

マルチパスフェージング環境下におけるマルチホップバーチャルセルラ自律分散型チャンネル割当て法の特性

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 05

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

あらまし 筆者らは超高速無線ネットワークを構築するためにバーチャルセルラシステムを提案してきた。バーチャルセルラは分散配置された多数の無線ポートから構成され、移動端末から送信された信号はマルチホップ通信により無線ポート間を中継され中央無線ポートへと転送される。筆者らは、マルチホップバーチャルセルラシステムにチャンネル棲み分け法を適用した自律分散型チャンネル割当て法の失敗率特性を明らかにしてきた。ところで、DS-CDMA では Rake 受信により遅延波を合成することができる。遅延波数が多くなるとダイバーシチ効果も大きくなるが、直交性の崩れにより発生するパス間干渉による劣化も大きくなる。本論文では DS-CDMA マルチホップバーチャルセルラシステムを対象に、直交符号や Rake 受信の効果を考慮し、マルチパスフェージング環境下における自律分散型チャンネル割当て法の失敗率特性を明らかにしている。

キーワード バーチャルセルラ, ダイナミックチャンネル割当て, チャンネル棲み分け, マルチホップ

Performance of distributed dynamic channel assignment for a multi-hop virtual cellular system in multipath fading channel

Eisuke KUDOH and Fumiyuki ADACHI

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

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

Abstract There have been strong demands for higher speed data transmissions in mobile communications. To reduce the peak transmit power while increasing the data transmission rates, authors proposed a wireless multi-hop virtual cellular system. In the multi-hop virtual cellular system, the transmitted signal from a mobile terminal is received by wireless ports distributed in a virtual cell and relayed via wireless ports using a wireless multi-hop communication technique to a central port connected to the network. We proposed a channel allocation algorithm based on the dynamic channel allocation (DCA) using the channel segregation algorithm. In DS-CDMA, Rake receiver can combine the delayed versions of a signal. As the number of propagation paths increases, the Rake combining effect also increases, but, the inter-path-interference increases, thereby degrading the transmission performance. In this paper, we evaluate the DCA failure rate in a frequency selective fading channel for DS-CDMA multihop virtual cellular system.

Keyword Virtual cellular, Dynamic channel allocation, Channel segregation, Multi-hop

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ようになるであろう。2010 年ころに登場すると期待されている第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。しかしながら、このような超高速無線サービスを実現するにはピーク送信電力の増大という課題を克服しなければならない。これを解決する効果的な方法のひとつはセル半径を小さくすることであり、極小セルラシステムをいかに実現するかが重要な技術課題となる[1],[2]。筆者らは、極小セルラシステムを構築するためのバーチャルセルラシステムを提案している[3]。

バーチャルセルラシステムの構成を図1に示す。バーチャルセルラシステムは、分散配置された多数の無線ポートとネットワークへのゲートウェイとなる中央無線ポートからなる。上りリンクでは、多数の無線ポートで受信された移動端末の信号を中央無線ポートへ転送しなければならない。また下りリンクでは、各無線ポートは移動端末へ転送すべき信号を中央無線ポートから受信しなければならない。もしも全ての無線ポートが中央無線ポートと直接通信すれば、パスロス、シャドウィングロス、マルチパスフェージングの影響により非常に大きな送信電力を必要とする通信が生じる。このような送信電力の増大を避けるためにマルチホップ無線通信の適用が考えられる。筆者らは、マルチホップ無線通信の制御を行うために、図2に示すようにネットワーク層とデータリンク層の間にバーチャルセルラ制御層を設けることを提案している[4]。さらに、筆者らは総送信電力を最小とする経路構築法を示し、伝送遅延を制限しつつ送信電力を著しく低減できることを示してきた[4]、[5]。

マルチホップ通信ネットワークを実現するためには、効率的なチャネル割当法[6]、[7]が必要である。筆者らは、周波数チャネルの割り当て法にチャネル棲み分けアルゴリズム[7]を適用することを提案し、周波数非選択性フェージング環境下におけるチャネル割当て(DCA)失敗率特性を明らかにしてきた[8]。

