

時間及び周波数分割チャネルを用いる HetNet における 干渉測定型チャネル棲み分けに関する基礎検討

菅井 廉[†] 天間 克宏[†] Abolfazl MEHBODNIYA[†] 安達 文幸[‡]

東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†]{sugai, tenma, mehbod}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 大セル基地局(MBS)がカバーする通信エリア内に多数の小セル基地局(SBS)を設置するヘテロジニアスネットワーク(HetNet)では、MBS と SBS で同じ無線リソースを共用する場合、BS 間の同一チャネル干渉(CCI)が問題となる。干渉測定型チャネル棲み分けに基づく動的チャネル配置(IACS-DCA)では、各 BS が利用可能なチャネルの中で過去平均 CCI 電力が最小のチャネルを選択する。選択されたチャネルは大セルの内外に存在する周辺 BS への与干渉が小さいチャネルであり、与干渉が小さくなるようなチャネル再利用パターンが自律的に形成される。本稿では、時間及び周波数分割チャネルを用いる HetNet への IACS-DCA の適用に関する検討を行っている。計算機シミュレーションにより、時間及び周波数分割チャネルを用いる HetNet においても、IACS-DCA により与干渉の少ないチャネル再利用パターンを自律的に形成できることを示す。

キーワード チャネル棲み分け、動的チャネル配置、同一チャネル干渉、ヘテロジニアスネットワーク

A Study on Interference-Aware Channel Segregation for HetNet Using Time- and Frequency-Division Channels

Ren SUGAI[†] Katsuhiko TEMMA^{1†} Abolfazl MEHBODNIYA[†] and Fumiyuki ADACHI[‡]

Dept. of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05, Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: [†]{sugai, tenma, mehbod}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract One of the problem in heterogeneous network (HetNet), which is a combination of several small cell base stations (SBSs) and an overlaid macro cell base station (MBS), is the co-channel interference (CCI) between BSs when MBS and SBSs share the same radio resource. Using interference-aware channel segregation based dynamic channel assignment (IACS-DCA), each BS periodically measures the average CCI power on all available channels and selects the channel with the lowest average CCI power computed from the past measurements. The channel with the lowest average CCI power is considered not to be used by the neighboring BSs inside and outside of the macro-cell of interest, and therefore, IACS-DCA forms a channel reuse pattern with low CCI in a distributed manner. In this paper, we apply the IACS-DCA to HetNet using time- and frequency-division channels. We show by computer simulation that IACS-DCA forms a channel reuse pattern with low CCI in HetNet using time- and frequency-division channels in a distributed manner.

Keywords Channel Segregation, Dynamic Channel Assignment, Co-Channel Interference, Heterogeneous Network

1. まえがき

無線通信で利用可能な周波数帯域は限られているので、空間的に離れた基地局(BS)で同一チャネルを再利用しなければならない。しかしながら、これにより同一チャネル干渉(CCI)が発生し通信品質を制限してしまう。また、実際の無線ネットワークでは、ユーザ端末(UE)分布の変化などに伴い干渉環境が時間と共に変化する。したがって、干渉環境の変化に追従して、他 BS に与える CCI を常に小さくするようにチャネルを再利用する動的チャネル配置(DCA)[1]-[3]が有効である。筆者らはこれまで、周波数分割チャネルを用い

るネットワークにおいて、干渉測定型チャネル棲み分けに基づく DCA(IACS-DCA)を用いれば、他 BS に与える CCI が小さいチャネル再利用パターンを自律的に形成できることを示した[4]-[6]。IACS-DCA では、各 BS が利用可能なチャネルの CCI 電力を周期的に観測し、過去の観測値を用いて平均 CCI 電力を計算し、平均 CCI 電力が最小のチャネルを選択する。

無線セルラーシステムにおけるトラヒックが近年急速に増大しており、無線ネットワークの更なる高速化、大容量化が求められている。この問題を解決する方法として、大セル基地局(MBS)がカバーする通信エ

リア内に多数の小セル基地局(SBS)を設置するヘテロジニアスネットワーク(HetNet)に注目が集まっている[7]. HetNetではMBSとSBSで同じ無線リソースを共用する場合、基地局間のCCIが問題となる[8]. IACS-DCAを周波数分割チャネルを用いるHetNetに適用することで、MBSからSBSへの強い干渉を回避したチャネル配置を自律的に形成できることが示されている[9].

