分散 MIMO 協調伝送における適応セル間干渉制御に関する一検討

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 協調伝送では、ユーザ近傍の分散アンテナを選択することによって、集中 MIMO 協調伝 送に比べ、隣接マクロセルとの境界に位置するセル端ユーザでも高いリンク容量を達成できる.しかし、依然とし てセル端ユーザは隣接マクロセルから強いセル間干渉(inter-cell interference: ICI)を受けることから、孤立マクロセル に比べてリンク容量が低下する.これを救済するために、本稿では、マクロセル内ユーザ全体の受信 ICI の累積分 布に基づいてセル端とセル中央とにユーザを分類し(第1ステップ)、セル端ユーザには FFR に基づく帯域割り当て に加えて受信 SIR が高い他の帯域も利用させる(第2ステップ)という自律分散適応 ICIC を提案している.計算機 シミュレーションにより、時空間符号化送信ダイバーシチ(STBC-TD)を用いた分散 MIMO 協調伝送のリンク容量を 求め、第1ステップにおけるセル端とセル中央とにユーザを分類する ICI スレシホルドおよび第2ステップにおけ る利用帯域の追加を判断する SIR スレシホルドの影響について考察し、最適なスレシホルドを明らかにしている. また、分散アンテナ配置(規則的またはランダム)が適応 ICIC へ及ぼす影響についても考察している.その結果、自 律分散適応 ICIC を用いることでセル中央ユーザのリンク容量を劣化させることなく、セル端ユーザの平均リンク容 量を ICIC 非適用時と比較しておよそ1.3 倍に改善できることを明らかにしている.

キーワード 分散 MIMO,協調伝送, ICIC, STBC-TD

Study on Adaptive ICIC for Distributed MIMO Cooperative Transmission

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 Distributed multi-input multi-output (MIMO) transmission can improve the link capacity of users located at macro-cell edge compared to conventional co-located MIMO since the distributed antennas are close to users. However, the link capacity of users at macro-cell edge still degrades due to inter-cell interference (ICI) from neighbor macro-cells, compared to single macro-cell environment. In order to mitigate the ICI problem, in this paper, we propose a decentralized adaptive ICI coordination (ICIC) which is based on 2-step operation. The decentralized adaptive ICIC firstly classifies cell-edge users based on cumulative distribution of ICI, then decides to allow cell-edge users to use other frequency bands with high received signal-to-interference power ratio (SIR) in addition to bandwidth allocation based on fractional frequency reuse (FFR) policy. We evaluate, by computer simulation, the link capacity for distributed MIMO cooperative transmission using space-time coded block transmit diversity (STBC-TD). We consider the impact of optimum threshold, the ICI threshold in the first step and the SIR threshold in the second step. Moreover, we discuss the impact of distributed antenna deployment (uniform or random). Simulation results confirms that the proposed decentralized adaptive ICIC can improve average link capacity of cell-edge user up to 30 % without deteriorating the link capacity of user over all macro-cell area, compared to transmission without ICIC.

Keywords distributed MIMO, cooperative transmission, ICIC, STBC-TD

1. まえがき

第5世代移動無線通信システムでは、更なる高速デ ータ通信のために通信エリア全体で広帯域伝送の実現 が求められている.しかしながら、広帯域無線チャネ ルは伝搬損失、シャドウィングおよび周波数選択性フ ェージングにより伝送品質が著しく劣化してしまう [1].これらの問題を克服するために、マクロセル内に 多数の分散アンテナを配置し、それらを協調して利用 する分散 MIMO 協調伝送が近年注目を集めている [2]-[4].分散 MIMO 協調伝送では、ユーザ端末(UE) 近傍の分散アンテナ(DA)を用いることにより伝搬損 失とシャドウィング損失の影響を低減でき,通信マク ロセルエリア全体に亘って優れた伝送品質を達成でき る.また,分散 MIMO に 2 本以上の DA を用いる時空 間ブロック符号化送信ダイバーシチ(STBC-TD)[5],[6] を適用することで更に伝送品質が改善できる[7].

