

分散 MIMO 協調無線アクセスネットワークにおける 動的クラスタ制御の一検討

齋藤 智之 安達 文幸

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 2-1-1
E-mail: saito.tmm@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 分散 MIMO 協調無線アクセスネットワークでは、マクロセル全体に分散配置された複数の分散アンテナを一つのクラスタと見做し、マクロセル内に複数のクラスタを構成することで面的スペクトル利用効率を向上できる。しかしながら、同一周波数をマクロセル内で繰り返して利用するため、クラスタ境界に位置するユーザ端末 (UE) は隣接クラスタからの強いクラスタ間干渉 (Inter cluster interference, ICI) を受けることで受信 SINR (signal-to-interference plus noise power ratio) が劣化し、UE リンク容量が低下してしまう。

そこで本稿では、マクロセル内のクラスタ境界を動的に切り替える動的クラスタ制御を提案している。クラスタ境界に位置する UE をクラスタ中央 UE となるようにクラスタ境界を周期的に切り替えることで、クラスタ内における最悪環境と最良環境が平均化され、UE 間の公平性を確保することができ、特定の UE が最悪環境のみに陥る確率を低減できる。

計算機シミュレーションにより、静的クラスタと動的クラスタ制御を用いた場合のそれぞれの UE リンク容量を求め、動的クラスタ制御を適用することで次元 7 クラスタモデルにおいて最悪環境下の UE リンク容量を累積分布関数の中央値において約 1.5 倍に向上できることを明らかにしている。

キーワード 分散 MIMO, 動的クラスタ制御, STBC-TD, OFDM

A Study on Dynamic Antenna Clustering for Distributed MIMO Cooperative Wireless Access Network

Tomoyuki SAITO and Fumiyuki ADACHI

Research Organization of Electrical Communication, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

E-mail: saito.tmm@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In the distributed MIMO cooperative wireless access network, the area spectrum efficiency can be improved by constructing a number of clusters in a macro-cell. However, this results in large inter cluster interference (ICI) from neighbor clusters and degrades the received signal-to-interference plus noise power ratio (SINR) for user equipment (UE) at a cluster boundary (namely, cluster-edge UE).

In this paper, we propose a dynamic antenna cluster control which switch the boundary of clusters in a macro-cell in order to mitigate the probability of worst UE condition such as receiving the large interference from neighbor clusters. The dynamic antenna cluster control can switch the cluster-edge UE to the cluster-center UE by switching the boundary of clusters. By switching the cluster boundaries, the UE link capacity can be averaged between the worst UE condition and the best UE condition.

We evaluate, by computer simulation, the UE link capacities of static antenna cluster and dynamic antenna cluster control. It is shown that the proposed dynamic antenna cluster control improve the UE link capacity about 1.5 times in the median of cumulative distribution function (CDF).

Keywords distributed MIMO, dynamic antenna cluster control, STBC-TD, OFDM

1. まえがき

第 5 世代移動無線通信システムでは、10Gbps を超える高速データ通信が期待され、面的スペクトル利用効率の大幅な向上が求められている [1]。有望な技術の一つがマクロセル全体に分散アンテナ (DA) を多数配置し、それらを協調して利用する分散 MIMO 協調信号伝

送である。分散 MIMO 協調信号伝送では、マクロセル内に分散配置された DA を複数まとめて 1 つのクラスタと見做すことで、マクロセル内を複数のクラスタに分割し、同一周波数を繰り返して利用することで面的スペクトル利用効率の向上が可能である。しかしながら、実際には隣接クラスタからのクラスタ間干渉 (Inter cluster interference, ICI) が生じるため改善効果は制限

される。また、クラスタ境界に位置するユーザ端末 (UE) は、隣接するクラスタから強い ICI を受けることで、クラスタ中央に位置する UE と比較して常に劣悪な伝送品質に陥ってしまう。この問題を解決する方法の一つとして、CoMP(Coordinated Multi-Point) [2] のような複数送信点からの同時送信を用いれば、隣接するクラスタの DA と協調して自クラスタのクラスタ端 UE に対して協調信号伝送を行うことで、隣接クラスタからの強い ICI を回避することが可能である。

ところで、分散 MIMO 協調無線アクセスネットワークでは、マクロセル内の全ての DA は一つのマクロセル基地局 (MBS) で集中管理されていることより、MBS はマクロセル内のクラスタ境界を自由に決定することが可能である。