本稿では、時間及び周波数分割チャネルを用いるHetNetにおけるIACS-DCAによるチャネル割当ての検討を行っている. 本稿におけるチャネルは1時間フレームを時間方向と周波数方向に分割したリソースブロックとして定義される. 各基地局(MBS, SBS)は、各チャネルの平均CCI電力を基にチャネル優先度テーブルを更新し、優先度1位(平均CCI電力最小)のチャネルを時間フレーム毎に選択する. 計算機シミュレーションにより、時間及び周波数分割チャネルを用いるHetNetにおいても、IACS-DCAにより、安定したチャネル再利用パターンを形成できることを示す.

本稿の構成は以下の通りである. 第2章で、IACS-DCAの動作原理とビーコン信号を利用するチャネル棲み分けについて説明する. 第3章は計算機シミュレーション結果を示し、BSの分布に対応したチャネル再利用パターンを形成できることを示す. 第4章でまとめる.

2. IACS-DCA

2.1. IACS-DCAの原理

図1に、各BSのIACS-DCAフローチャートを示す. 各BSは、利用可能な全チャネルの瞬時CCI電力を測定する. 次に、平均CCI電力を計算し、チャネル優先度テーブルを更新する. BSはチャネル優先度テーブルを参照して平均CCI電力最小のチャネルを選択し、次のチャネル優先度テーブル更新時点まで、このチャネルを使用し続ける. 各BSは、選択したチャネルでビーコン信号を報知し、配下のユーザ端末(UE)に使用チャネルを通知する. 各BSは、一定間隔でこれらの動作を繰り返す.

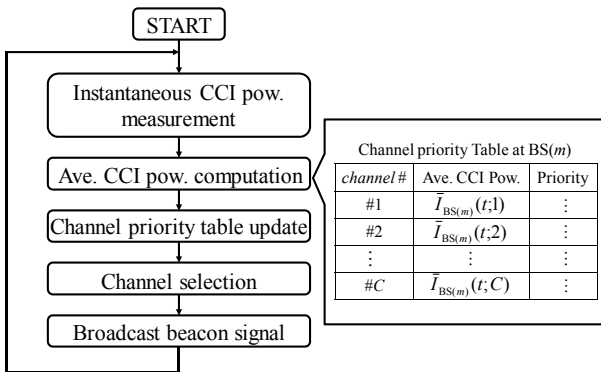


図1 IACS-DCAにおけるBSの動作

2.2. ビーコン信号を利用したIACS-DCA

IACS-DCAにおける瞬時CCI電力の測定方法の一つとして、各BSが報知するビーコン信号の受信電力を瞬時CCI電力とみなして測定する方法がある. このビーコン信号を利用して瞬時CCI電力を測定した場合でも、IACS-DCAによって他BSに与えるCCIが小さいチャネル再利用パターンを自律的に形成できることが示されている[6].

ビーコン信号を用いるIACS-DCAでは、BS間で使用チャネル情報の交換は必要ないが、ビーコン信号の送信と干渉測定という手段で使用チャネル情報の交換を行っていると考えられる. 一括してチャネル棲み分けを行うのが集中制御である. 自律分散でチャネル棲み分けを行うためには、BSが他BSの使用チャネルを観測して少しずつ使用チャネルを変えるしかない. つまり棲み分けに時間がかかるということである.

3. 計算機シミュレーション

3.1. システムモデルと計算機シミュレーション緒元

時間及び周波数分割チャネルを用いるHetNetにおいて、IACS-DCAにより形成されるチャネル再利用パターンを評価する. 評価指標として、本稿ではチャネル再利用パターンの自己相関と使用チャネルの公平性指標(fairness index)を用いる[5].

図2に、本稿で想定するチャネル構成を示す. C_F 個の周波数が存在する環境において、1つの時間フレームを C_T 個の時間スロットに分割した各リソースブロックをチャネルとして定義する. 第 $c_F(c_F=1\sim C_F)$ 周波数における第 $c_T(c_T=1\sim C_T)$ 時間スロットをチャネル $c(c_T, c_F)$ と表す. MBS, 各SBSは、 $C_T \times C_F$ 個のチャネルの中から1つ選択する.