ところで、マルチホップ通信では、中継する無線ポートは上下リンクとも送受信しなければならない。複数の無線ポートに対して信号を送信しなければならない。DS-CDMAでは同一周波数帯を複数のリンクで共用することができ、直交符号を適用することにより同一無線ポートから送信されている信号間の干渉を低減できる。そこで、アクセス方式としてDS-CDMAを仮定する。ところで、伝送速度が高速化されると、遅延波の影響により周波数非選択性フェージングが発生する。DS-CDMAでは周波数選択性フェージングを補償するRake受信を用いることができる。遅延波数が多いほどRake受信効果も大きくなるが、直交性の崩れにより発生するパス間干渉による劣化も大きくなる。本論文ではDS-CDMAマルチホップバーチャルセルラシステムを対象に、直交符号やRake受信の影響を考慮し、周波数選択性フェージング下におけるDCA失敗率特性を計算機シミュレーションにより明らかにする。

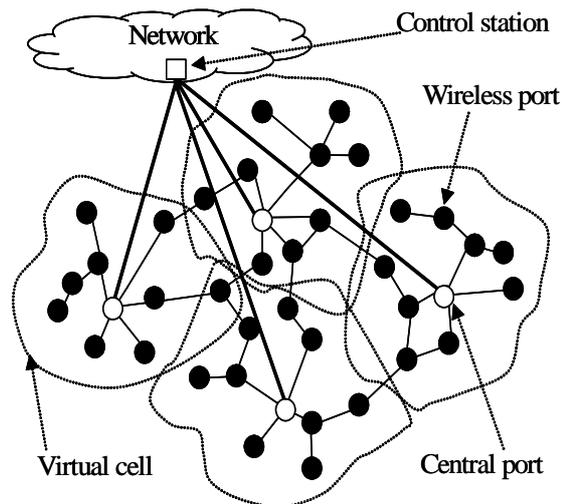


図1 バーチャルセルラシステム

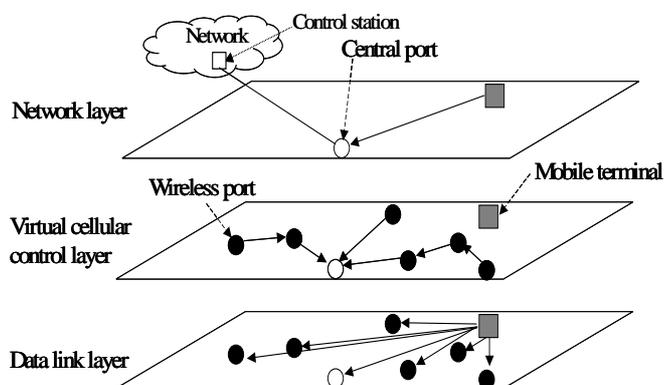


図2 バーチャルセルラシステムのレイヤ構成

2. チャネル棲み分け法に基づくマルチホップ通信用チャネル割当

無線ポート間マルチホップ通信の無線アクセス方式としてDS-CDMAを採用する。複数の周波数チャネルを用意する。DS-CDMAを用いているので、同一の周波数チャネルを複数無線ポートで再利用することができる。経路上の無線ポートの総送信電力を最小にするようにマルチホップ通信経路を決定[3]した後、各経路上の周波数チャネル割当を行う。送信無線ポートが主導して、チャネル棲み分け法[7]に基づく周波数チャネル割当を行う[8]。各送信無線ポートは各周波数チャネルの優先度関数を記載したチャネルテーブルを具備している。優先度関数は(当該周波数チャネルを割り当てた回数)/(当該周波数チャネルを割り当てることが可能かどうか受信無線ポートへ確認した回数)で表され、検索が行われる度に更新される。各送信無線ポートでは、まず下りリンクの周波数チャネル割当を行い、次に上りリンクの周波数チャネル割当を行う。下りリンクでは同一

の情報を複数の無線ポートへ転送するので、なるべく同一の周波数チャンネルで送信の方が効率的である。また、DS-CDMA では同一の周波数チャンネルであっても異なる拡散符号を用いて複数のデータを送信できるので、下りリンクで送信している周波数チャンネルを上りリンクでも送信に利用の方が効率的である。これらの点を考慮し、以下に示す手順により、周波数チャンネル割当てを行う。

step1: まず、下りリンクの周波数チャンネル割当てを行う。注目する無線ポート#A (図3参照)において、受信に利用されておらず、かつまだ割当て可能か確認していない周波数チャンネルのうち優先度関数が最も大きい周波数チャンネルを選択する。制御チャンネルを用いて、選択されたチャンネル番号を受信無線ポート#C、#D に通知する。

