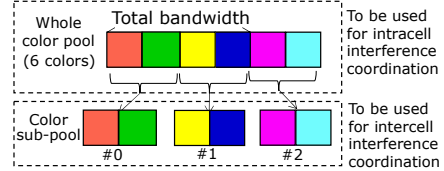


図 11 グラフ彩色における色と帯域分割との関係

2 ステップから成る準自律分散干渉制御の流れを模式的に描いたのが図 12 である。

ステップ 1 は RAN 管理装置が実行する。セルを構成した後にセル重心 (Cell centroid) の位置情報を用いてドローネー

三角形分割 (Delaunay triangulation) [21] を行ってグラフを作成する。そして、色の部分集合数の制約の下 (図 11 と 12 の例では部分集合数は 3) で最大次数 (Largest degree order) に基づくグラフ彩色アルゴリズム (LDO-GCA) [22] を用いて、色の部分集合を各セルに割り当てる。なお、部分集合内の各色を用いてセル端クラスタの彩色を行うのは各 BS である。

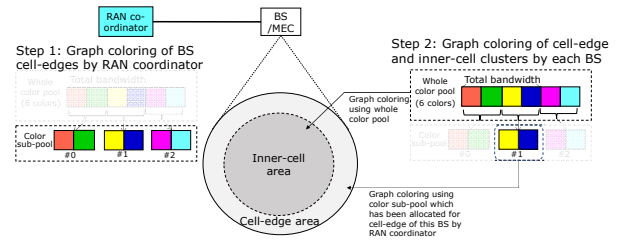


図 12 2 ステップ準自律分散干渉制御の流れ

ステップ 2 では、各 BS が以下のようにしてセル端クラスタを彩色する。各 BS では、自分のセル内に形成したクラスタの重心 (Cluster centroid) の位置情報を用いてドローネー三角形分割を行ってグラフを作成する。そして、凸包 (Convex hull) を見つけて、それに対応するクラスタをセル端クラスタとして彩色する。セル端クラスタは線状に連なっているので、RAN 管理装置から割り当てられた色の部分集合から各色を順番に取り出して単純に彩色するラウンドロビン (Round robin) 彩色を用いることができる (セル端クラスタ数が奇数のとき彩色を一巡したときに隣同士が同じ色になってしまうが、セル端クラスタはもともと疎に分布しているので強い干渉を引き起こす恐れは少ない。しかし、今後更に検討する予定)。次に、セル内干渉制御を行う。凸包に対応するセル端クラスタは既に彩色済みであるから、これを条件付きとして LDO-GCA を用いてセル内クラスタを彩色する。

(1) グラフ彩色アルゴリズムによる FFR

簡単な正方形セル構成の場合について、色の部分集合 (各部分集合には 2 色配置) を 3 つ用いて LDO-GCA によりセル端クラスタの彩色を行った例を図 13 に示す。各セル内のユーザ数が 96、アンテナ数が 128 でクラスタ数が 12 の場合である。セル境界 (正方形の辺) で向かい合っているセル端クラスタは互いに異なる色で彩色されていることが分かる。つまり、セル間干渉を低減できる。

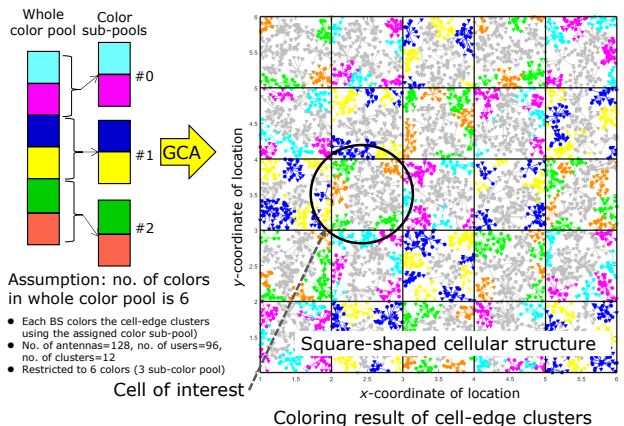


図 13 セル端クラスタの彩色例

(2) セル内クラスタのグラフ彩色

彩色数を 6 色に制限した LDO-GCA を用いて、図 13 の黒円で囲まれたセル内の各クラスタを彩色した例を図 14 に示す。比較のために、DSATUR (Degree of saturation) アル