計算機シミュレーションにおけるHetNetのセルモデルの一例を図3に示す. 六角形の大セルの中央にMBSが配置されている. シミュレーション試行毎に N_{SBS} 個のSBSを大セル内に一様分布で配置する. 各BSは全BSのビーコン信号を理想的に検出できると想定する. シミュレーション諸元を表1に示す. 大セルあたりSBS数を $N_{SBS}=15$, 周波数チャネル数を $C_F=2$, 時間スロット数を $C_T=8$ とした. したがって、総チャネル数は $C_{total}=C_T \times C_F=16$ となる. また、伝搬損失は距離減衰のみを考慮した.

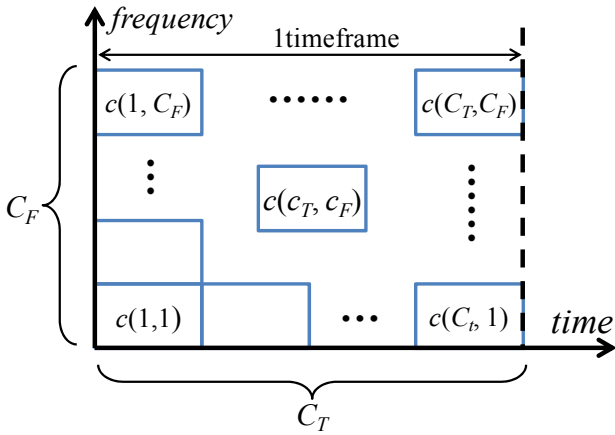


図2 時間フレームとチャネルの構成

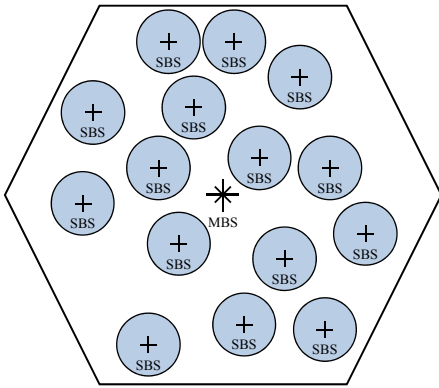


図3 HetNet セルモデルの例($N_{MBS}=1$, $N_{SBS}=15$)

表1 計算機シミュレーション諸元[10].

Network	No. of MBSs	$N_{MBS}=1$
	No. of SBSs	$N_{SBS}=15$
	No. of channels	$C_{total}=16$
		$C_F=2$
		$C_T=8$
	Carrier frequency	2 [GHz]
	Frequency bandwidth	10 [MHz]
Noise power spectrum density	-169 [dBm/Hz]	
Macro cell	Radius	250 [m]
	Min. MBS-SBS distance	75 [m]
	Transmit power of MBS	46 [dBm]
Small cell	Radius	40 [m]
	Min. SBS-SBS distance	40 [m]
	Transmit power of SBS	30 [dBm]
Path loss [10]	MBS-SBS	$15.3+37.6\log_{10}(d_{BS(m),BS(n)})$ [dB]
	SBS-SBS	$30.6+36.7\log_{10}(d_{BS(m),BS(n)})$ [dB]
	$d_{BS(m),BS(n)}$: distance between BS(m) and BS(n) [m]	

3.2. 伝搬モデル

第 m 番目の BS を $BS(m)$ と表す. $BS(m)$ における $BS(n)$ から報知されたビーコン信号の受信電力 $I_{BS(m),BS(n)}(t; c(c_F(n), c_T(n)))$ は次式で表される.

$$I_{BS(m),BS(n)}(t; c(c_F(n), c_T(n))) = 10^{\frac{P_{BS(n)}}{10}} \cdot 10^{-\frac{I_{BS(m),BS(n)}}{10}} \quad (1)$$

ここで, $P_{BS(n)}$ は $BS(n)$ から報知されたビーコン信号の送信電力である. $c(c_F(n), c_T(n))$ は $BS(n)$ が使用しているチャネルを表している. MBS の送信電力は 46dBm, SBS の送信電力は 30dBm とした. $I_{BS(m),BS(n)}$ は $BS(m)$ - $BS(n)$ 間の距離減衰 (dB) を表し, 次式で与えられる.