step2: 受信無線ポート#C と#D では通知された周波数チャンネルが所要の信号電力対(雑音+干渉)電力比(SINR)を満たすかどうか確認する。無線ポート#C、#D とともに所要値を満たしていればその周波数チャンネルを割当て、そうでなければ *step1* へ戻る。

step3: 次に上りリンクの周波数チャンネル割当てを行う。注目している無線ポート#A において下りリンクで使用した周波数チャンネルと同じ周波数チャンネルを上りリンクで利用することを考える。制御チャンネルを用いて、このチャンネル番号を上りリンクの受信無線ポート#B へ通知する。

step4: 上りリンクの受信無線ポート#B では通知された周波数チャンネルの SINR を測定する。もし SINR が所要値を満たしていればその周波数チャンネルを割当て、*step7* へ移行する。所要値を満たしていなければ *step5* へ移行する

step5: 注目している無線ポート#A では、受信に利用しておらず、かつ受信無線ポート#B において割当て可能かまだ確認していない周波数チャンネルのうち、優先度関数が最も大きい周波数チャンネルを選択する。制御チャンネルを用いて、選択されたチャンネル番号を受信無線ポート#B に通知する。

step6: 受信無線ポート#B では通知された周波数チャンネルが所要 SINR を満たすかどうか確認する。もし所要値を満たしていればその周波数チャンネルを割当て、そうでなければ *step5* へ戻る。

step7: 以上で注目する無線ポート#A の上下リンクの周波数チャンネル割当てを完了する。

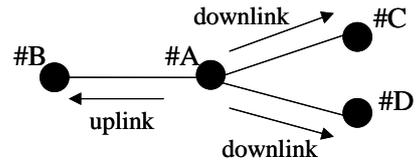


図3 マルチホップ通信の例

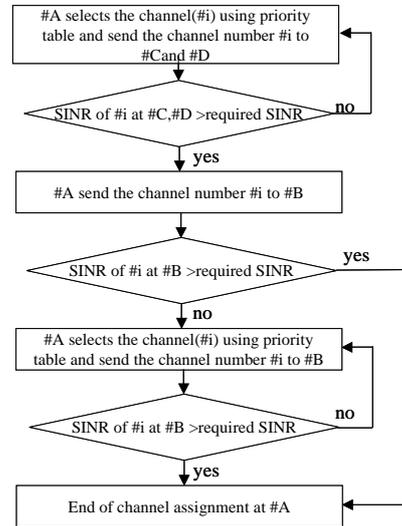


図4 無線ポート#A におけるチャンネル割当てのフローチャート

上記の手順は各無線ポートが順次行う。さらに、トラフィックや伝搬環境の変動に適応させるため、定期的に周波数チャンネルの再割り当てを行なう。

DS-CDMA では周波数選択性フェージング下において Rake 受信により伝送特性が改善される。各周波数チャンネルの伝搬路は L 個のパスからなる周波数選択性チャンネルを仮定する。無線ポート# i における、無線ポート# j からの受信電力 $P_{ri}(j)$ は次式のように表すことができる。

$$P_{ri}(j) = P_t(j) \cdot r_{j-i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j-i}/10} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{j-i}(l)|^2 \quad (1)$$

ここで、 $P_t(j)$ は無線ポート# j の送信電力であり、 r_{j-i} 、 α 、 η_{j-i} および $\xi_{j-i}(l)$ はそれぞれ無線ポート# i と無線ポート# j との間の距離、パスロス指数、シャドウイングロス(dB)およびフェージング利得である。無線ポートは通信中移動しないと仮定し、フェージング利得 $\xi_{j-i}(l)$ は通信中時間変動しないが、試行ごとに平均がゼロで分散が $E[|\xi_{i-j}(l)|^2] = \frac{1}{L}$ ($E[\cdot]$ は集合平均操作) の複素ガウス分布に基づいて決定する。

信号電力対雑音電力比 (SNR) を一定とする理想的な送信電力制御により $P_t(j)$ を決定するもの

とする．

$$P_t(j) = \frac{P_{\text{target}}}{r_{j-i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j-i}/10} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{j-i}(l)|^2} \quad (2)$$

