

OFDMA セルラーネットワークにおける 適応サブキャリア配置に関する一検討

工藤 栄亮 安達 文幸

東北大学大学院 工学研究科 電気・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: kudoh@ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし OFDMA セルラーネットワークでは、全てのセルで全てのサブキャリアを用いると、隣接セルからの干渉の影響によりセル端のユーザの伝送特性が劣化してしまう。そこで、全サブキャリアを複数のサブキャリアグループに分割し、各セルにあらかじめサブキャリアグループを適応的に配置する。そして、各基地局では、あらかじめ配置されたサブキャリアグループのサブキャリアを各ユーザにスケジューリングを用いて割り当てる。このようにすれば、隣接セルからの大きな干渉を避けることができるので、セル端のユーザの伝送特性の劣化を軽減できる可能性がある。本論文では、上記の特徴を有する OFDMA セルラーネットワークについて検討し、チャンネル容量を計算機シミュレーションにより求めている。

キーワード OFDMA, サブキャリア配置, チャンネル割当, スケジューリング

Study on Adaptive Sub-carrier Arrangement of OFDMA Cellular Network

Eisuke KUDOH and Fumiyuki ADACHI

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

E-mail: kudoh@ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In OFDMA cellular network, if all the sub-carriers are used in all cells, the transmission performance of the user around the cell edge may be degraded due to the interference from the adjacent cells. If all the sub-carriers are divided into several sub-carrier groups, the sub-carrier group is allocated adaptively in each cell and the allocated sub-carriers are arranged to each user using a scheduling algorithm, the degradation of the transmission performance of the user around the cell edge may be improved since it can avoid the large interference from the adjacent cells. In this paper, OFDMA cellular network that has the above-mentioned feature is introduced, and the channel capacity is evaluated by the computer simulation.

Keyword OFDMA, Sub-carrier arrangement, Channel assignment, Scheduling,

1. まえがき

第3世代の移動通信システム IMT-2000 は十数 Mbit/s の伝送能力を有している。しかしながら、インターネットの普及が進み、リッチなコンテンツが広く流通するようになれば、やがて IMT-2000 の伝送速度でさえ不十分となり、100Mbit/s～1Gbit/s 程度のピーク伝送速度が要求されるとみられている。第4世代移動通信システムでは、このような超高速無線サービスの提供が求められている[1]。ところが、伝送速度を高速化すると厳しい周波数選択性フェージングチャンネルとなり、伝送特性が著しく劣化する。この劣化を抑えるアクセス方式として、周波数選択性が無視できるほど狭帯域な直交サブキャリアにより並列伝送を行なう直交周波数分割多元接続 (OFDMA) が注目されている[2]。

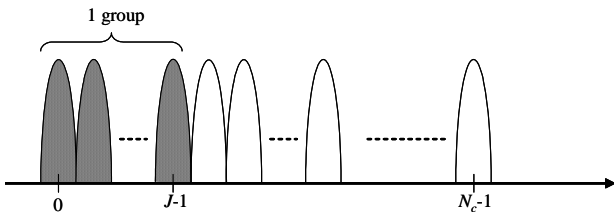
OFDMA では利用可能な周波数帯域を多数の直交サブキャリアで分割して利用する。各基地局では、各ユーザに対して適応的にサブキャリアを割り当てることにより、アウトエッジ確率や伝送伝送特性を向上することが可能である[3]。MaxCIR[4]では最も伝搬路状態の良いユーザに対してサブキャリアを割り当てることにより、システムスループットを増大できるものの、セル端に存在しているユーザにはなかなか割り当てられないため、ユーザ間の不公平性が問題となる。公平性を確保しつつ、比較的大きなスループット特性が得られる方法として Proportional-Fairness[5],[6]が知られている。ところで、全てのセルで全てのサブキャリアを用いると、セル端のユーザは隣接セルからの干渉を受け、スループット特性が劣化してしまう。そこで、本論文では全サブキャリアを複数の

サブキャリアグループに分割し、適応アルゴリズムを用いてあらかじめ各基地局(BS)に配置しておく。各BSはあらかじめ配置されたサブキャリアグループのサブキャリアを各ユーザへスケジューリングにより割り当てる。つまり、各BSへの適応的(あるいは部分的動的)サブキャリアグループ配置と各ユーザへのスケジューリングによる動的サブキャリア割り当ての2段階のハイブリッドサブキャリア割り当てを行なう。このようなハイブリッドサブキャリア割り当てを行なえば、隣接セルから受ける干渉によるセル端ユーザのスループット特性の劣化を軽減できる可能性がある。また、各BSでスケジューリングを行なうサブキャリア数を制限できるので、各BSの制御の負担を軽減できる可能性もある。