$$I_{BS(m),BS(n)} = \begin{cases} 15.3 + 37.6 \log_{10}(d_{BS(m),BS(n)}) & \text{if } BS(m) \text{ or } BS(n) \text{ is MBS} \\ 30.6 + 36.7 \log_{10}(d_{BS(m),BS(n)}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで $d_{BS(m),BS(n)}$ は $BS(m)$ - $BS(n)$ 間の距離 (m) を表す. $BS(m)$ がビーコン信号によって測定する第 $c(c_F, c_T)$ チャネルの瞬時 CCI 電力は次式で表される.

$$I_{BS(m)}(t; c(c_F, c_T)) = \sum_{\substack{n \in \text{BSG}(c(c_F, c_T)) \\ n \neq m}} I_{BS(m),BS(n)}(t; c(c_F(n), c_T(n))) \quad (3)$$

ここで $\text{BSG}(c(c_F, c_T))$ は第 $c(c_F, c_T)$ チャネルを使用する BS の集合である.

3.3. 平均 CCI 電力の計算

平均 CCI 電力の計算には様々な方法を用いることができる. 本計算機シミュレーションでは, 忘却係数 β を用いる一次フィルタを平均 CCI 電力の計算に用い, 瞬時 CCI 電力と前回更新時点のフィルタ出力から現時点の平均 CCI 電力を計算した. $BS(m)$ における第 t 更新時点での第 $c(c_F, c_T)$ チャネルの平均 CCI 電力 $\bar{I}_{BS(m)}(t; c(c_F, c_T))$ は次式で表される.

$$\bar{I}_{BS(m)}(t; c(c_F, c_T)) = (1 - \beta) \cdot I_{BS(m)}(t; c(c_F, c_T)) + \beta \cdot \bar{I}_{BS(m)}(t-1; c(c_F, c_T)) \quad (4)$$

β は棲み分けにどのくらいの時間をかけるかを制御するパラメータである. β の値を小さくし過ぎると, 瞬時 CCI 電力の大きさに基づいてチャネルを選択してしまうことになるので, 安定したチャネル再利用パターンの形成ができなくなり, チャネル棲み分けが行われなくなる. 棲み分けが行われるためには, β を 1 に近い値に設定する必要がある[5]. 勿論, β を 1 に近づけ過ぎると BS の設置状況の変化といった干渉環境のゆっくりとした変化に追従したチャネル棲み分けが行われなくなる. 本計算機シミュレーションでは $\beta=0.99$ と設定した[5].

$BS(m)$ は, 式(4)に基づいて算出した $\bar{I}_{BS(m)}(t; c(c_F, c_T))$ を用いてチャネル優先度テーブルを更新する. この操作を $C_{total}=C_T \times C_F$ 個の全てのチャネルについて行う. $BS(m)$ は, チャネル優先度テーブルを参照し, 平均 CCI 電力最小のチャネルを使用チャネル $c(t; c_F(m), c_T(m))$ として選択する.

$$c(c_F(m), c_T(m)) = \arg \min_{\substack{c_F \in \{1, C_F\} \\ c_T \in \{1, C_T\}}} \bar{I}_{BS(m)}(t; c(c_F, c_T)) \quad (5)$$

BS(m)は、次のチャンネル優先度テーブル更新時点(つまり第 $t+1$ 更新時点)まで、このチャンネルを使用し続ける。

3.4. チャンネル再利用パターンの評価指標

3.4.1. チャンネル再利用パターンの自己相関

本検討では時不変なネットワークモデルを仮定しているので、IACS-DCAによってチャンネル再利用パターンが収束すると考えられる。チャンネル再利用パターンがどの程度安定しているかを議論するために自己相関関数 $\Phi(\Delta)$ を導入する。