直交符号を適用し，同一無線ポートから同時に複数の無線ポートへ送信される複数の信号間では同一パスからの干渉は生じないものとする．干渉が支配的な環境では，無線ポート*#i*における無線ポート*#j*から送信された信号の受信 SINR γ は次式で表される．

$$\gamma = \frac{\sum_{l=0}^{L-1} P_t(j) \cdot r_{j-i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j-i}/10} \cdot |\xi_{j-i}(l)|^2}{\left(P_t(j) \cdot r_{j-i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j-i}/10} \cdot \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^{L-1} |\xi_{j-i}(l')|^2 \right. \\ \left. + \sum_{k \neq j} P_t(k) \cdot r_{k-i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{k-i}/10} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{k-i}(l')|^2 \right)} \quad (3)$$

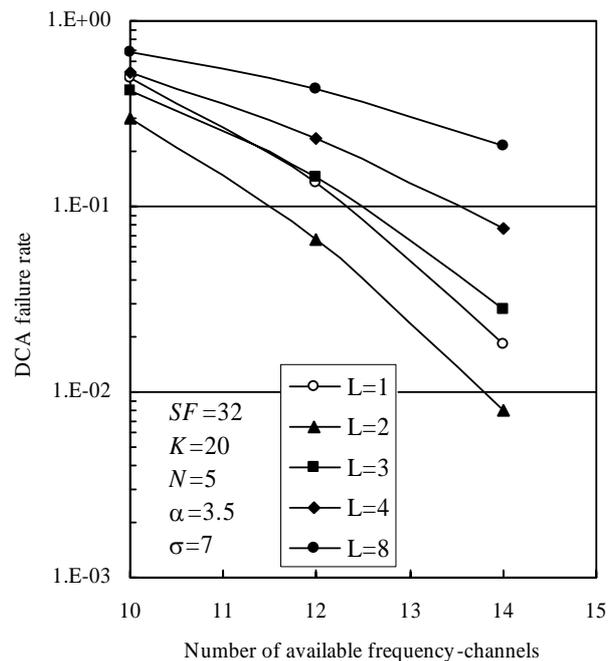
3. 計算機シミュレーション

簡単のため，正六角形のバーチャルセルを仮定し，第2隣接のバーチャルセルからの干渉を考慮する．すなわち，全部で19個のバーチャルセルを考える．中央無線ポートを含め20局の無線ポートを各バーチャルセル内にランダムに配置する．各無線ポートの送受信アンテナは無指向性であるものと仮定する．チャンネル割当てを行う無線ポートの順番はランダムとする．DS-CDMAにおけるデータ変調をQPSK，拡散変調をBPSKとする．誤り訂正を考慮しないときの所要ビット誤り率(BER)を $BER=10^{-3}$ とし，拡散率を SF とすると，チャンネル割り当て時の所要 SINR は $9.8-10\log SF$ (dB)となる．

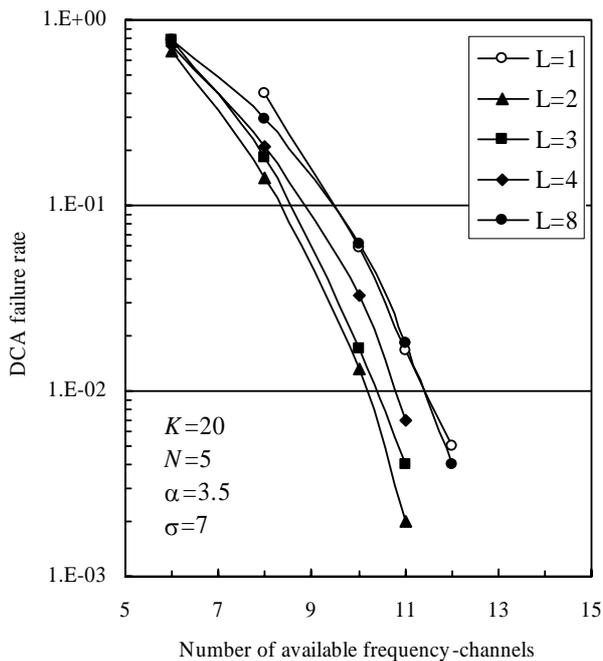
受信 SINR γ が所要 SINR γ_{req} を満たした場合には当該周波数チャンネルが割り当てられ，そうでない場合は再検索する．全ての周波数チャンネルを検索してもチャンネル割当てが出来なかったとき，チャンネル割当てが失敗する．本論文では，注目するバーチャルセル内の全ての無線ポートに対するチャンネル割当てが成功した場合を「DCA成功」とありとし，それ以外を「DCA失敗」と定義する．