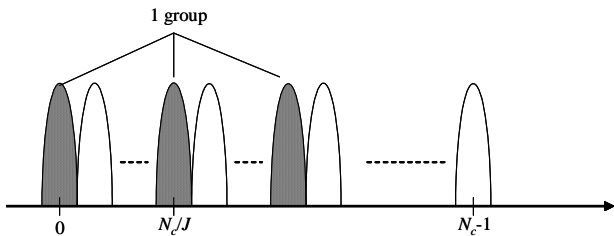
本論文の構成は以下のようになっている。第2章ではサブキャリアグループの構成法を示す。第3章ではサブキャリアグループ配置法について述べる。第4章ではスケジューリング法とチャンネル容量について述べる。第5章は数値計算結果を示す。第6章はむすびである。

2. サブキャリアグループ構成法

複数個のサブキャリアで一つのグループを構成する。本論文では図1に示すようなブロック配置、等間隔配置を考える。ブロック配置では連続する複数のサブキャリアで一つのグループを構成する。等間隔配置では、等間隔サブキャリアでグループを構成する。



(a) ブロック配置



(b) 等間隔配置

図1チャンネル配置法.

3. サブキャリアグループ割当法

下りリンクについて考える。各ユーザへ送信するパケットがBSに到着する以前にあらかじめ各BSにサブキャリアグループを配置するプライアサ

イン型の配置を行なう。固定的なサブキャリアグループ配置法を適用することも考えられるが、トラヒックの変化に応じて適応的に更新した方が、スループット特性等の向上が期待でき、BSを増設する際にも容易に拡張できる。そこで、適応的なサブキャリアグループ配置法を考える。セルラーネットワーク用に提案されている動的チャンネル割当法(DCA)では、一般に呼が生起してからチャンネル割り当てを行なうため、通信可能か否かを判定してから割り当てるのが可能であるが、本論文で考えているハイブリッド型サブキャリア配置法では、各BSへサブキャリアグループを割り当てた後に、各BSが割り当てられたサブキャリアグループの中のサブキャリアを個々のユーザに対して、スケジューリングにより割り当てるので、サブキャリアグループを各BSに配置する際には、単純に各ユーザが通信可能か否かを判断することはできない。したがって、どのようなポリシーで、何をメトリックに用いてサブキャリアグループ割り当てを行なうかが課題となる。まず、ポリシーについて考える。ユーザ間の公平性は、各BSで行なうスケジューリングで確保するとして、システムスループット、あるいはチャンネル容量を最大化することが目標として考えられる。そこで、チャンネル容量が最大となるサブキャリアグループを割り当てることをポリシーとして考える。利用可能な周波数帯域には N_c 個のサブキャリアがあると、 J 個のサブキャリアで一つのグループを構成するものと仮定する。第 c 番目のサブキャリアグループについて、構成するサブキャリア番号を要素とする列ベクトル $\mathbf{c}_c = [c_0, c_1, \dots, c_{J-1}]^T$ で表すものとする。ブロック型における第 c 番目のサブキャリアグループベクトル \mathbf{c}_c は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{c}_c = [cJ, cJ+1, \dots, cJ+J-1]^T \quad (1)$$

同様に、等間隔型では

$$\mathbf{c}_c = [c, N_c/J+c, \dots, (J-1)N_c/J+c]^T \quad (2)$$

となる。いま、第 c 番目のサブキャリアグループの第 k 番目のサブキャリアである、第 c_k サブキャリアで通信を行なっているユーザの受信SINRを $\gamma(c_k)$ とすると、第 c 番目のサブキャリアグループのチャンネル容量 $C(c)$ は以下のように表すことができる。

$$C(c) = \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{J-1} \log_2(1 + \gamma(c_k)) \quad (3)$$

干渉リミテッドチャンネルを仮定すると $\gamma(c_k)$ は次式で表される。

$$\gamma(c_k) \cong S(c_k) / I(c_k) \quad (4)$$

ここで、 $S(c_k)$ および $I(c_k)$ は通信を行なっているユーザにおける第 c_k サブキャリアの受信信号電力および干渉電力である。ここで、 $\gamma(c_k) \gg 1$ と仮定すると、式(3)は以下のように書き換えられる。

$$C(c) \cong \frac{1}{N_c} \left\{ \log_2 \prod_{k=0}^{J-1} S(c_k) - \log_2 \prod_{k=0}^{J-1} I(c_k) \right\} \quad (5)$$