チャンネル再利用パターンの自己相関関数 $\Phi(\Delta)$ は、第 t 更新時点と第 $(t-\Delta)$ 更新時点のチャンネル配置を比較して同一のチャンネルが配置されている BS 数の割合であり、次式で定義される[5]。

$$\Phi(\Delta) \equiv E \left[\frac{1}{N_{MBS} + N_{SBS}} \sum_{m \in BSG} \sum_{c_F=1}^{C_F} \sum_{c_T=1}^{C_T} \left\{ q(m, t; c(c_F, c_T)) \cdot q(m, t-\Delta; c(c_F, c_T)) \right\} \right] \quad (6)$$

ここで $E[\cdot]$ はアンサンブル平均を表し、BSG は全 BS の集合を表す。 $q(m, t; c(c_F, c_T))$ は第 t 更新時点において BS(m)が第 $c(c_F, c_T)$ チャンネルを用いているならば 1、それ以外の場合は 0 を与える関数である。 $\Phi(\Delta)$ が 1 に近いほどチャンネル再利用パターンの安定度が高い(変動が少ない)ことを表す。

3.4.2. 使用チャンネルの公平性指標

特定のチャンネルが偏って使用されると CCIが増大し伝送特性が劣化するため、全チャンネルがネットワーク内で等しく使用されることが望ましい。使用チャンネルの偏りを評価するため、本稿では次式で定義される使用チャンネルの公平性指標 $F(t)$ を導入する[5]。

$$F(t) \equiv E \left[\frac{\left(\sum_{c_F=1}^{C_F} \sum_{c_T=1}^{C_T} \delta(t; c(c_F, c_T)) \right)^2}{C_{total} \cdot \sum_{c_F=1}^{C_F} \sum_{c_T=1}^{C_T} \{ \delta(t; c(c_F, c_T)) \}^2} \right] \quad (7)$$

ここで $\delta(t; c(c_F, c_T))$ は第 t 更新時点において第 $c(c_F, c_T)$ チャンネルを使用している BS 数である。 $F(t)$ は全チャンネルが BS 間で等しく使用されている場合に 1 をとり、特定のチャンネルのみが使用されている場合には $1/C_{total}$ をとる[11]。トラヒック分布が均一な場合、全チャンネルが基地局間で等しく使用されるのが適切だと考えられる。したがって、使用チャンネルの公平性指標が $F(t)=1$ となる場合に CCI が最小になると考えられ、公平性指標 $F(t)$ を評価することで形成されたチャンネル再利用パターンが CCI をどれくらい小さくできるかを評価でき

る。

3.5. シミュレーション結果

各基地局は 1 回の計算機シミュレーション試行では $t=2000$ 回まで IACS-DCA に基づいてチャンネル選択を行う。この試行を 200 回繰り返してチャンネル再利用パターンの自己相関 $\Phi(\Delta)$ と公平性指標 $F(t)$ を計算した。初期($t=0$)のチャンネルは全 BS で第 $c(1,1)$ チャンネルを配置した。

図 4 に、IACS-DCA により形成されたチャンネル再利用パターンの一例を示す。大セル中央の MBS および大セル内の各 SBS が IACS-DCA により $C_{total}=C_T \times C_F=16$ チャンネルの中から 1 つのチャンネルを選択する。各 BS の使用チャンネルの初期配置は図 4(a)に示すように全ての BS にチャンネル $c(1,1)$ を配置した。図 4(d)より、第 2000 時間フレーム目では隣り合う SBS は違うチャンネルを選択するようにチャンネルが棲み分けられていることが分かる。また、MBS が選択している第 $c(1,3)$ チャンネルは全 SBS で選択されておらず、他の 15 チャンネルはチャンネルは 15 台の SBS が等しく選択されており、チャンネルが均等に使用されていることが分かる。図 4(a)~(d)を比較すると、チャンネル再利用パターンは初期配置から変化してゆき、第 1000 時間フレームでは第 2000 時間フレームと同じチャンネル再利用パターンが形成できていることが分かる。

第 2000 更新時点において、SBS が MBS と同じチャンネルを選択する確率を測定したところ、第 2000 時間フレームにおいて、SBS が MBS と同じチャンネルを選択している確率は 0 だった。このことは IACS-DCA により、MBS から SBS への強い CCI を回避したチャンネル配置が自律的に形成されていることを示している。