ところで,第 5 世代システムでも,第 4 世代 (LTE-Advanced)システムと同様に1周波数繰り返しを用い ると、マクロセル境界に位置するUEは隣接マクロセルからの 強いセル間干渉(ICI)を受けるため、UE スループットが低 下してしまう.部分周波数繰り返し(FFR)に基づいたセル間 干渉制御(ICIC)[8],[9]を用いてこの問題を解決できる.例 えば、各マクロセル端に3周波数繰り返しFFRを適用

Copyright ©2017 by IEICE

して3帯域の内の一つを予め配置しておく(本稿では, これを固定 ICIC と呼ぶ).これにより,セル端UEの受 信 SINR (signal-to-interference plus noise power ratio)を 改善できる[10],[11].しかし,固定 ICIC ではセル端 UE の利用帯域幅が3分の1に狭まるからリンク容量 の改善効果は限定的である.また,実際のセルラ環境 では UE 分布やマクロセル基地局の分布には偏りがあ るため,セル端 UE の利用帯域を固定しておくと,受 信 SINR が劣化することもある.そこで,セル端 UE の利用帯域を動的に決定する適応 ICIC[12]の適用が考 えられるが,マクロセル基地局間でセル端 UE が利用 する帯域や送信電力などの情報(以下,帯域利用情報と 呼ぶ)の共有が必要である.

そこで本稿では自律分散適応 ICIC を提案している. 自 律分散適応 ICIC では、まず各マクロセル基地局がUEの受 信セル間干渉(ICI)レベルの観測結果を収集して、ICIレベ ルの累積分布に基づき、UE をセル端とセル中央に分類す る. 次いで、3 周波数繰り返し FFR を適用して各マクロセル 端に3 帯域の内の一つを予め配置しておくが、瞬時受信 SIR 観測値をもとに他の帯域も追加利用させる(なお、3 周 波数繰り返し FFR に基づいて各マクロセル端に3帯域の内 の一つを予め配置する代わりに、瞬時 SIR に基づいて3帯 域の内の複数の帯域を動的に決定することも可能).

本稿の構成は以下の通りである.第2章において従 来の固定 ICIC および適応 ICIC について説明し,第3 章にて自律分散適応 ICIC を提案する.第4章で計算機 シミュレーション結果を示し,自律分散適応 ICIC の効 果について考察する.第5章で結論を述べる.

2. 従来の ICIC 技術

2.1. 固定 ICIC

図1に、3周波数(W1,W2,W3)繰り返しFFRを用いた固定 ICICの周波数割当を示す.セル端UEにはFFRに基づい て3つの帯域の内の一つを割り当て、中央セル内UEには 残りの2つの帯域(W0)を割り当てる(セル端とセル中央の通 信時間を分割すれば、セル中央UEについては全帯域の 利用が可能).図1に示すように、隣接するマクロセル間の セル端では、異なる周波数帯域が割り当てられる.これによ り、セル端UEが受ける周辺マクロセルからのICIを低減でき、 受信SINRを改善できる.しかし、セル端UEには全周波数 帯域の3分の1しか割り当てられないため、固定ICICによ るリンク容量の改善効果は限定的である.



2.2. 適応 ICIC

図2に適応 ICIC の周波数割当を示す. 各マクロセルの

セル端 UE には適応的に 1 つないし複数の帯域 (Wedge)を 割り当て、中央 UE には残りの帯域 (Wcenter)を割り当てる. 各マクロセル基地局は隣接マクロセルのセル端 UE の帯域 利用情報を共有し、隣接セルのセル端 UE が利用している 帯域を避けて、予め決められた順番で各マクロセルは自セ ルのセル端 UE の利用帯域を決定する(例えば、帯域決定 の優先権はセル番号順とする). これにより、マクロセル間の セル端 UE は互いに ICI の少ない帯域を利用できるようにな り、受信 SINR が改善する. また、複数の帯域が利用できれ ばリンク容量の向上が見込める. しかしながら、隣接セルの セル端 UE の帯域利用情報をマクロセル基地局間で共有 する必要がある.



