

マルチホップバーチャルセルラ通信における 自律分散型チャネル割当て法の失敗率特性

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。マルチホップバーチャルセルラシステムでは効率的なチャネル割当てが必要である。本論文では、マルチホップバーチャルセルラシステムにチャネル棲み分け法を適用した自律分散型チャネル割当て法の DCA 失敗率特性について検討し、パスロス指数、シャドウイングロスの標準偏差、経路構築用制御チャネルと通信チャネル間のフェージング相関の影響について明らかにする。

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

Failure rate performance of distributed dynamic channel assignment for a multi-hop virtual cellular system

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. The DCA failure rate was evaluated by computer simulation to find that the failure rate is almost insensitive to the allowable number of hops. In this paper, we evaluate the impact of the radio propagation parameters (the path loss exponent α , the standard deviation σ of shadowing loss and the fading correlation ρ between the control frequency channel and traffic frequency channel) to the DCA failure rate.

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中央無線ポートから各無線ポートへ同一の信号をマルチキャスト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、シャドウイングロス、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無線ポートが生じる。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]。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、効率的なチャンネル割当法[6], [7]が必要である。筆者らは、チャンネル棲み分けアルゴリズム[7]をベースとして、下りリンクで利用したチャンネルを優先的に上りリンクでも利用するマルチホップ通信チャンネル割当法を提案した。そして、提案したチャンネル割当て法のチャンネル割当て(DCA)失敗率は許容最大ホップ数にほとんど依存しないことを示した[8]。

干渉電力は無線伝搬路の影響を強く受けるため、DCA 失敗率も無線伝搬パラメータの影響を強く受けることが予想される。ところで、経路を構築するときの制御チャンネルと通信チャンネルとは伝送すべき情報伝送速度が異なるため、分離して利用されることが考えられる。したがって、制御チャンネルと通信チャンネルのフェージング相関が1でない場合には、たとえ制御チャンネルにおいて総送信電力が最小となる経路が構築されたとしても、必ずしも通信チャンネルでは総送信電力が最小とならないので、DCA 失敗率が劣化することが予想される。本論文では、パスロス指数、シャドウイングの標準偏差、チャンネル間のフェージング相関といった無線パラメータがチャンネル割当て失敗率に与える影響について明らかにする。

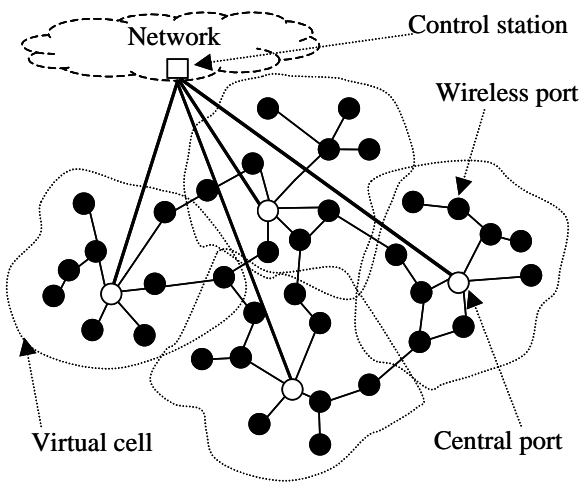


図1 バーチャルセルラシステム

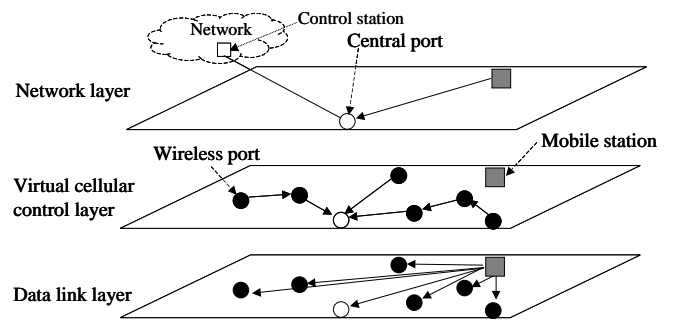


図2 バーチャルセルラシステムのレイヤ構成

2. チャンネル棲み分け法に基づくマルチホップ通信用チャンネル割当

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。システム全体の周波数帯を複数の周波数チャンネルに分割し、各無線ポート間通信にいずれか一つの周波数チャンネルを割り当てる。DS-CDMAを用いているので、同一の周波数チャン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ンネル割当を行う。送信無線ポートが主導して、チャンネル棲み分け法[7]に基づく周波数チャンネル割当を行う[8]。各送信無線ポートは各周波数チャンネルの優先度関数を記載したチャンネルテーブルを具備している。優先度関数は(当該周波数チャンネルを割り当てた回数)/(当該周波数チャン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ンネル割当を行い、次に上りリンクの周波数チャンネル割当を行う。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した方が効率的である。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する方が効率的である。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に通知する。

step2: 受信無線ポート#C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。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 *step1* へ戻る。