そこで本稿では、クラスタ境界を動的に切り替えて、クラスタ端 UE をクラスタ中央 UE に変えることで、CoMP 相当の協調信号伝送を可能にする動的クラスタ制御を提案している。動的クラスタ制御では、例えば予め 2 つのクラスタパターンを用意しておき、クラスタ端 UE がクラスタ中央 UE となるようにクラスタ境界を周期的に切り替えることで、UE に最悪環境と最良環境の両方を与えてリンク容量の平均化を行う。

これにより、クラスタ端 UE が常に最悪環境に陥ることを回避でき、クラスタ端 UE のリンク容量が向上し、UE 間の公平性を改善できる。

本稿では、基礎検討として周辺マクロセルからの同一周波数干渉がないシングルセル環境を仮定し、一次元クラスタモデルを採用した。計算機シミュレーションにより、UE リンク容量の分布を求め、動的クラスタ制御による UE リンク容量の向上効果を定量的に評価している。また、伝送方式には OFDM 下りリンク伝送、最大比送信ダイバーシチを用いた STBC-TD 伝送 [3-5] を仮定している。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章において提案する動的クラスタ制御の動作について説明し、第 3 章にて計算機シミュレーション結果を示し、クラスタ構成や動的クラスタ制御の効果について考察する。第 4 章で結論を述べる。

2. 動的クラスタ制御

図 1 にマクロセルを横長方形クラスタでクラスタ分割した一次元クラスタモデルの一例を示す。各クラスタには 8 本の DA が等間隔に規則的に配置されているものとする。

図 1(a) クラスタパターン #0 の場合、クラスタ端に位置する注目 UE は、常に隣接クラスタから強い ICI を受け、通信品質の悪いクラスタ端 UE としてしか通信する機会が得られない。そこで、図 1(b) クラスタパターン #1 のようにクラスタ境界を切り替えることで、図 1(a) クラスタパターン #0 においてはクラスタ端であった UE をクラスタ中央 UE へと切り替えることができる。

動的クラスタ制御では、図 1(a) のクラスタパターン #0 と同図 (b) のクラスタパターン #1 を周期的に切り替えることにより、特定の UE が常にクラスタ端に位置し、劣悪な通信環境下に陥ることを回避することで、理想的には全ての UE がほぼ同じ UE リンク容量が得られることが期待できる。