図2 適応 ICIC の周波数帯域割当

3. 自律分散適応 ICIC の提案

図3に自律分散適応ICICの周波数割当の一例を,図4 にセル端とセル中央 UE の通信割当時間を示す.各マクロ セルの中央 UE には全周波数帯域(W1+W2+W3)を割り当て, セル端 UE には3周波数繰り返しFFR に基づくデフォルト 帯域に加えて、セル端 UE で観測した受信 SIR レベルがス レシホルド以上の帯域を追加して割り当てる.このように自 律分散適応 ICIC では、マクロセル基地局間でセル端 UE の帯域利用情報の共有なしに、各マクロセルが自律してマ クロセル端帯域を決定する.



図4 セル端とセル中央 UE の通信時間割当

自律分散適応 ICIC の手順は,図5に示すように,2つス テップから構成されている.以下では,第1ステップの干渉 観測よるセル端 UEとセル中央 UEの分類方法,第2ステッ プのセル端 UEの利用帯域幅の決定方法について述べる.

ステップ1:セル端とセル中央の分類

各 UE は周辺マクロセルから受ける ICI レベルを測定し, 定期的(または通信前に)に基地局へ報告する. 各マクロセ ル基地局は収集した ICI レベルをもとに受信 ICI レベルの 統計データベースを更新する. 次に,基地局は ICI スレシホ ルドレベル(例えば,受信 ICI レベルの累積分布の90%値) を決定し,マクロセル内の UE をセル端 UE とセル中央 UE と に分類する.

ステップ 2:利用周波数帯域の決定

セル中央 UE には全周波数帯域を割り当て、セル端 UE には FFR によって予め決定されたデフォルト帯域に加えて、 SIR スレシホルドを超える帯域を追加で割り当てる.これによ り、局所的には利用帯域の重複による ICI の増加により受 信 SINR が劣化してリンク容量が低下することが懸念される ものの、デフォルト帯域に加えて受信 SIR が高い帯域を追 加割り当てするため、セル端 UE のリンク容量の向上が期待 できる.



図5 自律分散適応 ICIC の手順

4. 計算機シミュレーション

4.1. 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チャネルのセル間 干渉(ICI)が存在するマルチセル環境を仮定する.図6に セル配置とアンテナ配置モデル(*N*macro=19, DA 規則配置) を示す.中央マクロセル(#0)を注目マクロセルとし、その周 辺に19個のマクロセル(#1~#18)が存在するものと仮定し ている.分散MIMOを用いたネットワークでは、ひとつのマク ロセル基地局(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 とし、各マクロセル基地局はマクロセル内の*N*macro本のDA から瞬時電力規範に基づいて*N*mbs本のDAを送信ダイバ ーシチブランチとして選択して、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. 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 間のチャネル利得の差が小さく なることから、予め決めた順番に 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[13]. そこで、以下では、RR スケジューリングを 用いてセル中央 UE とセル端 UE にそれぞれ順番に通信機 会を与えることとした.



4.2. 伝搬モデル

広帯域無線伝搬チャネルは伝搬損失,シャドウィング損 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[1]. 第 n_{mbs} 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 数選択性仲上・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_{mbs} DA—第u UE 間距離 ($d_{u,n_{mbs}}$)が小セル半径以下の場合($d_{u,n_{mbs}} \leq R'$)は, DA—UE 間のチャネルは周波数選択性仲上・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_{mbs} DA—第uUE 間距離が小セル半径より大きい場合($d_{u,n_{mbs}} > R'$)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のものとする.第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間のチャネルインパルス応答 $h(n_{ue,n_{mbs}},\tau)$ は次 式で表される.

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

ここでαは伝搬損失指数であり, $\eta_{n_{uc},n_{mbs}}$ は第 n_{mbs} DA— 第 u UE 間のシャドウィング損失(dB)である. また, K は仲 上・ライスフェージングの K ファクタである. $\theta(n_{ue}, n_{mbs})$ は第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間チャネルの主要波の位相で あり, $\tau_{n_{uc},n_{mbs}}$ は主要波の遅延時間である. また, $\xi_{n_{uc},n_{mbs}}(l)$ は 第 n_{mbs} 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, $\tilde{\tau}_{n_{uc},n_{mbs}}(l)$ は第 l 遅延パスの遅延時 間である.