- step3:次に上りリンクの周波数チャネル割当てを行う．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ネルと同じ周波数チャネルを上りリンクで利用することを考える．制御チャネルを用いて，このチャ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ネルのうち，優先度関数が最も大きい周波数チャネルを選択する．制御チャネルを用いて，選択されたチャ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ネル割当てを完了する．

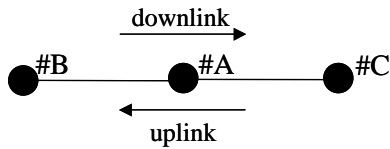


図3 マルチホップ通信の例

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ネルの再割り当てを行なう．

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．チャネル割当てを行う無線ポートの順番はランダムとする．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．

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．

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

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 ξ_{j-i} 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．無線ポートの位置は通信中移動しないと仮定し，フェージング利得 ξ_{j-i} 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 $E[|\xi_{j-i}|^2] = 1$ ($E[\cdot]$ 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．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．

$$\gamma = \frac{P_t(j) \cdot r_{j-i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j-i}/10} \cdot |\xi_{j-i}|^2}{\sum_k P_t(k) \cdot r_{k-i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{k-i}/10} \cdot |\xi_{k-i}|^2}, (2)$$

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．全ての周波数チャネルを検索してもチャネル割当てが出来なかったとき，チャ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ネル割当てが成功した場合を「DCA 成功」とし，それ以外を「DCA 失敗」と定義する．

式(2)より明らかなように γ はパスロス指数 α やシャドウイングの影響を受けるので，これらのパラメータがDCA失敗率に与える影響を明らかにする．さらに，経路を構築するときの制御チャネルと通信チャネルとを分離して利用する場合について考える．このとき，制御チャネルと通信チャネルのパスロスおよびシャドウイングロスはそれぞれ等しいと仮定するとしても，フェージング利得についてはチャネルごとに異なると考えてよい．そこで，経路構築時の制御チャネルと通信チャネルのフェージング利得の相関 ρ の影響についても求める．

本論文では，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 $BER=10^{-3}$ とすると，拡散率 $SF=100$ を用いるときにチャネル割り当て時の所要 SINR は-10dB となる．

3.1. パスロス指数 α の影響

図4にパスロス指数 α をパラメータとした周波数チャネル数とDCA失敗率の関係を示す．シャドウイングの標準偏差 $\sigma=7$ (dB)，制御チャネルと通信チャネルのフェージング相関 $\rho=0$ ，所要 SINR $\gamma_{req}=-10$ dB，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 $K=20$ とし， N は許容最大ホップ数を表す．比較のためシングルホップ($N=1$)の場合も示す． α が小さいほど，DCA失敗率は大きくなる．これは， α が小さいほどパスロスが小さくなるため，受信干渉電力が大きくなるからである．また，DCA失敗率は N にほとんど依存しない．この理由は以下のように説明できる． N が増加すると，平均ホップ数が増加してDCA失敗率も増加する．一方， N が大きいほど全無線ポートの送信電力の和は小さくなるので，干渉電力が減少してDCA失敗率も小さくなる．この結果，DCA失敗率は N にほとんど依存しなくなると考えられる．