したがって、干渉電力の幾何平均が小さいサブキャリアグループほど、チャンネル容量が大きくなることがわかる。ところで、サブキャリアグループを配置する際にはユーザを特定できないので、干渉電力をいかに推定するかについて考える。各BSはセルの中心に位置していると考えられるので、BSが受信している干渉電力のうち距離に依存するパスロス成分については、セル内に存在しているユーザの平均的な値と考えることができる。そこで、下りリンクにおけるサブキャリアグループ割り当てではあるものの、各BSにおける受信干渉電力をメトリックとして用いることとする。距離に依存するパスロス、対数正規分布に従うシャドウイングロス、レイリー分布に従うフェージング利得の積で表される伝搬モデルを仮定する。第 i BSにおける第 c_k サブキャリアの受信干渉電力 $I'(c_k)$ は以下の式で与えられる。

$$I'(c_k) = \sum_{j, j \neq i} P_{t,j} r_{j-i}^{-\alpha} 10^{-\eta_{j-i}/10} |H_{j-i}(c_k)|^2 \quad (6)$$

ここで、 $P_{t,m}$ は第 j BSの送信電力、 α は伝搬損失指数、 r_{i-j} 、 η_{i-j} 、 $H_{i-j}(k)$ はそれぞれ第 i BSと第 j BS間の距離、シャドウイング損失及び第 c_k サブキャリアにおけるチャンネル利得である。各BSにおいて各サブキャリアの干渉電力の幾何平均が最小となるサブキャリアグループを割り当てる。このとき、割り当てるサブキャリアグループ c_{assign} は以下のように表せる。

$$c_{assign} = \arg \min_{c \in \{0, \dots, N_c/J-1\}} \left\{ \prod_{k=0}^{J-1} I'(c_k) \right\} \quad (7)$$

なお、本論文ではBSにおける干渉電力をメトリックとして用いる場合について説明したが、シャ

ドウイングロス成分、フェージングロス成分についてはBSでの干渉電力が平均的な値になるとは限らず、また時間変動も生じないので、平均的な値から偏った値を固定的に採用してしまう危険性がある。そこで、パケット送信時とは異なった値となる可能性はあるものの、各ユーザが測定した信号電力対雑音電力+干渉電力比をメトリックとして用い、定期的にサブキャリアグループを更新することも考えうる。

4. スケジューリングとチャンネル容量

各BSは割り当てられたサブキャリアグループのサブキャリアをスケジューリングにより、各ユーザに割り当てる。ユーザ間の公平性を確保しつつ、比較的大きなスループットが得られるProportional fairness (PF)アルゴリズムによるスケジューリングを行なうことを考える。一般性を失うことなく、第0番のBSと通信を行なっている第 i ユーザについて考える。第 i ユーザで受信された信号の第 c_k サブキャリアにおける受信SINR $\gamma(i, c_k)$ は次式で表される。

$$\gamma(i, c_k) = \frac{P_{t,0} r_{0-i}^{-\alpha} 10^{-\eta_{0-i}/10} |H_{0-i}(c_k)|^2}{N + \sum_{j, j \neq 0} P_{t,j} r_{j-i}^{-\alpha} 10^{-\eta_{j-i}/10} |H_{j-i}(c_k)|^2} \quad (8)$$

ここで、 $P_{t,j}$ は第 j BSの送信電力、 α は伝搬損失指数、 r_{j-i} 、 η_{j-i} 、 $H_{j-i}(c_k)$ はそれぞれ第 j BSと第 i ユーザ間の距離、シャドウイング損失及び第 c_k サブキャリアにおけるチャンネル利得、 N は雑音電力である。分母第二項は第 c_k サブキャリアで送信している第 j BSからの干渉電力を表す。PFでは瞬時SINRと平均SINRの比が最大となるユーザに対して当該サブキャリアを割り当てる。

$$i_{assign}(c_k) = \arg \max_i \left\{ \frac{\gamma(i, c_k)}{\overline{\gamma(i, c_k)}} \right\} \quad (9)$$

ここで、 $\overline{\gamma(i, c_k)}$ は第 i ユーザの第 c_k サブキャリアにおける短区間平均SINRである。第 i ユーザのチャンネル容量は以下の式で表される。

$$C(i) = \frac{1}{N_c} \sum_{\substack{k=0 \\ c=c_{assign} \\ i=i_{assign}}}^{J-1} \log_2(1 + \gamma(i, c_k)) \quad (10)$$