4.3. 下りリンク容量の計算式

本稿では、STBC 復号後の受信信号対(雑音+CCI)電 力比(SINR)とシャノンの容量式[1]に基づいてOFDM下りリ ンク容量を求める. 第 *u* UE の OFDM 下りリンク容量 *Cu* (bps/Hz)は次式により計算できる.

$$C_{u} = W \cdot \frac{1}{N_{c}} \sum_{k=0}^{N_{c}-1} \log_{2}(1 + \gamma_{u}(k))$$
(2)

ここで, *N*_cは総サブキャリア数であり, Wとγ_u(k)は帯域幅と第 u UE の STBC 復号後の第 k サブキャリアの瞬時 SINR であ る[14].

OFDM 下りリンクにおける平均 UE リンク容量の累積分布 関数 (CDF)を計算機シミュレーションにより求め, UE リンク 容量の CDFの x%値を x%アウテージ UE リンク容量と呼ぶ.

4.4. 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.FFT/IFFT ブロックサ イズ N_c および CP 長 N_{cp} はそれぞれ N_c =128 および N_{cp} =16 としている.マクロセル内に配置する DA 本数 N_{macro} =19 とし、 アンテナ配置は規則配置およびランダム配置としている.伝 搬損失指数 α およびシャドウィング損失の標準偏差 σ はそれ ぞれ α =3.5 および σ =7.0dB と仮定している.また,DA—UE 間距離が小セル半径 R'以下の場合 ($d_{u,n_m} \leq R'$),フェー ジングチャネルは K=10dB の周波数選択性仲上・ライスフェ ージングチャネルになり、一方 DA—UE 間距離が小セル半 径 R' より大きい場合 ($d_{u,n_m} > R'$)は、周波数選択性レイリ ーフェージング(つまり K=0dB)になるものと仮定している.

本稿では、チャネル推定は理想的であるものと仮定して いる.また、各UEの受信ICIレベルおよび各周波数帯域の 受信SIRレベルは理想的にマクロセル基地局に報告できる ものと仮定し、UEをセル端とセル中央に分類する受信ICI レベルのスレシホルドは、受信ICIレベルの累積分布の95% 値(全アクティブUEの内ICIレベルの高い上位5%のUE がセル端UEに分類される)に設定とした.STBC-TDを用い た分散MIMOのOFDM下りリンク容量[15]を計算機シミュ レーションにより求め、セル端UEおよびセル中央UEのリン ク容量の分布を求めた.

Network	No. of distributed antennas	N _{macro} =19
	Small-cell radius	$R' = R / \sqrt{N_{\text{macro}}}$
	Antenna deployment	uniform, random
Transmitter/ Receiver	Normalized transmit E_s/N_0	50dB
	No. of FFT/IFFT block size	$N_{c} = 128$
	Guard interval length	N _{cp} =16
	No. of transmit antennas	$N_{\rm mbs}=4$
	No. of receive antennas	$N_{ue}=2$
Propagation channel	Path loss exponent	α=3.5
	Shadowing loss standard deviation	σ=7.0dB
	Channel estimation	Ideal
	Frequency-Selective block	
	Nakagami-Rice / Rayleigh fading	
	K factor of Nakagami-Rice	K=10dB
	Power delay profile (PDP) shape	16-path uniform
Schdeuling criteria	Round-robin scheduling	
	Active user	$U_{\text{act}}=40$
	Multiplexed user	U=1
Proposed scheme threshold	1st step ICI threshold	95%
	2nd step SIR threshold	10, 30dB

