超高速無線通信のためのバーチャルセルラシステムにおける マルチホップネットワークリソース割当て法に関する研究

代表研究者 工 藤 栄 亮 東北大学大学院工学研究科·助教授 共同研究者 安 達 文 幸 東北大学大学院工学研究科·教授

1 まえがき

近年,移動通信のサービスの比重は音声通信からデータ通信へと移りつつある。データ通信では画像等の大容 量データも伝送することになるため、伝送速度の高速化および多様化が必須となる。ところが、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^[1]。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る。したがって、超高速な無線ネットワークを構築するため には、単に無線伝送技術についての検討ばかりでなく、このような極小セルをいかに構築するかという無線ネッ トワークに関する検討が非常に重要である。

そこで,我々は送信電力の増加を抑えつつ 100Mbit/s クラスの超高速伝送が可能な無線ネットワークの構築 を目指してバーチャルセルラネットワーク (VCN)を提案し,周波数繰り返し距離や送信電力効率について検 討してきた^[2]。VCN の構成を図1に示す。VCN は分散配置される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。移動端末は複数のエンドポート(移動端末と直接通信している無線ポー トをエンドポートと呼ぶ)と同時に通信を行う。エンドポートがダイバーシチブランチとして機能するので,移 動端末の送信電力を軽減できる。上りリンクでは,各エンドポートで受信された信号を中央無線ポートへマルチ ホップ通信により転送する。また,下りリンクでは中央無線ポートから各エンドポートへ同一の信号をマルチ ホップ通信により転送する。したがって,エンドポート〜中央無線ポート間のマルチホップリンクをいかに実現 するかが重要な課題となる。本研究では,我々が提案してきたマルチホップ VCN を実現するためのキー技術で ある周波数,送信電力等のリソース割当て法について検討する。

周波数チャネルの割当法として動的チャネル割当(DCA)と固定的チャネル割当(FCA)の2通りがある。 従来のセルラネットワークでは FCA が採用されているが,我々は周波数チャネルの割り当てにチャネル棲み分 けアルゴリズムを適用すること(CS-DCA)を提案してきた。本研究では,計算機シミュレーションにより CS-



図1 バーチャルセルラネットワーク (VCN)

DCA と FCA の失敗率を明らかにし、CS-DCA の有効性を検証する^[3]。また、実際の通信では移動端末からエ ンドポートまでのユーザリンクを含めて、移動端末から中央無線ポートまでのリソース割当について考えなけれ ばならない。そこで、ユーザリンクとマルチホップリンクの双方に CS-DCA を適用し、呼損率を求め、従来の セルラ方式と比較する^[4]。さらに、マルチホップ通信では直接通信をしている無線ポートばかりでなく、同一経 路上の他の無線ポートからの信号も受信できるので、これらの信号をダイバーシチ合成(マルチホップダイバー シチ)することにより、所要の送信電力を削減できる可能性がある。そこで、信号合成に最大比合成ダイバーシ チを適用し、マルチホップ最大比合成(MHMRC)ダイバーシチを行うことを提案し、その送信電力低減効果を 明らかにする^[5]。

2 CS-DCA を適用したチャネル割当の効果

2.1 まえがき

従来のセルラネットワークでは、各基地局が使用できるチャネルをあらかじめ制限しておく固定チャネル割り 当て法(FCA)が採用されている^[9]。しかし、マルチホップリン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。そこで我々は、周波数チャネルの割り当てにチャネル棲み分けアルゴリズム^[7]を適用する こと(CS-DCA)を提案し、チャネル割当て失敗率を明らかにしてきた^[8]。以下では、マルチホップリンクにお いて計算機シミュレーションにより CS-DCA と FCA の失敗率を求め、比較する^[3]。ところで、移動端末から 中央無線ポートまでの通信は、エンドポート-中央無線ポート間のマルチホップリンクばかりでなく、移動端 末-エンドポート間のユーザリンクも考慮しなければならない。そこで、移動端末-中央無線ポート間のマルチ ホップリンク、ユーザリンクの双方に CS-DCA を適用したときの呼損率を従来のセルラ方式と比較し、VCNの 有効性を検証する^[4]。