注目しているセルにおけるチャンネル容量は以下の式で表される。

$$C = \frac{1}{N_c} \sum_{\substack{k=0 \\ c=c_{assign}}}^{J-1} \log_2(1 + \gamma(i_{assign}, c_k)) \quad (11)$$

5. 数値計算結果

簡単のため、正六角形のセルを仮定し、第2隣接までのセルからの干渉を考慮する。すなわち、全部で19個のセルを考える。サブキャリアグループ配置を行うBSの順番はランダムとする。表1にシミュレーション諸元を示す。

表1 シミュレーション諸元

セル構成		19セル正則配置
アクセス方式		OFDMA
サブキャリア数		$N_c=256$
サブキャリアグループ数		$N_c/J=1\sim 4$
ユーザ数		$U=1\sim 10$
スケジューリング		Proportional Fairness
伝搬路	パスロス指数	$\alpha=3.5$
	シャドウイング標準偏差	$\sigma=7$
	フェージング	等電力 $L=16$ パス

図2に1セルあたりの平均チャンネル容量を示す。横軸はセルあたりのユーザ数を示す。等間隔配置もブロック配置もほぼ同程度の平均チャンネル容量が得られている。またサブキャリアグループ数が少ないほど、平均チャンネル容量が大きいことがわかる。これは、サブキャリアグループ数が少ないほど、1セルあたりに割り当てられるサブキャリア数が多いためである。

図3にサブキャリア配置法として等間隔配置を適用したときのユーザのチャンネル容量の累積分布を示す。(a), (b), (c)はそれぞれ、ユーザ数 $U=1, 5, 10$ の場合を示す。サブキャリアグループ数が多い方がチャンネル容量が小さいユーザの割合が少ない傾向が見られる。例えば、 $U=1$ の場合、チャンネル容量が0.8以下では、サブキャリアグループ数が多いほどチャンネル容量が小さいユーザの割合が小さい。これは以下のような理由が考えられる。セル端にいるユーザはSINRが小さくなるのでチャンネル容量が小さくなる。サブキャリアグループ数が大きくなると、隣接セルからの干渉を避けることができ、セル端にいるユーザの受ける干渉電力を小さくでき、セル端のユーザのチャンネル容量を大きくできる可能性がある。したがってサブキャリアグループ数が多いほどチャンネル容量が小さいユーザの割合を小さくできる。ただし、ユーザ数が多くなると、サブキャリアグループ数

による、チャンネル容量が小さいユーザの割合の差は小さくなる。これは、ユーザ数が大きくなると、サブキャリアグループ数が多いほど1セルあたりに利用可能なサブキャリア数が少なくなるので、サブキャリアを割り当てられないユーザの割合が大きくなるため、チャンネル容量が小さいユーザの割合が増えるからである。

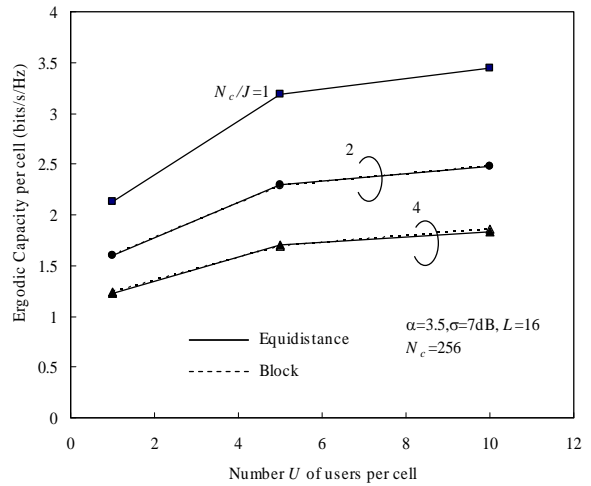
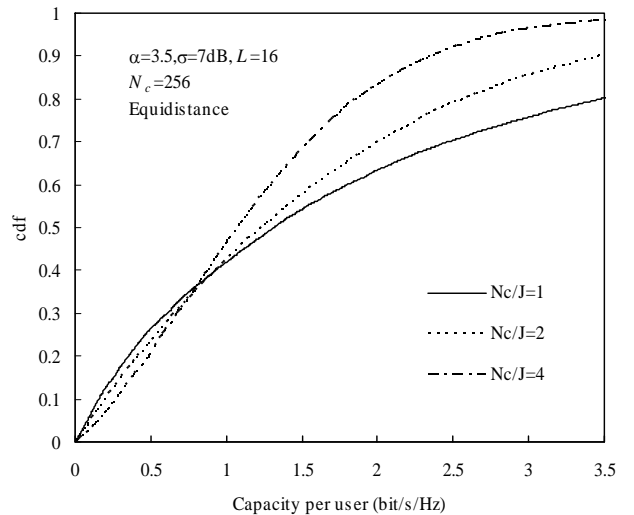


図2 平均チャンネル容量.