図 5 に第 $t=2000$ 更新時点を基準にした場合のチャンネルの自己相関 $\Phi(\Delta)$ を示す。図 5 より、第 $t=2000$ 更新時点から 1000 回前の更新時点($\Delta=1000$)で、自己相関がほぼ 1 になっていることがわかる。このことは、ほぼ 1000 時間フレームの間はチャンネル再利用パターンの変動がほとんどなく、安定したチャンネル再利用パターンを形成できていることを示している。

図 6 に公平性指標 $F(t)$ の時間変化を示す。図 6 より、時間の経過とともに $F(t)$ が向上しており、およそ第 600 更新時点で $F(t)$ が 1 に近い値に収束していることが分かる。このことは、棲み分けを開始してから 600 回チャンネル優先度テーブルの更新を行えば、チャンネル再利用パターンがほぼ収束することを示している。

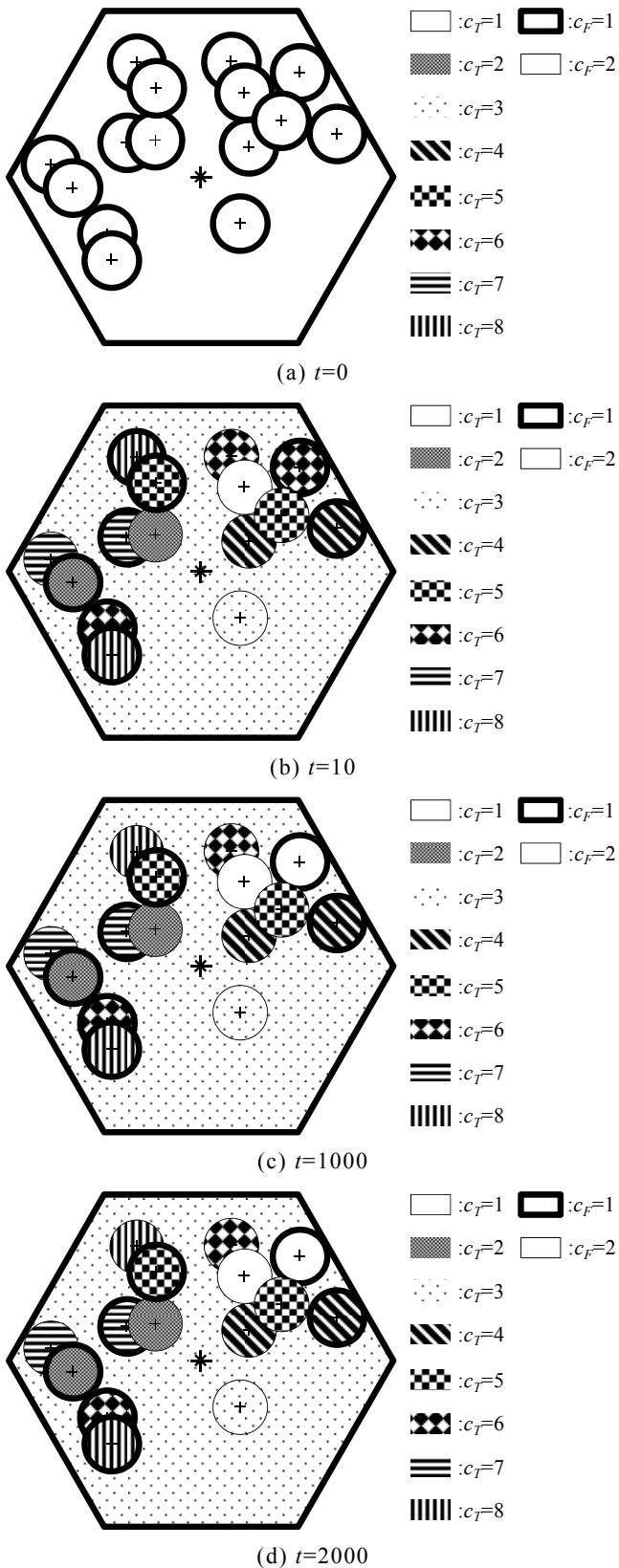


図 4 チャンネル再利用パターンの一例

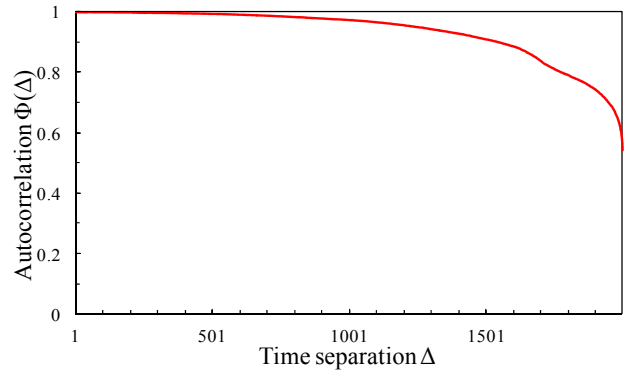


図 5 チャンネル再利用パターンの自己相関

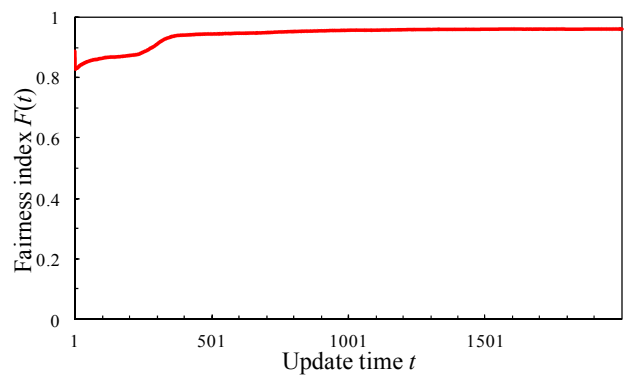


図 6 使用チャンネルの公平性指標

4. むすび

本稿では時間及び周波数分割チャンネルを用いる HetNet への IACS-DCA の適用に関する検討を行った。IACS-DCA により形成されたチャンネル再利用パターンについて、自己相関と公平性指標により評価を行い、時間及び周波数分割チャンネルを用いる HetNet においても、IACS-DCA により安定したチャンネル再利用パターンを形成できること、チャンネルを偏りなく使用できることを示した。

謝辞

本論文で発表した研究成果は、独立行政法人情報通信機構 (NICT) の委託研究「無数の端末を接続するための高エネルギー効率および超高密度無線ネットワークに向けて」により得られたものである。

文 献

- [1] I. Katzela and M. Naghshineh, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: a comprehensive survey," *IEEE Personal Commun.*, Vol. 3, No. 3, pp. 10-31, June 1996.
- [2] H. Skalli, S. Ghosh, S. K. Das, L. Lenzini and M. Conti, "Channel assignment strategies for multiradio wireless mesh networks: issues and solutions," *IEEE Commun. Magazine*, Vol. 45, No. 11, pp. 86-95, Nov. 2007.
- [3] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, Aug. 2005.