2.2 チャネル割当法

マルチホップリンクの無線アクセス方式として DS-CDMA を考える。システム全体で利用可能な周波数チャネル数を *C* とする。DS-CDMA を用いているので、同一の周波数チャネルを複数の無線ポートで再利用することができる。

2.2.1 CS-DCA

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,できるだけ同一の周波数チャネルで送信する方が効率的である。また,DS-CDMA では同一の周波数チャ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,周波数チャネル割当を行う。

- step1:まず,下りリンクの周波数チャネル割当を行う。注目する無線ポート #A (図2参照) 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 #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(計算機シミュレーションのための受信 SINR の表示式を2.2.3節で求め る)。無線ポート #C, #D ともに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 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を完了する。

各無線ポートは上記の手順を順次行う。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。



図3 無線ポート #A におけるチャネル割当てのフローチャート

2.2.2 FCA

図4に示すように C 個のチャネルをクラスタサイズ F のグループに分割する。各無線ポートは C/F 個の チャネルを使用することができる。FCA では、各無線ポートが使用できるチャネルグループをあらかじめ決め ておく。CS-DCA の場合と同様に、送信する無線ポートが主導してチャネル割当を行う。各無線ポートは利用 可能な C/F 個の周波数チャネルのうち、まず、使用していない周波数チャネルをランダムに割当てる。アクセ ス方式として DS-CDMA を採用しているので、ひとつの周波数チャネルで複数の通信を行うことが可能である。 そこで、全ての周波数チャネルの中で、送信電力が最も小さい周波数チャネルを割当てることにする。受信する 無線ポートにおいて,割当てられた周波数チャネルの受信 SINR が所要 SINR を満たさないときにはチャネル 割当は失敗となる。



図4 周波数チャネル配置

2.2.3 受信 SINR

CS-DCA では受信 SINR を測定して, 再チャネル検索を行うかどうか決定する。また, 2.2.1および2.2.2節で 述べたとおり, チャネル割当が成功できるか否かは受信 SINR が所要 SINR を上回るか否かによって判定され る。本節では受信 SINR の数式表現を求める。

DS-CDMA では周波数選択性フェージング環境では Rake 受信により受信 SINR を改善できる。各周波数 チャネルの伝搬路は L 個のパスからなる周波数選択性チャネルを仮定する。無線ポート #i における, 無線ポー ト #j からの受信電力 P'_i は次式のように表すことができる。

$$P_{j,i}^{r} = P_{j}^{t} \cdot r_{j,i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j,i}/10} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} |\zeta_{j,i}(l)|^{2}$$
(1)

ここで、 P'_{j} は無線ポート #j の送信電力であり、 $r_{j,i}, \alpha, \eta_{j,i}$ および $\zeta_{j,i}(l)$ 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、シャドウィングロス(dB)およびフェージング利得である。無線ポートは移動しないので、フェージング利得 $\zeta_{j,i}(l)$ は時間変動しないが、異なるマルチホップリンク間では平均がゼロで分散が $E[|\zeta_{j,i}(l)|^{2}] = \frac{1}{L} (E[\cdot] は集合平均操作)の複素ガウス分布に従って変動するランダム変数であるものとする。$ $受信信号電力対雑音電力比(SNR)を一定とする理想的な送信電力制御により <math>P'_{i}$ を決定するものとする。

$$P_{j}^{\prime} = \frac{P_{\text{target}}}{r_{j,i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j,j}/10}} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} |\zeta_{j,i}(l)|^{2}$$
(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する複数の信号の拡散には直交符号を用いることができるので,同一パスからの干渉は生じないものと仮定できる。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 SINRy は次式で表される。

$$P_{j}^{t} = \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\frac{P_{j}^{t}}{N} \cdot r_{j,i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j,i}/10} |\zeta_{j,i}(l)|^{2}}{\left(1 + \frac{1}{SF} \frac{P_{j}^{t}}{N} \cdot r_{j,i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{j,i}/10} \cdot \sum_{\substack{l'=0\\l'\neq l}}^{L-1} |\zeta_{j,i}(l')|^{2} + \frac{1}{SF} \sum_{\substack{k\neq j}} \frac{P_{k}^{t}}{N} \cdot r_{j,i}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{k,i}/10} \cdot \sum_{\substack{l'=0\\l'\neq l}}^{L-1} |\zeta_{j,i}(l')|^{2}\right)}$$
(3)