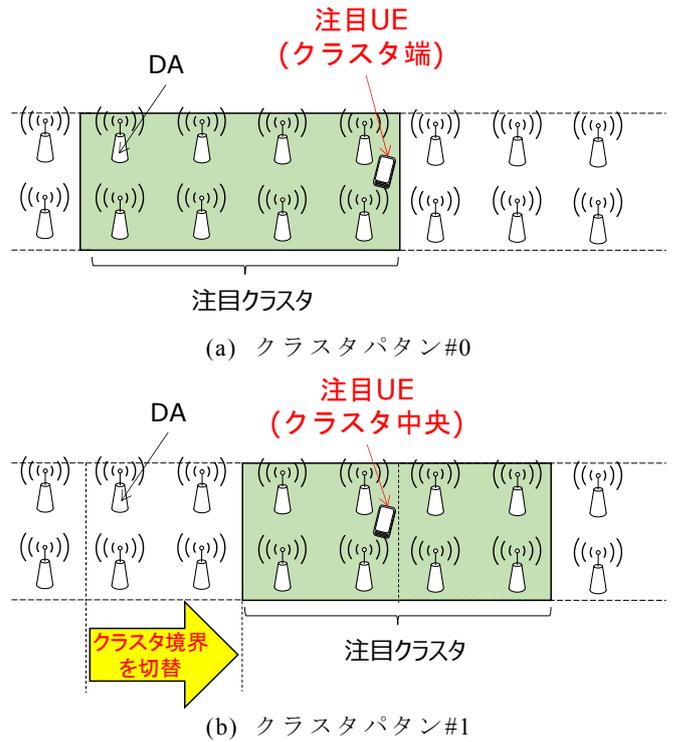


図 1 一次元クラスタモデルの一例

3. 計算機シミュレーション

3.1. MIMO ネットワークモデル

本稿では、周辺マクロセルからの同一周波数干渉が存在せず、マクロセル内の周波数繰り返しによる ICI のみが存在するシングルセル環境を仮定する。図 2 に一次元 7 クラスタモデル ($N_{CLUS-DA}=8$) と一次元 14 クラスタモデル ($N_{CLUS-DA}=4$) を示す。分散 MIMO 協調アクセスネットワークでは、ひとつの MBS に有線接続された N_{macro} 本の DA がマクロセル内に配置されており、各 DA は半径 R' の小セルをカバーしている。UE は N_{ue} 本のアンテナを搭載しているものとする。MBS は各クラスタにおいて、クラスタ内の $N_{CLUS-DA}$ 本の DA から瞬時電力規範に基づいて N_{bs} 本の DA を送信ダイバーシチブランチとして選択して、最大比送信ダイバーシチを用いた STBC-TD 伝送を行う。なお、以下では OFDM 下りリンクを対象としてリンク容量を求めた。

動的クラスタ制御の改善効果を評価するために、マクロセル全体に UE をランダム配置したときのシナリオに加えて、最悪環境下の UE となったときのシナリオについても評価する。最悪環境下となる UE の条件は、図 2 のクラスタパターン #0 に示す UE#0 のようにクラスタ境界に位置する UE のときであり、かつ隣接クラスタではクラスタ端 DA が選択されたとき (UE#0 に最も大きな ICI を与える DA が選択されたとき)、UE#0 が低受信 SINR しか得られない場合である。

ところで、分散 MIMO を用いる広帯域伝送では、周波数選択性が十分強ければチャンネル利得の平均は期待値に収束し、フェージングによる UE 間のチャンネル利得の差が小さくなることから、予め決めた順番で UE に通信機会を与えるラウンドロビン (RR) スケジューリングを用いてもプロポーショナルフェア (PF) スケジューリングと同程度のリンク容量と公平性が得られ

る[6]. このことより, 本稿ではスケジューラはRRスケジューリングを採用した.

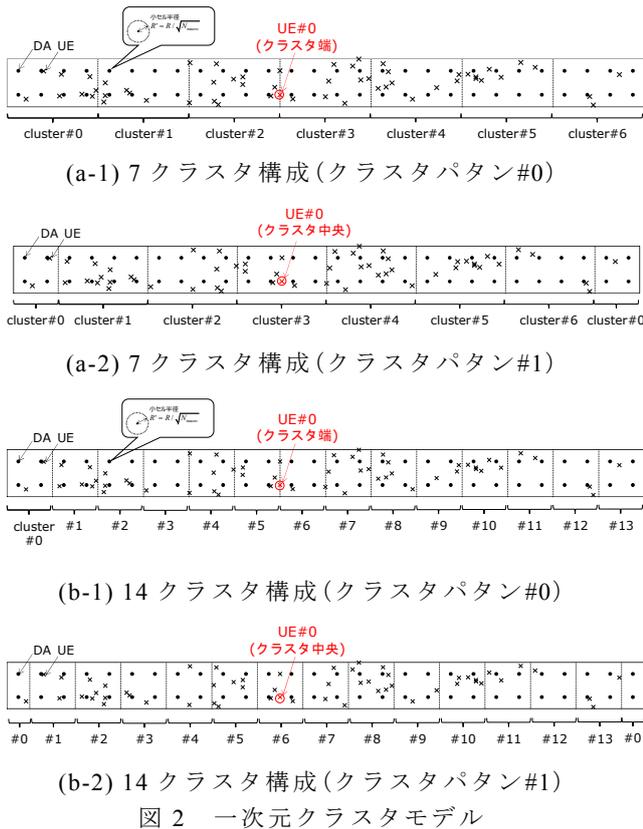


図2 一次元クラスタモデル

3.2. 伝搬モデル

広帯域無線伝搬チャネルは伝搬損失, シェドウィング損失, および周波数選択性フェージングによって特徴づけられる[7]. 第 n_{bs} DA—第 u UE 間距離が小セル半径より小さい場合は, 見通し環境となり, フェージングチャネルは周波数選択性伸上・ライスフェージングによって特徴づけられると考えられる. したがって, 第 n_{bs} DA—第 u UE 間距離 ($d_{u,n_{bs}}$) が小セル半径以下の場合 ($d_{u,n_{bs}} \leq R'$) は, DA—UE 間のチャネルは周波数選択性伸上・ライスフェージングによって特徴づけられるものとし, 第 n_{bs} DA—第 u UE 間距離が小セル半径より大きい場合 ($d_{u,n_{bs}} > R'$) は, DA—UE 間のチャネルは周波数選択性レイリーフェージングによって特徴付けられるものとする. 第 n_{bs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間のチャネルインパルス応答 $h(n_{ue}, n_{bs}, \tau)$ は次式で表される.