表1 シミュレーション諸元

4.5. 固定 ICIC と適応 ICIC の比較

図7に、固定 ICIC (DA 規則配置、 セル端 UE が1帯域 のみ利用), 適応 ICIC (DA 規則配置, セル端 UE が最大3 帯域利用)のセル端 UE リンク容量の累積分布を示す.図7 より,固定 ICIC を適用することで, ICIC 非適用時に比べて, 10%アウテージ UE リンク容量を向上できることが分かる.し かしながら,90%アウテージ UE リンク容量は低下してしまう. これは、3周波数繰り返しFFRによってICIが低減されて得 られた UE リンク容量向上効果よりも、利用帯域を3分の1 に狭めたことによるリンク容量低下の影響が大きいためであ る.一方,自律分散適応 ICIC(最大3帯域利用)を用いた 場合,第2ステップのSIR スレシホルドを10dBに設定したと き, セル端 UE の平均リンク容量が ICIC 非適用時と比べて 約 1.6 倍に向上している. また, ICIC 非適用時に比べて, 全領域においてリンク容量が改善していることが分かる.し かしながら, 10%アウテージ UE リンク容量は固定 ICIC 適用 時に比べて劣化してしまう.これは,各マクロセル基地局が セル端 UE の利用帯域を独立に決定しているため,隣接マ クロセルのセル端 UE が同じ帯域を利用することがあり,受 信 SINR が低下してしまうことがあるためである.

次に、図8に適応ICICにおけるセル端UEの最大利用 可能帯域数を2に制限した場合のUEリンク容量の累積分 布を示す.図8より、ICIC 非適用時と同程度の90%リンク 容量を達成しつつ、固定ICICと遜色のない10%アウテージ UEリンク容量を達成できることが分かる.これは、隣接マクロ セル間のセル端UE同士で同じ帯域を利用することを避け ることができるためである.第2ステップのSIRスレシホルドが 10dBのとき、セル端UEの平均リンク容量はICIC非適用時 と比べて約1.3倍に向上している.

図 9 にセル端 UE のリンク容量の確率密度分布を示す. 固定 ICIC を用いた場合,低いリンク容量となる確率が小さくなるものの,高いリンク容量となる確率も小さくなっていることが分かる.一方,自律分散適応 ICIC を用いた場合,セル端 UE リンク容量の分布全体が高いリンク容量の方へシフトしていることが分かる.また,セル端 UE の利用帯域を最大3 帯域まで許可すれば,高いリンク容量を得る確率が高くなる ものの,低いリンク容量となる確率も高めてしまう.しかし,最 大利用帯域を2帯域までに制限すれば,セル端 UE 全体の リンク容量を高めることができる.



図 7 適応 ICIC における UE リンク容量の累積分布 (DA 規則配置, 最大 3 帯域利用)



図 8 適応 ICIC における UE リンク容量の累積分布 (DA 規則配置, 最大 2 帯域利用)



(DA 規則配置)

4.6. 集中 MIMO と分散 MIMO の比較

自律分散適応 ICIC を集中 MIMO に適用することもできる. 集中 MIMO および分散 MIMO (DA 規則配置) における UE リンク容量の累積分布をそれぞれ図 10 および 11 に示 す.

図 10より,自律分散適応 ICIC(最大2帯域利用)を用い ることで,集中 MIMO の場合でもセル端 UE のリンク容量を 向上できる.分散 MIMO におけるセル端 UE の平均リンク 容量は ICIC 非適用時の約 1.3 倍であるが,集中 MIMO の 場合はそれより大きい約 1.8 倍である.集中 MIMO 場合, 信号送信点はマクロセル中央に集中しているため,マクロセ ル境界付近の UE の受信 SINR は極めて低く(0dB 近く)な るために, ICI 回避によるリンク容量向上効果が大きいから である. 一方,分散 MIMO の場合,マクロセル境界付近の UE においても,信号送信点が UE 近傍にあるため, ICI 回 避によるリンク容量の向上効果は集中 MIMO に比べて小さ くなる.