ここで、分母の第2項は無線ポート#iからのパス間干渉、第3項は他の無線ポートからの干渉である。

2.3 マルチホップリンクにおける CS-DCA の適用効果

簡単のため,正6角形のバーチャルセルを仮定し,第2隣接層まで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。無線ポートを各バーチャルセル内に規則的に配置する。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。干渉制限型のチャネルを考える。DS-CDMA におけるデータ変調を QPSK,拡散変調を BPSK とする。 誤り率は $\frac{1}{2}$ erfc ($\sqrt{\gamma/2}$) と表される^[10]ので,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、チャネル割り当て時の所要SINR γ_{req} は9.8 (dB)となる。

CS-DCA の場合,受信 SINR γ が所要 SINR γ_{req} を満たしたときには当該周波数チャネルを割当て,そうでな い場合は再検索する。もしも全ての周波数チャネルを検索してもチャネルを割当てることが出来なかったとき, チャネル割当てが失敗する。FCA の場合,送信無線ポートは利用可能な *C/F* 個の周波数チャネルの中から **2.2.2**節で述べた手順で周波数チャネルを割当てる。割当てた周波数チャネルの受信 SINR γ が所要 SINR γ_{req} を 満たさないときにチャネル割当失敗となる。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「チャネル割当成功」であるとし,それ以外を「チャネル割当失敗」と定義 する。

図5にクラスタサイズ F をパラメータとした周波数チャネル数とチャネル割当失敗率の関係を示す。(a), (b) および(c)は、それぞれ、許容最大ホップ数 N=10,5 および1の場合を示す。1バーチャルセル当りの無線ポー ト数(中央無線ポートを含む)を K=19 とした。パスロス指数 a=3.5, シャドウィングの標準偏差 $\sigma=7$ (dB), パス数 L=2, 拡散率 SF=64 とした。CS-DCA の方が FCA に較べはるかに失敗率が小さくなっている。C が 大きい領域ではクラスタサイズが小さいほど失敗率は大きくなっている。これはクラスタサイズが小さいほど、 同一周波数チャネルの繰返し距離が短く、大きな干渉を受ける確率が高くなり、割当てられた周波数チャネルの 受信 SINR が所要 SINR を満たさない確率も高くなるためである。また、N=1 (シングルホップ)の場合に較 ベ、N=5 および10の場合の方が失敗率が小さくなっている。これは、シングルホップの場合に較ベマルチホッ プの場合の方が送信電力を低減でき、干渉電力を低減できるからである。また、N=5 と N=10 ではほぼ同程度 の失敗率となっており、最大許容ホップ数を制限可能であることを示唆している。



(a) N=10



図5 周波数チャネル数とチャネル割当失敗率の関係

2.4 ユーザリンクも考慮した CS-DCA の適用効果

ユーザリンク, マルチホップリンク双方に CS-DCA を適用したマルチホップ VCN と従来のセルラーネット ワークの上りリンクにおける呼損率を計算機シミュレーションにより求める。19個の正 6 角形の VC を考える。 従来のセルラネットワークの基地局同様, 中央無線ポートをセルの中央に配置する。到着率 λ でポアソン生起 し、 平均 μの指数分布の保留時間に従う呼を仮定する。印加トラヒック G は次式で定義される。

 $G = \lambda \mu$,

(5)

呼が生起するたびにオンデマンド型の CS-DCA を行うものとする。VCN の場合は移動端末から中央無線ポートまでの転送経路上のリンクのうち一つでもチャネル割当に失敗した場合に呼損になるものとし、従来のセルラネットワークでは移動端末と基地局間のチャネル割当に失敗したときに呼損になるとしている。