$$h(n_{ue}, n_{bs}, \tau) = \sqrt{d_{u,n_{bs}}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{u,n_{bs}}}{10}}} \times \left\{ \begin{aligned} & \sqrt{\frac{K}{K+1}} \exp(j\theta_{n_{ue}, n_{bs}}) \delta(\tau - \tau_{n_{ue}, n_{bs}}) \\ & + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \sum_{l=0}^{L-1} \zeta_{n_{ue}, n_{bs}}(l) \delta(\tilde{\tau}_{n_{ue}, n_{bs}}(l)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで α は伝搬損失指数であり, $\eta_{u,n_{bs}}$ は第 n_{bs} DA—第 u UE 間のシェドウィング損失 (dB) である. また, K は伸上・ライスフェージングの K ファクタである. $\theta(n_{ue}, n_{bs})$ は第 n_{bs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間チャネルの

主要波の位相であり, $\tau_{n_{ue}, n_{bs}}$ は主要波の遅延時間である. また, $\xi_{n_{ue}, n_{bs}}(l)$ は第 n_{bs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間チャネルの第 l 遅延パスの複素パス利得であり, $\tilde{\tau}_{n_{ue}, n_{bs}}(l)$ は第 l 遅延パスの遅延時間である.

3.3. OFDM 下りリンク UE 容量の計算

本稿では, STBC 復号後の受信信号対 (雑音 + ICI) 電力比 (signal-to-interference plus noise power ratio, SINR) とシャノンの容量式[7]に基づいて OFDM 下りリンク容量を求める. 総サブキャリア数 N_c に対して周波数分割多重 (Frequency division multi-access, FDMA) によって $U(=N_{RB})$ 台の UE を多重し, 各 UE には N_c/N_{RB} 本のサブキャリアが割り当てられているものとする. 一般性を失うことなく, 第 n ($0 \sim N_{RB}-1$) リソースブロックには $k=n \cdot (N_c/N_{RB}) \sim (n+1) \cdot (N_c/N_{RB}) - 1$ 番目の N_c/N_{RB} 本のサブキャリアを割り当てたものとする. 第 n リソースブロックを割り当てられた時の第 u UE の OFDM 下りリンク容量 $C(u, n)$ (bps/Hz) は次式により計算できる.

$$C(u, n) = \frac{1}{N_c/N_{RB}} \sum_{k=n \cdot (N_c/N_{RB})}^{(n+1) \cdot (N_c/N_{RB}) - 1} \log_2(1 + \gamma(u, k)) \quad (2)$$

ここで $\gamma(u, k)$ は第 u UE の STBC 復号後の第 k サブキャリアの瞬時 SINR であり, 次式で表される[5,8].

$$\gamma(u, k) = \frac{\frac{E_s}{N_0} |\hat{H}(k)|^2}{\mu_u^{\text{noise+ICI}}(u)} \quad (3)$$

ここで, E_s/N_0 は正規化送信シンボルエネルギー対熱雑音電力スペクトル密度比である. $\hat{H}(k)$, $\mu_u^{\text{noise+ICI}}(u)$ はそれぞれ, 下りリンクチャネル利得と第 u UE が受ける下りリンク ICI 電力スペクトル密度であり, 次式で与えられる.

$$\hat{H}(k) = \frac{\sum_{n_{ue}=0}^{N_{ue}-1} \sum_{n_{bs}=0}^{N_{bs}-1} |H(k; n_{ue}, n_{bs})|^2}{\sqrt{\frac{1}{N_c/N_{RB}} \sum_{k=u \cdot (N_c/N_{RB})}^{(u+1) \cdot (N_c/N_{RB}) - 1} \sum_{n_{bs}=0}^{N_{bs}-1} \sum_{n_{ue}=0}^{N_{ue}-1} |H(k; n_{ue}, n_{bs})|^2}} \quad (4)$$

$$\mu_u^{\text{noise+ICI}} = 1 + \frac{I_0(u)}{N_0} \quad (5)$$

スケジューラは t タイムスロット毎に N_{RB} 台の UE に通信機会を割り当てる. また, N_{slot} 個のタイムスロットの時間幅をスケジューリング区間とし, この区間ではマクロセル内の UE 位置は変わらないものとする. 第 t タイムスロットの第 n ($0 \sim N_{RB}-1$) リソースブロックが割り当てられたときの第 u UE の UE リンク容量を $C(u, n, t)$ で表すと, 第 u UE のスケジューリング区間平均 UE リンク容量は次式により求めることができる.

$$\bar{C}(u) = \frac{1}{N_{\text{slot}}} \sum_{t=0}^{N_{\text{slot}}-1} C(u, n, t) \quad (6)$$

スケジューリング区間の間は UE 位置が変わらないと仮定しているため, 伝搬損失とシェドウィング損失も変わらないものとした. また, フェージングはタイムスロット毎に独立に変動するものとした.

