

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

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 移動通信の世界で超高速データ伝送の要求が高まっている。データ伝送レートを高速化しつつ送信電力を低減するために、筆者らはバーチャルセルラシステムを提案している。分散配置された多数の無線ポートから構成されるバーチャルセルでは、移動端末の近傍の無線ポートで受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、ネットワークと接続されている中央無線ポートへと転送される。このような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、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を提案している。全ての無線ポートへのマルチホップ通信経路を構築した後にチャネル割当てを行う。全ての無線ポートは各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、送信する無線ポートが主導して優先度関数にしたがってチャネルを選択する。本論文では、チャネル割当ての失敗率を計算機シミュレーションにより求め、失敗率が最大許容ホップ数にほとんど依存しないことを示す。

キーワード バーチャルセル, 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

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. An efficient channel allocation algorithm is necessary for this virtual cellular system. In this paper, a channel allocation algorithm based on the channel segregation dynamic channel allocation (DCA) is proposed. After all multi-hop routes over distributed wireless ports are constructed, the channel segregation DCA is carried out to allocate the channels to the up/down links along the multi-hop routes. Each wireless port is equipped with a channel priority table. The transmit wireless port of each link initiates the DCA procedure and selects a channel among available ones using its channel priority table to check. In this paper, the DCA failure rate is evaluated by computer simulation to find that the failure rate is almost insensitive to the allowable number of hops.

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 では十数 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伝送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が必要である。チャンネル割当法はFCA (Fixed channel allocation) とDCA (dynamic channel allocation) に大別することができる[6]。トラヒックやユーザ分布の変動がある場合でも、FCAでは固定的にチャンネルを割り当てるため周波数利用効率が劣化する。これに対してDCAでは全てのチャンネルのうち、使用可能なチャンネルをトラフィック変動に応じて適応的に割り当てることができる。DCAは集中制御あるいは自律分散制御によって実現される。マルチホップ通信では自律分散的にネットワークが構築されるので、自律分散DCAが適している。セルラ方式における自律分散型の効率的なチャンネル割当て方式としてチャンネル棲み分け方式が提案されている[7]。しかしながら、マルチホップ通信では、上下リンクのチャンネルを同時に割り当てなければならないので、従来のチャンネル割当て法を単純に適用することはできない。本論文では、チャンネル棲み分けアルゴリズム[7]をベースとして、下りマルチキャスト通信を効率的に行うために送信する無線ポートが主導し、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ことにより効率的なチャンネル利用をめざすマルチホップ通信用チャンネル割当法を提案し、その特性を計算機シミュレーションにより求める。

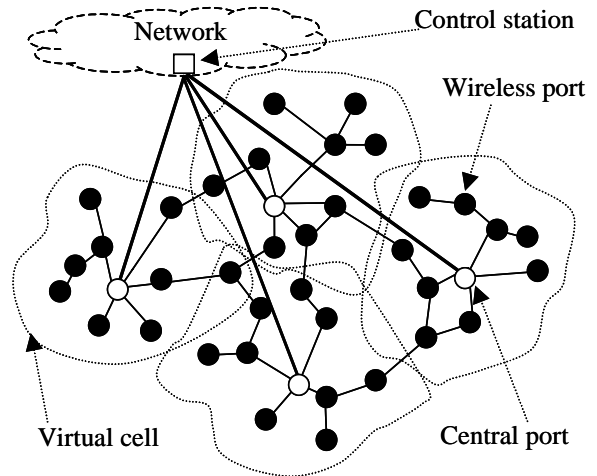


図1 バーチャルセルラシステム

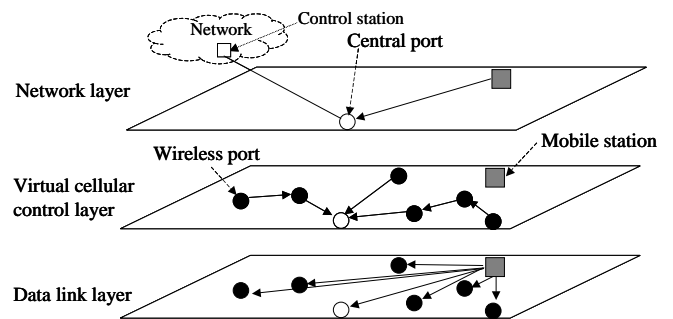


図2 バーチャルセルラシステムのレイヤ構成

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

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]に基づくチャンネル割当を行う。各送信無線ポートは各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(当該チャンネルを割り当てた回数)/(当該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、先に下りリンクのチャンネル割当を行い、次に上りリンクの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、なるべく同一のチャンネルで送信した方が効率的である。また、DS-CDMAのように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するアクセス方式を採用した場合、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、チャンネル割当てを行う。