図 6 にチャネル数 *C* をパラメータとして印加トラヒックの関数としてプロットした呼損率特性を示す。ここで、N=4、 $\alpha=3.5$ 、 $\sigma=6$ dB、L=4、SF=16としている。この図から、いずれの場合も VCN の方が従来のセルラネットワークよりも呼損率が小さくなっていることが分かる。これは VCN の方が送信電力を低減できるので干渉電力が小さくなるからである。



図6 チャネル数 C をパラメータとした VCN と従来のセルラシステムの呼損率特性

C=6のときの許容最大ホップ数*N*が呼損率に与える影響を図7に示す。*N*が増えるほど呼損率が小さくなる ことが分かる。これは*N*が大きいほど送信電力も小さくなるので,他のリンクに与える干渉電力も小さくなる からである。



図7 許容最大ホップ数が呼損率特性に与える影響

無線ポート数 *K* が呼損率に与える影響を図8に示す。*K* が増えるほど呼損率が小さくなることが分かる。これは *K* が大きいほど送信電力が小さくなる確率も大きくなるので,他のリンクに大きな干渉を与える確率も小さくなるからである。



図8 無線ポート数Kが呼損率特性に与える影響

図9に伝搬パス数 L が呼損率に与える影響を示す。L が増えるほど呼損率が大きくなることが分かる。これは、L が大きくなるほどパス間干渉が増加するためであると考えられる。



図9 パス数Lが呼損率特性に与える影響

2.5 むすび

バーチャルセルラシステムにおけるマルチホップリンクに、チャネル棲み分けを用いる自律分散型チャネル割 当て法(CS-DCA)および固定チャネル割当法(FCA)を適用したときのチャネル割当失敗率を計算機シミュ レーションによって求めた。その結果、CS-DCAの方がFCAよりも著しく失敗率が小さくなることを明らかに した。また、最大ホップ数が5回以上でほぼ同程度の失敗率になるから、最大許容ホップ数を制限可能であるこ とを明らかにした。次に、ユーザリンクとマルチホップリンクの双方にCS-DCAを適用した VCN と従来のセ ルラネットワークの呼損率特性を計算機シミュレーションにより比較し、VCNの方が呼損率を小さできること を明らかにした。

3 マルチホップ通信における MHMRC ダイバーシチによる送信電力低減効果

3.1 まえがき

中央無線ポート-無線ポート間の通信では、マルチホップ通信を適用することにより、各無線ポートの送信電力を著しく低減できる。ところで、マルチホップ通信では、直接通信している無線ポートばかりでなく、他の無線ポートからも同一の信号が送信されるので、これらの受信信号をダイバーシチ合成することによって、さらに送信電力を低減できる。本章では、ダイバーシチに最大比合成を適用した MHMRC ダイバーシチを VCN に適用することを提案し、その送信電力効率を計算機シミュレーションにより求めている。

3.2 マルチホップ MRC

図10にマルチホップ最大比合成ダイバーシチ(MHMRC)の概念を示す。移動端末 #0 から送信された信号は, 無線ポート #1 で受信されるばかりでなく, 無線ポート #2, #3, #4 でも受信される。無線ポート #1 は移動端末 から受信した信号を無線ポート #2 へ転送する。無線ポート #2 は, 移動端末 #0 と無線ポート #1 から同一信号 を受信する。したがって, 無線ポート #2 はこれら 2 つの信号をダイバーシチ合成することができる。同様に, 無線ポート #3 は移動端末#0, 無線ポート #1, #2 から受信した 3 つの信号をダイバーシチ合成することができ, 無線ポート #4 は移動端末 #0, 無線ポート #1, #2, #3 から受信した 4 つの信号をダイバーシチ合成することができ, できる。ダイバーシチ合成には最大比合成ダイバーシチ^[9]を適用する。なお, この MHMRC では直接通信して いる無線ポートから受信している信号よりも前に受信した信号を合成するので, MHMRC を適用しても遅延時 間は増加しない。