図 11 マクロセル全体の UE リンク容量 (集中 MIMO vs 分散 MIMO)

4.7. アンテナ配置法の影響

図 12 に、分散アンテナを規則に配置した場合とランダム に配置した場合の UE リンク容量の累積分布を示す. DA を ランダム配置した場合の最小 DA 間距離 $d_{\text{DA-DA}}$ は、小セル 半径 $R' (= R/\sqrt{N_{\text{macro}}}) の 10 分の1 以上となるように制限して$ いる(図 13).図 12 より、DA の規則配置の方がわずかに大きなリンク容量が得られるものの、DA 配置法に依らずほぼ同じリンク容量が得られることが分かる.



図 12 平均合計リンク容量と平均 FI の関係 (Nmacro=19, DA 規則配置 vs DA ランダム配置)



図 13 DA ランダム配置と最小 DA 間距離(Nmacro=19)

5. まとめ

本稿では、2 ステップからなる自律分散適応 ICIC を提案 し、分散 MIMO における STBC-TD を用いる OFDM 下りリ ンク容量に及ぼす効果について計算機シミュレーションによ り評価した.マクロセル基地局間で帯域利用情報の共有な しに自マクロセルのセル端 UE の利用帯域を決定する自律 分散適応 ICIC では、マクロセル全体の UE のリンク容量を 低下させることなくセル端 UE リンク容量を向上できることを 明らかにした.また、実環境のように分散アンテナがランダム 配置である場合でも、自律分散適応 ICIC は規則配置と同 様にセル端 UE のリンク容量を改善できることを示した.また、 自律分散適応 ICIC は集中 MIMO にも適用できることも示 した.

今後は、第1ステップのUEのセル端/セル中央分類に用いるICIスレシホルドの影響の検討、およびセル端の周波数繰り返しパタンを自律的に決定する方法の検討などを行う予定である.

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] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- [2] F. Adachi, K. Takeda, T. Obara, T. Yamamoto, and H. Matsuda, "Recent advances in single-carrier frequency-domain equalization and distributed antenna network," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E93-A, No.11, pp.2201-2211, Nov. 2010.
- [3] F. Adachi, K. Takeda, T. Yamamoto, R. Matsukawa, and S. Kumagai, "Recent advances in dingle-carrier distributed antenna network," Wireless Commun. and Mobile Computing, Vol. 11, Issue 12, pp. 1551–1563, Dec. 2011, doi: 10.1002/wcm.1212.
- [4] 瀬山、小林、伊達、関、箕輪、須山、奥村、"5G 超高密度分散アンテナシステムにおける協調 MU-MIMO 送信の基礎検討,"信学会ソサイエティ 大会、B-5-65,2015年9月.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 齋藤,宮崎,安達,"マルチセル環境下における分 散アンテナ STBC 送信ダイバーシチの OFDM 下り リンク伝送特性に関する検討,"信学技報,Vol. 115, No. 472, RCS2015-335, pp. 13-18, 2016年3月.
- [8] G. Boudreau. J. Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang, and S. Vrzic, "Interference coordination and cancellation for 4G networks," IEEE Commun. Mag., Vol.47, No.4, pp.74-81, April 2009
- [9] M. Rahman, H. Yanikomeroglu and W. Wong, "Interference avoidance with dynamic inter-cell coordination for downlink LTE system," Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.1-6, Budapest, Hungary, 5-8 April 2009.
- [10] Ericsson, "R1-050764: Inter-cell interference handling for E-UTRA", 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #42, 2005.
- [11] B. M. Hambebo, M. M. Carvalho, and F. M. Ham, "Performance evaluation of static frequency reuse techniques for OFDMA cellular networks," Proc. 2014 IEEE 11th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), Miami, USA, 7-9 Apr. 2014.
- [12] D. Kimura, Y. Harada, and H. Seki, "De-centralized dynamic ICIC using X2 interfaces for downlink LTE systems," Proc. 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), Budapest, Hungary, 15-18 May 2011.
- [13] 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.
- [14] H. Tomeba, K. Takeda, and F. Adachi, "Space-time block coded joint transmit/receive diveristy in a frequency-nonselective Rayleigh fading channel," IEICE Trans. Commun., Vol.E89-B, No.8, pp.2189-2195, Aug. 2006.
- [15] 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. 1190-1204, Aug. 2017.