3.4. シミュレーション諸元

シミュレーション諸元を表1に示す. 総サブキャリア数 N_c およびサイクリックプレフィックス (CP) 長 N_{cp} はそれぞれ $N_c=1024$ および $N_{cp}=128$ としている. 各クラスタ内に配置されている $N_{CLUS-DA}$ 本の DA から $N_{bs}=4$ 本の送信アンテナを瞬時電力の大きい順に選択するものとし, UE は $N_{ue}=2$ 本の受信アンテナを搭載しているものとする. また, $U_{act}=56$ 台の UE をマクロセル内に一様ランダムに分布させ, 各クラスタ内で独立に RR スケジューリングを用いて同時多重 UE 数 $U=1$ 台として順番に通信機会を UE に割り当てるものとする. スケジュール区間 ($N_{slot}=56$ スロット) における UE 当りの通信機会はクラスタ内の UE 数に依存する. UE 当りの平均通信機会は一次元 7 クラスタモデルでは平均 8 回 ($=U_{act}/(7 \text{ クラスタ} \times U)$), 一次元 14 クラスタモデルでは平均 16 回 ($=U_{act}/(14 \text{ クラスタ} \times U)$) となる. UE 配置はスケジュール区間ごとにランダムに変更するものとし, UE 配置を 3000 回変えて, その度にスケジュール区間平均 UE リンク容量を求めた.

計算法シミュレーションにより, 最大比送信ダイバシティを用いた STBC-TD の OFDM 下りリンク伝送の N_{slot} 間平均 UE リンク容量をシャノンの容量式より求めた. ここで, 累積分布関数 (CDF) の $x\%$ 値を $x\%$ アウテージリンク容量と呼ぶ.

図3に図2の1次元クラスタモデル(静的クラスタ, 7クラスタおよび14クラスタモデル)を用いたときのリンク容量のCDFを示す. 図3より, クラスタ分割を行わない1マクロセルの場合と比べて, クラスタ間干渉が無い理想的な場合の50%アウテージ UE リンク容量は, 7クラスタ分割のとき約7倍, 14クラスタ分割のとき約12倍だけ増加する. しかし実際には, クラスタ間干渉が存在するため, 50%アウテージ UE リンク容量の増加はそれぞれ約5倍と約7倍に制限されており, クラスタ間干渉の低減が必要であることが分かる.

図4に図2(a-1,a-2)一次元7クラスタモデルにおける動的クラスタ制御によるUEリンク容量の改善効果を示す. ここで, UE#0はクラスタ端に位置する最悪環境下のUE(図2(a-1)参照)を意味する. 図4より, 動的クラスタ制御を適用することで, UE#0のような最悪環境下のUEのリンク容量を向上(50%アウテージUEリンク容量で約1.5倍の向上)できることが分かる. しかしながら, UE全体(全UEをマクロセル内にランダム配置した場合)でみたUEリンク容量では, その改善効果は僅かである. これは, 図2(a-1,a-2)のような一次元7クラスタモデルでは, 隣接クラスタから強い干渉を受けるUEがほとんど存在しないため, 動的クラスタ制御の効果がUE全体としては確認できないためと考えられる.

次に図5に一次元14クラスタモデル(図2(b-1,b-2)参照)における動的クラスタ制御によるUEリンク容量の改善効果を示す. 図5より, クラスタ端UE#0は動的クラスタ制御を適用することでリンク容量が向上していることが分かる. また, クラスタが細分化されたことで, 7クラスタモデルと比べて, クラスタ間干渉をより強く受けるUEが増えたため, UE全体で見た場合でも10%アウテージUEリンク容量において1割程度の向上効果が確認できる. しかしながら, 依然と

して向上効果が小さいのは一次元モデルでは隣接クラスタから強い干渉を受けるUEが少ないためと考えられる.