(a) マルチホップ転送



(b) MHMRC によるマルチホップ転送

図10 マルチホップ最大比合成ダイバーシチ(MHMRC)

送信電力の低減効果を明らかにするために,送信電力の数式表現を以下に導出する。信号電力対雑音電力比を 一定にする理想的な送信電力制御と理想的な Rake 合成を仮定する。L 個のパスからなる周波数選択性チャネル を仮定する。MHMRC を適用しない場合の #i の無線ポートにおける送信電力 P_i(i) は以下のように表される。

$$P_{t}(i) = \frac{P_{req}}{d_{i,j}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{i,j}}{10}} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{i,j}(l)|^{2}}$$
(6)

ここで、 P_{req} は所要受信信号電力、 P'_{j} は無線ポート #j の送信電力であり、 $d_{i,j}$ 、 α 、 $\eta_{i,j}$ および $\xi_{i,j}(l)$ 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、シャドウィングロス(dB)およびフェージング 利得である。一様遅延プロファイルを仮定し、フェージング利得 $\xi_{i,j}(l)$ は平均がゼロで分散が $E[|\zeta_{j,i}(l)|^2] = \frac{1}{L}$ ($E[\cdot]$ は集合平均操作)の複素ガウス分布に従って変動するランダム変数であるものとする。

次に MHMRC を適用したときの送信電力を求めるために,移動端末から中央無線ポートまでn ホップで転送 される場合を考える。ここで、#i=0 は移動端末であり、#i=n は中央無線ポートである。移動端末 #i=0 から の受信電力 $P_r(l)$ は以下のように表される。

$$P_{t}(i) = P_{t}(0) d_{i,j}^{-\alpha} 10^{\frac{\eta_{0,1}}{10}} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{0,1}(l)|^{2}$$
⁽⁷⁾

したがって,移動端末の送信電力 P_t(0) は以下のように表される。

$$P_{t}(0) = \frac{P_{req}}{d_{i,j}^{-\alpha} 10^{\frac{\eta_{0,1}}{10}} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{0,1}(l)|^{2}}$$
(8)

無線ポート # $i = 2 \sim n - 1$ における受信電力 $P_r(i)$ は、過去に送信した全ての無線ポートから受信した信号の和 となり、以下のように表される。

$$P_{r}(i) = \sum_{j=0}^{i-1} P_{t}(j) d_{i,j}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{j,i}}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{j,i}(l)|^{2}$$

$$= \sum_{j=0}^{i-2} P_{t}(j) d_{i,j}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{j,i}}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{j,i}(l)|^{2} + P_{t}(i-1) d_{i-1}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{i-1,i}}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{j,i}(l)|^{2}$$
(9)

ここで経路上の総送信電力 PTotal は以下のように表される。

$$P_{total} = \sum_{i=0}^{n-1} P_t(i)$$
(10)

送信電力制御によって $P_r(i) = P_{req}$ となるので、無線ポート #(*i*-1) における送信電力 $P_t(i-1) = 0$ は以下のように表される。

$$P_{t}(i-1) = \frac{P_{req} - \sum_{j=0}^{i-2} P_{t}(j) d_{i,j}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{i,i}}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{j,i}(l)|^{2}}{d_{i-1,i}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{i-1,i}}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{i-1,i}(l)|^{2}}$$
(11)

もしも, 無線ポート #*i* における #0~#(*i*-2) からの受信信号電力が所要受信信号電力よりも大きい場合, 無線 ポート #(*i*-1) は経路上削除される。したがって, 無線ポート #(*i*-1) の送信電力は $P_i(i-1)=0$ となり, 無線 ポート #(*i*-2) の送信電力 $P_i(i-2)$ は以下のようになる。

$$P_{t}(i-2) = \frac{P_{req} - \sum_{j=0}^{i-3} P_{t}(j) d_{i,j}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{i,i}}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{j,i}(l)|^{2}}{d_{i-2,i}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{i-2i}}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{i-2,i}(l)|^{2}}$$
(12)