step1: まず、下りリンクのチャンネル割当を行う。注目する無線ポートにおいて、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チャンネルのうち優先度関数が最も大きい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に通知する．

step2: 受信無線ポートでは通知された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チャンネルを割当て，そうでなければ *step1* へ戻る．

step3: 注目している無線ポートにおいて下りリンクで使用したチャンネルと同じ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へ通知する．

step4: 上りリンクの受信無線ポートでは通知されたチャンネルの SINR を測定する．もし SINR が所要値を満たしていればそのチャンネルを割当て，*step7* へ移行する．

step5: 注目している無線ポートでは，受信に利用しておらず，かつ受信無線ポートにおいて割当可能かまだ確認していないチャンネルのうち，優先度関数が最も大きい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に通知する．

step6: 受信無線ポートでは通知されたチャンネルが所要 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の上下リンクのチャンネル割当てを完了する．

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，定期的にチャンネルの再割り当てを行なう．

3. 計算機シミュレーション

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が割り当てられる．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．簡単のため，正 6 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アンテナを仮定する．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．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#0 における無線ポート# i からの受信電力 $P_r(i)$ は次式のように表すことができる．

$$P_r(i) = P_t(i) \cdot r_i^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_i/10} \cdot |\xi_i|^2 \quad (1)$$

ここで， $P_t(i)$ は無線ポート# i の送信電力であり， r_i, α, η_i および ξ_i はそれぞれ無線ポート# i と無線ポート#0 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． ξ_i は，平均値がゼロで分散が $E[|\xi_i|^2] = 1$ の複素ガウス変数である($E[\cdot]$ は集合平均操作) が，フェージング利得は通信中に時間変動しないものと仮定する．

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 $P_t(i)$ 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#0 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．

$$\gamma = \frac{P_t(j) \cdot r_j^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_j/10} \cdot |\xi_j|^2}{\sum_i P_t(i) \cdot r_i^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_i/10} \cdot |\xi_i|^2} \quad (2)$$

ところで，経路を構築するときの制御信号をやりとりする周波数チャンネルと通信を行う周波数チャンネルとを分離することが必要である．今全ての周波数チャン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周波数チャンネルごとに異なると考えてよい．そこで，(A) 全ての周波数チャンネルのフェージング利得が等しい場合（すなわち，全ての周波数チャンネルのフェージング利得の相関が 1 の場合）と，(B) 全ての周波数チャンネルのフェージング利得が独立である場合（すなわち，全ての周波数チャンネルのフェージング利得の相関が 0 の場合）を考慮ことにする．(B) の場合は，経路構築時と通信時のフェージング利得の違いによる特性劣化が懸念される．そこで，何らかの方法でフェージング利得の平均値を知り得たとして，フェージング利得の平均値を用いて計算した総送信電力が最小となるような経路選択を行った場合(B-1)と，制御信号の周波数チャンネルのフェージング利得を用いて計算した総送信電力が最小となる経路選択を行った場合(B-2)について考える．

本論文では，データ変調を QPSK，拡散変調を BPSK とする DS-CDMA を仮定する．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 $SF=100$ (10) を用いるときにチャンネル割り当て時の所要 SINR は -10 (0) dB となる．

図 3 に周波数チャンネルの割り当て例を示す．周波数チャンネル#5 が中央無線ポート#A の下りリンクに割り当てられている．同一の周波数チャンネルが上りリンク及び下りリンクで使用されており，効率的に周波数割当てが行われていることがわかる．例えば，周波数チャンネル#3 は無線ポート#B および#C の送信チャンネルとして使われている．