次に動的クラスタ制御によるクラスタ間干渉回避効果を確認するため, 図6に, 一次元7クラスタモデルにおいて, 注目UE#0(図2(a-1,a-2)参照)が通信機会を割り当てられたときの所望信号電力とクラスタ間干渉電力の確率密度分布を示す. 図6より, クラスタパターン#0(UE#0がクラスタ端の場合)からクラスタパターン#1(UE#0がクラスタ中央の場合)へとクラスタ境界を切り替えることで, UE#0の所望信号電力が増大するとともに, クラスタ間干渉電力が低減していることが分かる. これは, クラスタ境界の切替によってUE#0がクラスタ端UEからクラスタ中央UEに変わったことで, よりチャネル利得の高い分散アンテナを選択できるようになったことにより所望信号電力が改善したことと, 隣接クラスタの干渉源(隣接クラスタの分散アンテナ)から物理的に離れたことによりクラスタ間干渉が低減したためと考えられる.

表1 シミュレーション諸元

Network	No. of distributed antennas	$N_{macro}=56$
	Small-cell radius	$R'=R/\sqrt{N_{macro}}$
Transmitter/Receiver	Antenna deployment	uniform
	Normalized transmit E_s/N_0	30dB
	No. of FFT/IFFT block size	$N_c=1024$
	Guard interval length	$N_{cp}=128$
	No. of transmit antennas/cluster	$N_{bs}=4$
Propagation channel	No. of receive antennas	$N_{ue}=2$
	Path loss exponent	$\alpha=3.5$
	Shadowing loss standard deviation	$\sigma=7.0\text{dB}$
	Channel estimation	Ideal
	Frequency-Selective block	
	K factor of Nakagami-Rice	$K=10\text{dB}$
Scheduling criteria	Power delay profile (PDP) shape	16-path uniform
	Round-robin scheduling	
	Active users	$U_{act}=56$
	Multiplexed user	$U=1$
	Scheduling period	$N_{slot}=56$

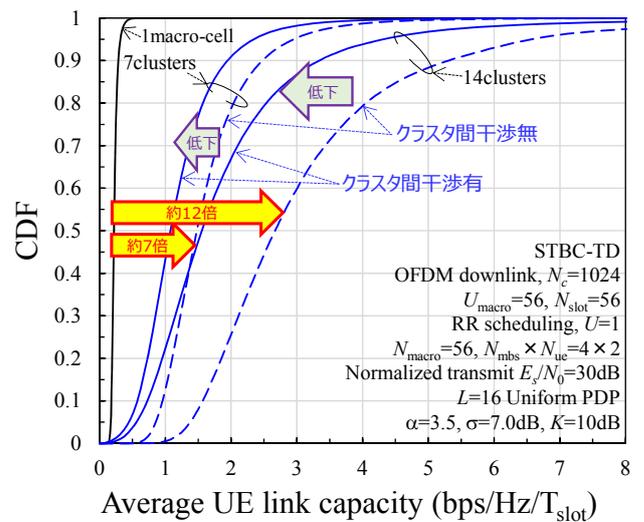


図3 クラスタ分割によるリンク容量の向上効果

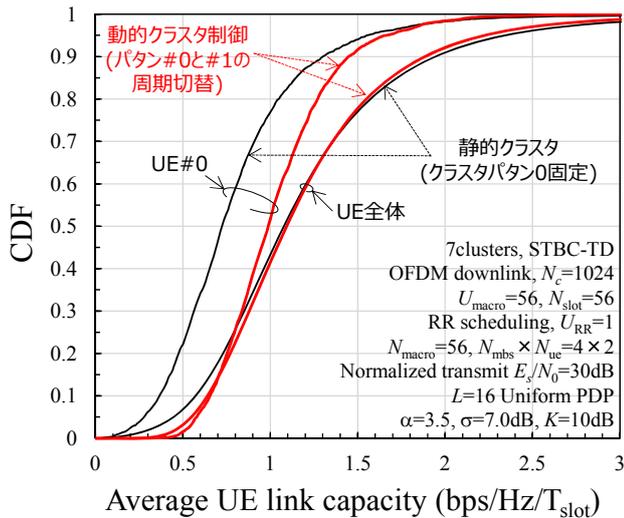


図4 動的クラスタ制御による UE リンク容量の改善効果 (一次元 7 クラスタモデル)