図5にパス数 L をパラメータとした周波数チャンネル数とDCA失敗率の関係を示す．(a),(b),(c)はそれぞれ， $SF=32, 64, 128$ の場合を示す．パスロス指数 $\alpha=3.5$ ，シャドウイングの標準偏差 $\sigma=7$ (dB)とし，中央無線ポートも含めた1バーチャルセル当りの無線ポート数 $K=20$ ，許容最大ホップ数 $N=5$ とした． $SF=32, 64, 128$ のとき，それぞれ $L=2, 2, 3$

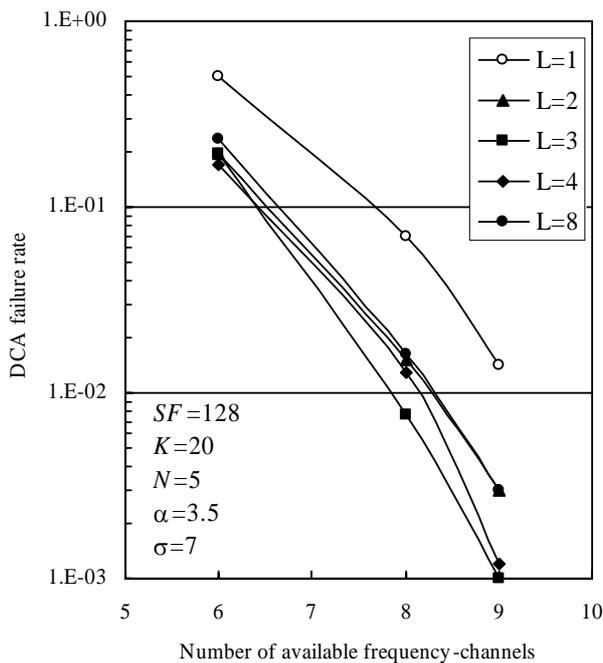
のときのDCA失敗率特性が最も良くなっている．これは以下のように説明できる． L が大きい方がRake受信効果は大きくなる．一方， L が大きいほどパス間干渉も大きくなる．したがって，これらの影響にはトレードオフの関係が生じ，DCA失敗率が最小となる L が生じる．ところで，拡散率 SF が大きいほど処理利得が大きくなり，干渉電力を抑圧できる．したがって， SF が大きいほどパス間干渉よりもRake受信効果の影響を大きく受けるようになるため，DCA失敗率が最小となるパス数 L は大きくなる．



(a) $SF=32$



(b) $SF=64$



(c) $SF=128$

図5 周波数チャンネル数とDCA失敗率の関係

4. むすび

バーチャルセルラシステムを実現するためのマルチホップネットワークにおける自律分散型チャンネル割当て法において、周波数選択性フェージング下におけるDCA失敗率特性を計算機シミュレーションによって求めた。その結果、DCA失敗率は伝搬路のパス数の影響を強く受け、DCA失敗率を最小とするパス数が存在すること、拡散率が大きくなるほどDCA失敗率を最小にできるパス数は大きくなることを明らかにした。

参考文献

- [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] T. Otsu, Y. Aburakawa and Y. Yamao, "Multi-Hop Wireless Link System for New Generation Mobile Radio Access Networks", IEICE Trans. Commun., vol. E85-B, no.8, pp.1542-1551, Aug. 2002.
- [3] E. Kudoh and F. Adachi, "Power and frequency efficient virtual cellular network", IEEE proc. VTC'2003 Spring, April 2003.
- [4] E. Kudoh and F. Adachi, "Transmit power efficiency of a multi-hop virtual cellular system", submitted to IEEE VTC'2003 Fall, Oct. 2003.
- [5] E. Kudoh and F. Adachi, "Study of a multi-hop communication in a virtual cellular system", submitted to WPMC'2003, Yokosuka, Japan, Oct. 2003.
- [6] I. Katzela and M. Naghshineh, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: a comprehensive survey", IEEE personal communications, pp.10-31, June 1996.
- [7] Y. Furuya and Y. Akaiwa, "Channel segregation, a distributed adaptive channel allocation scheme for mobile communication systems", IEICE Trans., vol.E74, no.6, pp.1531-1537, June 1991.
- [8] 工藤, 安達, "マルチホップバーチャルセルラ通信における自律分散型チャンネル割当て法", 信学技報, RCS2003-232, pp.103-107, Nov. 2003.