ゴリズム [23]に彩色数制限(6色)を取り入れてセル内クラスタを彩色した例も示した。LDO-GCAはDSATUR-GCAに比べて演算規模が少ないのが特長である。

強化学習(Reinforcement learning)による彩色アルゴリズム(RLCA) [24]を用いてセル内クラスタを直接彩色することもできる。RLCAではグラフを作成する必要が無いことから、グラフを用いたLDO-GCAに比べ、様々な伝搬環境への適応性が高いと言える。しかし、演算規模が大きいので、その削減が今後の課題である。

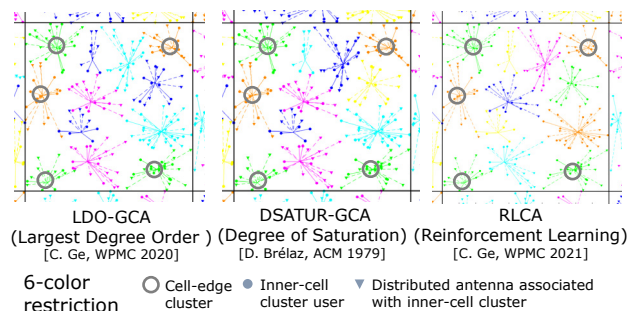


図 14 セル内クラスタの彩色例

5. むすび

本稿では、様々な通信環境に適応できる再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムの基本構想について述べ、干渉問題の解決に向けた自律分散および準自律分散干渉制御について紹介した。再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムは、ミリ波帯などの超高速周波数帯の利用による大容量化を可能にするとともに、ユーザの移動や分散アンテナの動作オンオフを含めた通信環境の変化に適用してセル/クラスタ構造を再構成することで大容量でかつ信頼性が高く、適応性と拡張性に優れた超高密度 RAN の実現を可能にする。本稿で述べたセル/クラスタ構造の再構成や干渉制御の詳細な性能評価を今後行ってゆく予定である。

なお、再構成可能なセルラ分散 MU-MIMO 通信システムの実現には、光モバイルフロントホールも再構成できる能力がなければならない。今後の発展に期待したい。

謝辞

本研究は総務省委託研究「第 5 世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発」(JPJ000254)の成果の一部である。

文献

[1] P. Marsch, et al, “5G Radio Access Network Architecture: Design Guidelines and Key Considerations,” IEEE Com. Mag., Vol.54, Issue 11, Nov. 2016.

[2] A. Benjebbour, K. Kitao, Y. Kishiyama, and C. Na, “3GPP Defined 5G Requirements and Evaluation Conditions,” NTT DOCOMO Tech. J., Vol. 19, No. 3, pp. 13-23, Jan. 2018.

[3] T. Murakami, et al, “Research Project to Realize Various High-reliability Communications in Advanced 5G Network,” Proc. IEEE WCNC 2020, Seoul, Korea, 25-28 May 2020.

[4] G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, “6G: Opening New Horizons for Integration of Comfort, Security, and Intelligence,” IEEE Wireless Com., Vol. 27, Issue 5, pp. 126-132, Oct. 2020.

[5] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data

Traffic Forecast Update, 2017–2022.

[6] L. Sanguinetti and H. V. Poor, “Fundamentals of Multi-user MIMO Communications,” Chap.6 in V. Tarokh, Ed., *New directions in wireless communications research*, Springer, Aug. 2009.

[7] W.C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, John Wiley and Sons, 1974. [復刻版: IEEE Press, 1993].