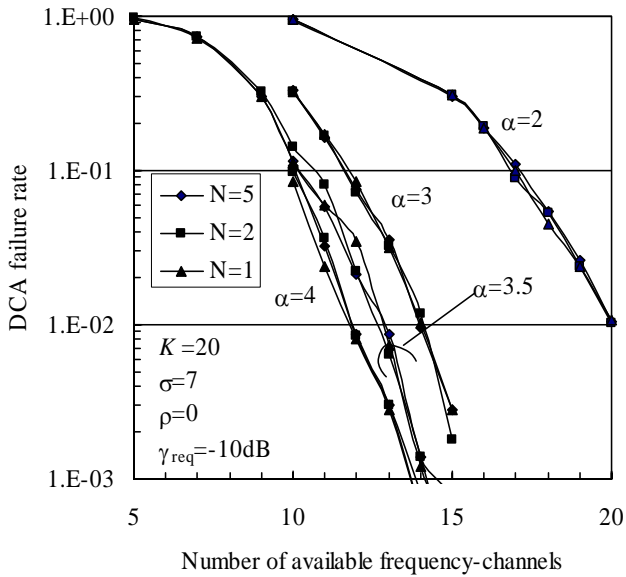


図4 パスロス指数 α が DCA 失敗率に与える影響

3.2. シャドウィング標準偏差 σ の影響

図5にシャドウィングの標準偏差 σ 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。ここで、 $K=20$ 、 $\alpha=3.5$ 、 $N=5$ 、 $\gamma_{\text{req}}=-10\text{dB}$ としている。いずれの場合も DCA 失敗率は σ にほとんど依存しないことがわかる。これは以下のように説明することができる。 σ が大きくなるほど、干渉電力も大きくなる。一方、 σ が大きいほど、通信路ごとの伝搬ロスの差が大きくなるので、ルート選択時のルートダイバーシチ効果が大きくなる。この結果、DCA 失敗率は σ にほとんど依存しなくなると考えられる。なお、ここでは $N=5$ の場合のみを示しているが、 α が異なる場合と同様、 σ が異なる場合も DCA 失敗率は N にほとんど依存しない。

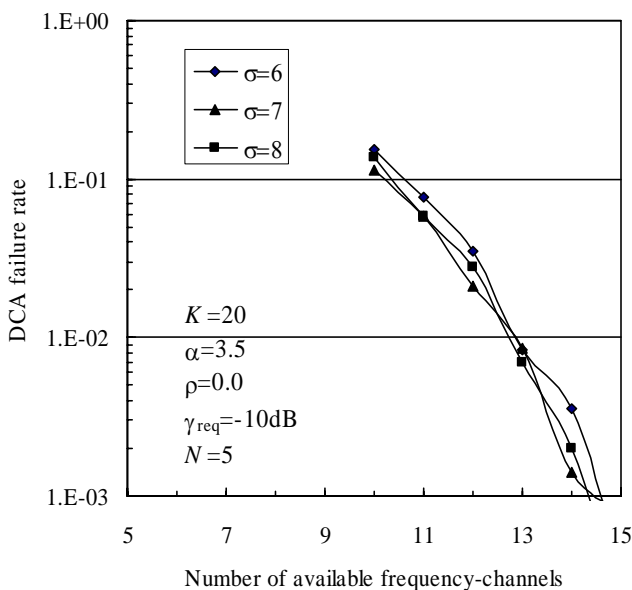


図5 シャドウィング標準偏差 σ が DCA 失敗率に与える影響

3.3. フェージング相関 ρ の影響

図6に制御チャンネルと通信チャンネルのフェージング相関 ρ 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。ここで、 $K=20$ 、 $\alpha=3.5$ 、 $\sigma=7$ 、 $N=5$ 、 $\gamma_{\text{req}}=-10\text{dB}$ としている。 ρ が小さくなるほど経路選択時と通信時のチャンネル利得が異なってくるため、DCA 失敗率は増加する。 $\rho>0.6$ のときには無相関の場合($\rho=0$)とほぼ同じ特性となる。

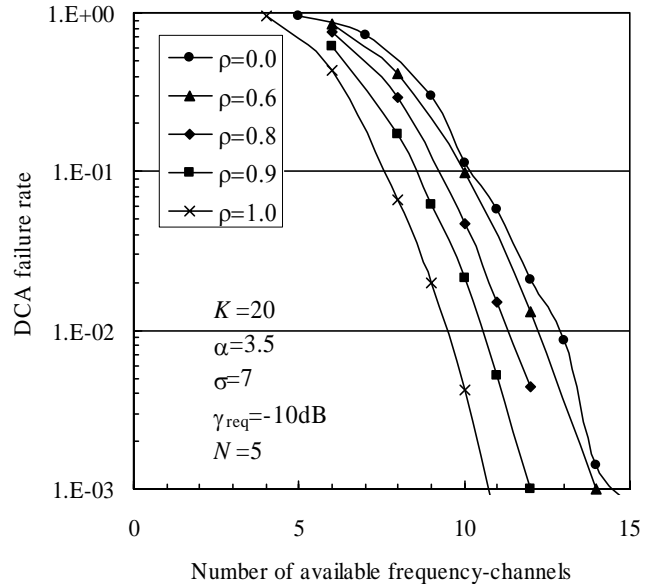


図6 フェージング相関 ρ が DCA 失敗率に与える影響

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の DCA 失敗率特性に及ぼす、パスロス指数 α 、シャドウィングの標準偏差 σ 、フェージング相関 ρ の影響を計算機シミュレーションにより明らかにした。本論文で得られた結果をまとめると以下ようになる。

パスロス指数 α 、シャドウィングの標準偏差 σ の値によらず、DCA 失敗率は許容最大ホップ数にほとんど依存しない。

パスロス指数 α が小さいほど DCA 失敗率は大きくなる。

DCA 失敗率はシャドウィングロスの標準偏差 σ にほとんど依存しない。

フェージング相関 ρ が小さくなるほど DCA 失敗率は大きくなる。

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.