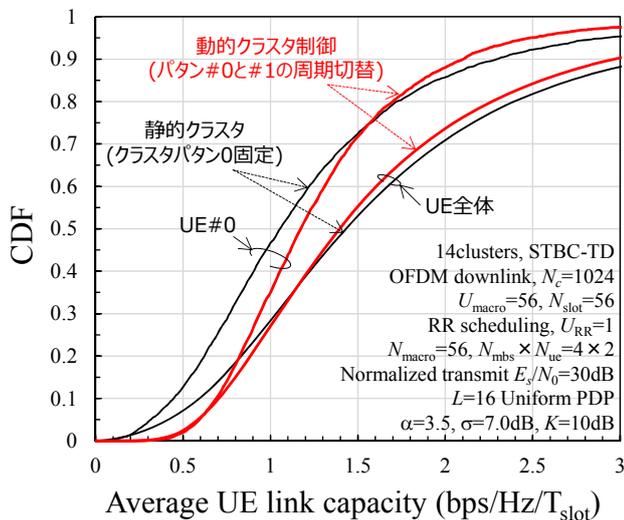


図5 動的クラスタ制御による UE リンク容量の改善効果 (一次元 14 クラスタモデル)

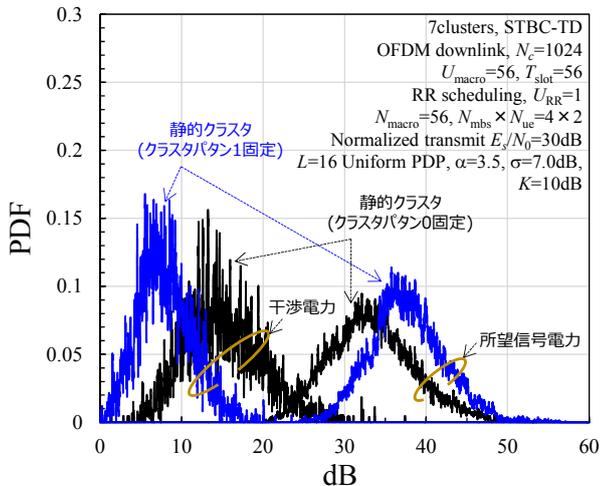


図6 UE#0 が割当られた場合の所望信号電力とクラスタ間干渉電力の分布 (一次元 7 クラスタモデル)

4. まとめ

本稿では、動的クラスタ制御を提案し、分散 MIMO 協調アクセスネットワークにおいて、単純な一次元クラスタモデルに動的クラスタ制御を適用した場合の OFDM 下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、動的クラスタ制御によるリンク容量の改善効果を評価した。

動的クラスタ制御を適用することで、クラスタ境界に位置する UE が常に劣悪な環境に陥ることを回避でき、クラスタ端 UE リンク容量を改善できることを示した。

今後は、スケジューリングと動的クラスタ制御との組み合わせ、および二次元クラスタモデルへの拡張時の適用効果などについて検討を行う予定である。

謝 辞

本稿は、総務省委託研究開発「第 5 世代移動通信システム実現に向けた研究開発～超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発～」による委託を受けて実施した研究開発による成果である

文 献

- [1] Wang, et al., "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," IEEE Commun. Mag., Vol. 52, Issue 2, pp. 122-130, Feb. 2014.
- [2] Samsung, "R1-083569: Further discussion on inter-cell interference mitigation through limited coordination," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #54, 2008.
- [3] S.M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE J. Sel. Areas. Commun., Vol.16, No.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.
- [4] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," IEEE Trans.on Inform. Theory, Vol. 45, No. 5, pp. 1456-1467, July 1999.
- [5] H. Tomeba, K. Takeda, and F. Adachi, "Space-time block coded joint transmit/receive diversity in a frequency-nonselctive Rayleigh fading channel," IEICE Trans. Commun., Vol. E89-B, No. 8, pp. 2189-2195, Aug. 2006.
- [6] 齋藤, 安達, "STBC ダイバーシチを用いる協調分散アンテナネットワークにおけるスケジューリングに関する一検討," 信学技報, Vol.116, No.257, RCS2016-154, pp.7-12, 2016年10月.
- [7] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- [8] F. Adachi, A. Boonkajay, Y. Seki, T. Saito, S. Kumagai and H. Miyazaki, "Cooperative Distributed Antenna Transmission for 5G Mobile Communications Network," IEICE Trans. Commun., Vol.E100-B, No.8, pp.1189-1204, Aug. 2017.