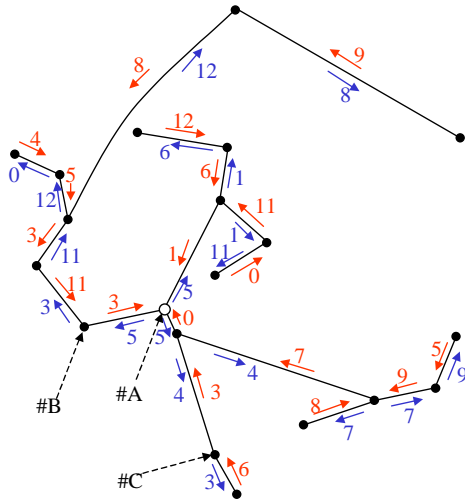
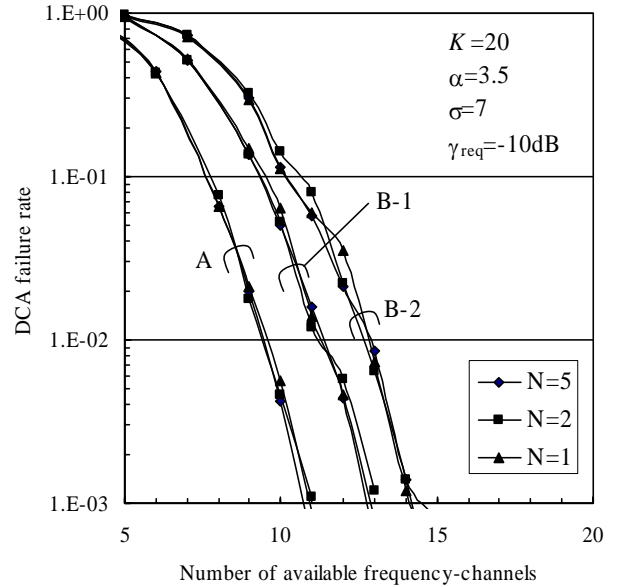
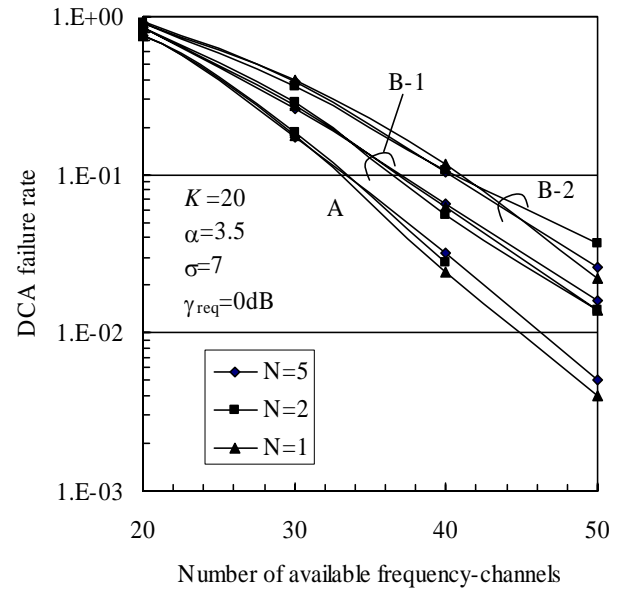


図3 周波数チャンネルの割り当て例

注目するパ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」とし、それ以外を「DCA 失敗」と定義する。図4に周波数チャンネル数とチャンネル割当て失敗率の関係を示す。図4(a)は所要 SINR $\gamma_{\text{req}}=-10\text{dB}$ 、図4(b)は所要 SINR $\gamma_{\text{req}}=0\text{dB}$ 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 $\sigma=7(\text{dB})$ とし、 N は許容最大ホップ数、 K は中央無線ポートも含めた1パーチャルセル当りの無線ポート数を表す。比較のためシングルホップ ($N=1$) の場合も示す。周波数チャンネル間のフェージング利得の相関が1の場合(A)に比べ、相関が0の場合(B)の方が失敗率が大きい。これは、経路選択時と通信時のフェージング利得が異なるためである。また、フェージング利得の平均値を用いた経路選択(B-1)では、そうでない場合(B-2)よりも失敗率が小さい。いずれの場合も失敗率は 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失敗率も増加する。一方、 N が大きいほど無線ポートの総送信電力は小さくなるので、干渉電力が減少して失敗率も小さくなる。この結果、失敗率は N にほとんど依存しなくなると考えられる。



(a) $\gamma_{\text{req}}=-10\text{dB}$



(b) $\gamma_{\text{req}}=0\text{dB}$

図4 DCA 失敗率

4. むすび

パーチャルセル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いて、チャンネル棲み分けアルゴリズムをベースとして、下りマルチキャスト通信を効率的に行うために送信無線ポートが主導し、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ことにより効率的なチャンネル利用をめざすマルチホップ通信チャンネル割当て法を提案し、その特性を計算機シミュレーションにより求めた。その結果、経路選択時と通信時の周波数チャンネル間のフェージング利得の相関が小さくなると失敗率が增大すること、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。

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.