[8] 3GPP TS 36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall description,” Ver. 12.10, Jan 2017.

[9] H. I. Obakhena, A. L. Imoizel, F. I. Anyasi and K. V. N. Kavitha, “Application of Cell-free Massive MIMO in 5G and Beyond 5G Wireless Networks: A Survey,” J. Eng. Appl. Sci., Vol. 68, No. 13, Oct. 2021.

[10] P. Bradley, K. Bennett and A. Demiriz, “Constrained K-Means Clustering”, Microsoft Research Technical Report, May. 2000.

[11] S. Xia, C. Ge, Q. Chen, and F. Adachi, “Cellular Structuring and Clustering for Distributed Antenna Systems,” Proc. WPMC 2021, Okayama, Japan, 14-16 Dec. 2021.

[12] M. Qian, W. Hardjawana, Y. Li, B. Vucetic, X. Yang, and J. Shi, “Adaptive soft frequency reuse scheme for wireless cellular networks,” IEEE Trans. Vehi. Technol., Vol.64, Issue.1, pp.118-131, Jan. 2015.

[13] S. Xia, C. Ge, Q. Chen, and F. Adachi, “Optimal Power Allocation for Cluster-wise Distributed MU-MIMO System,” Proc. IEEE VTC2021-Fall, 27-30 Sept. 2021.

[14] F. Adachi, R. Takahashi, and H. Matsuo, “Enhanced Interference Coordination and Radio Resource Management for 5G Advanced Ultra-dense RAN,” Proc. VTC2020-Spring, 25-28 May 2020.

[15] R. Takahashi and F. Adachi, “Performance of Enhanced Interference Coordination Using Multi-layered Clustering for 5G Advanced Ultra-dense RAN,” Proc. IEEE VTC2021-Spring, Helsinki, Finland, 25-28 April 2021.

[16] 高橋, 松尾, 安達, “5G 高度化超高密度 RAN における干渉制御のための多層化クラスタリングに関する一検討,” 信学会ソ大, B-5-15, 2021 年 9 月.

[17] 高橋, 松尾, 安達, “5G 高度化超高密度 RAN のための干渉と無線リソースの改良型適応制御,” 信学技報, Vol. 121, No. 329, RCS2021-245, pp. 276-281, 2022 年 1 月.

[18] K. Temma, F. Adachi, L. Shan, Y. Owada, K. Hattori, and K. Hamaguchi, “Convergence Analysis of Interference-aware Channel Segregation,” IEICE ComEX, Vol.6, No.7, 460-466, July 2017.

[19] 松尾, 高橋, 安達, “超高密度 RAN におけるセル間干渉制御のためのチャンネル棲み分け,” 信学会ソ大, B-5-16, 2021 年 9 月.

[20] C. Ge, S. Xia, Q. Chen, and F. Adachi, “2-Step Graph Coloring Algorithm for Cluster-wise Distributed MU-MIMO in ultra-dense RAN,” Proc. WPMC 2020, 19-26 Oct. 2020.

[21] J. Keil and C. Gutwin, “Classes of Graphs Which Approximate The Complete Euclidean Graph,” Discrete and Computational Geometry, Vol. 7, No. 1, pp. 13–28, 1992.

[22] C. Ge, S. Xia, Q. Chen, and F. Adachi, “Graph Coloring-based Interference Coordination for Ultra-dense Cellular Network with Distributed MU-MIMO,” Proc. IEEE VTC2021-Fall, 27-30 Sept. 2021.

[23] D. Brélaz, “New Methods to Color The Vertices of A Graph,” Communications of the ACM, Vol.22, Issue 4, pp. 251-256, Apr. 1979.

[24] C. Ge, S. Xia, Q. Chen, and F. Adachi, “Reinforcement Learning-based Interference Coordination for Distributed MU-MIMO,” Proc. WPMC 2021, Okayama, Japan, 14-16 Dec. 2021.