- [4] R. Matsukawa, T. Obara, and F. Adachi, "A dynamic channel assignment scheme for distributed antenna networks," *Proc. IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC2012-Spring)*, May 2012.
- [5] Y. Matsumura, S. Kumagai, T. Obara, T. Yamamoto, and F. Adachi, "Channel segregation based dynamic channel assignment for WLAN," *Proc. IEEE The 13th International Conference on Communication Systems (ICCS2012)*, Nov. 2012.
- [6] R. Sugai, Martin T.H. Sirait, Y. Matsumura, K. Temma, and F. Adachi, "Impact of shadowing correlation on interference-aware channel segregation based DCA," *2014 IEEE 11th Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2014)*, Aug. 2014.
- [7] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 10-21, Jun. 2011.
- [8] H. Zhang, X. Chu, W. Ma, W. Zheng, and X. Wen, "Resource allocation with interference mitigation in ofdma femtocells for co-channel deployment," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 1, 2012.
- [9] 松村祐輝, 天間克宏, 安達文幸, "干渉電力測定に基づいてチャンネルを棲み分け動的チャンネル配置のヘテロジニアスネットワークへの適用効果に関する一検討," *信学会ソサイエティ大会*, B-5-42, p.405, 2013年9月.
- [10] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad and M. Latva-aho, "Opportunistic sleep mode strategies in wireless small cell networks," *Proc. IEEE International Conference on Communications 2014 (ICC2014)*, pp.2707-2712, June 2014.
- [11] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system," *DEC Technical Report 301*, Sep. 1984.