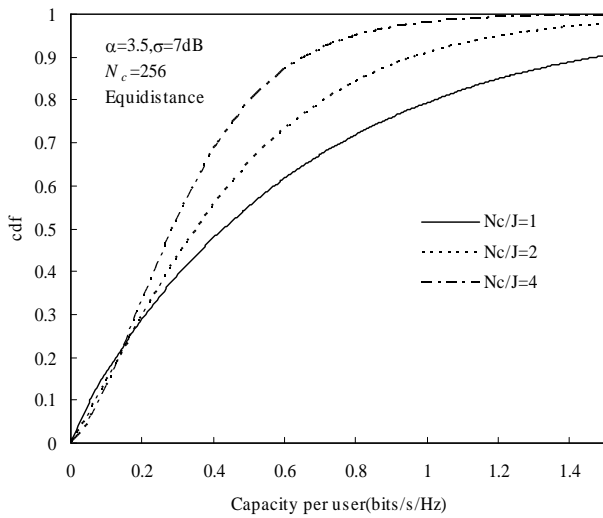


(a) $U=1$

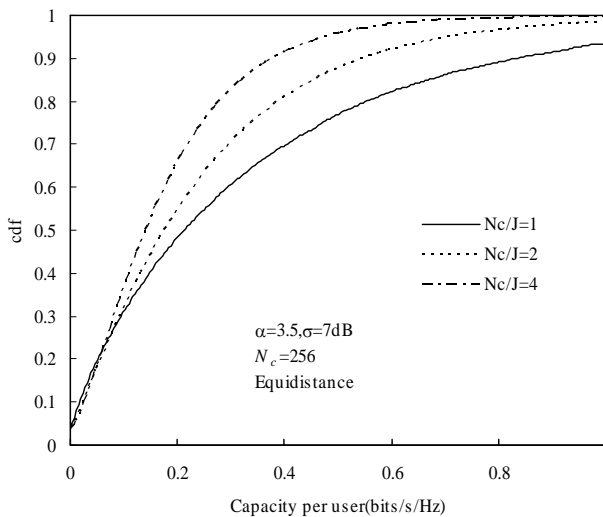
を明らかにした。

文 献

- [1] F. Adachi, "Wireless Past and Future-Evolving Mobile Communication Systems", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, no.1, pp.55-60, Jan. 2001.
- [2] S. Hara and R. Prasad, *Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications*, Artech House, June 2003.
- [3] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, pp.1747-1757, Oct. 1999.
- [4] T. E. Kolding, K. I. Pedersen, J. Wigard, F. Frederiksen, P. E. Mogensen, "High speed downlink packet access: WCDMA evolution", IEEE Vehicular Technology Society News, vol.50, no.1, pp.4-10, Feb. 2003.
- [5] J. M. Holtzman, "Asymptotic analysis of proportional fair algorithm", Proc. IEEE PIMRC, vol.2, pp.F-33 - F-37, 30 Sept.-3 Oct. 2001.
- [6] Y. Ofuji, A. Morimoto, S. Abeta, M. Sawahashi, "Comparison of packet scheduling algorithms focusing on user throughput in high speed downlink packet access", IEEE Proc. PIMRC' 2002, vol.3, pp.1462-1466, 15-18 Sept. 2002.



(b) $U=5$



(c) $U=10$

図3 チャンネル容量の累積分布

6. むすび

本論文では、OFDMA セルラネットワークにおいて利用可能な全サブキャリアを複数のサブキャリアからなる複数のサブキャリアグループに分割し、各 BS にサブキャリアグループをプリアサインした後に各ユーザに対してスケジューリングによりサブキャリア割り当てを行なうハイブリッド型サブキャリア配置法について検討した。その結果、サブキャリアグループ数が1、すなわち利用可能な全サブキャリアを各 BS が用いた場合が最も大きな平均チャンネル容量が得られることを明らかにした。また、サブキャリアグループ数を大きくした方が、チャンネル容量が小さいユーザの割合を減らすことができるものの、ユーザ数が大きくなると、この効果は小さくなること