このような経路修正アルゴリズムを用いることにより、ホップ数も減少し、遅延時間も減少する。

3.3 計算機シミュレーション

移動端末および無線ポートはランダムに配置される。移動端末から中央無線ポートまでの経路上の上り総送信 電力を計算機シミュレーションにより求める。遅延時間を制限するために最大許容ホップ数を N に制限する。 伝搬パラメータの影響(パスロス指数 α,シャドウィング変動の標準偏差 σ,制御チャネルと通信チャネルの フェージング相関 ρ) について求める。さらに,無線ポート数 K の影響についても求める。

図11に制御チャネルと通信チャネルのフェージング相関 ρ をパラメータとしてプロットしたシングルホップ



図11 送信電力に与える ρ の影響

の場合で正規化した総送信電力を示す。ここで、 α =3.5、 σ -7dB, L=2、K=50 としている。全ての ρ において MHMRC を適用することにより総送信電力を低減できることが分かる。 ρ が小さいほど総送信電力の低減効果は大きくなっている。これは以下のように説明できる。制御チャネルで総送信電力が最小になるような経路を構築している。 ρ が大きくなると、経路構築時の制御チャネルと通信チャネルのチャネル利得が等しくなる。したがって、 ρ が大きくなると、通信チャネルにおいても大電力で送信している無線ポートの割合も小さくなり、直接通信をしている無線ポート以外の無線ポートからの受信電力が小さくなり、ダイバーシチ効果が小さくなるからである。

図12に α をパラメータとした MHMRC ダイバーシチによる送信電力低減効果を示す。縦軸は MHMRC ダイ バーシチを適用しない場合の送信電力で正規化した MHMRC ダイバーシチを適用した場合の送信電力であ る。K = 50, $\sigma = 7$ dB, L = 2, $\rho = 0$ としている。この図から α が小さくなるほど MHMRC による送信電力低減 効果が大きくなることが分かる。この理由は、式(11)を用いて説明することができる。MHMRC による送信電力 低減効果は式(11)の分子の第 2 項、

$$\sum_{j=0}^{i-2} P_t(j) d_{i,j}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta,i}{10}} \sum_{l=0}^{L} |\xi_{j,i}(l)|^2$$

に依存している。α が小さくなるほどこの項は大きくなるので、MHMRC による送信電力低減効果も大きくな



図12 MHMRC による送信電力低減効果に与える α の影響

るのである。

図13に σ をパラメータとした MHMRC ダイバーシチによる送信電力低減効果を示す。ここで K=50, α =3.5, ρ =0, L=2としている。この図から σ が大きくなるほど MHMRC による低減効果が小さくなることが わかる。これは以下のように説明することができる。 σ が大きくなるほどダイバーシチ効果が大きくなるので, 各無線ポートの送信電力が小さくなる。したがって,式(11)の分子の第2項も小さくなるので, MHMRC による 送信電力低減効果も小さくなるのである。



図13 MHMRC による送信電力低減効果に与える σ の影響

図14に *K* をパラメータとした MHMRC ダイバーシチによる送信電力低減効果を示す。ここで α = 3.5, σ = 7dB, ρ = 0, *L* = 2 としている。この図から *K* が大きくなるほど MHMRC による送信電力低減効果が小さく なることが分かる。これは以下のように説明することができる。*K* が大きくなるほど多数の無線ポートの中か ら適切な無線ポートを選択することになるので、各無線ポートの送信電力が小さくなる。したがって、式(11)の分 子の第 2 項も小さくなるので、MHMRC による送信電力低減効果も小さくなるのである。



図14 MHMRC の送信電力低減効果に与える K の影響

3.4 むすび

本章では、マルチホップ VCN に MHMRC ダイバーシチを適用することを提案し、送信電力の低減効果を計 算機シミュレーションにより求めた。その結果、通信チャネルと制御チャネルのフェージング相関 ρ、パスロス 指数 α が小さいほど、無線ポート数 K、シャドウィングの標準偏差 σ が大きいほど、MHMRC による送信電力 の低減効果が大きくなることを明らかにした。

4 むすび

100Mbit/s クラスの超高速伝送可能なバーチャルセルラネットワーク(VCN)を実現するためのキー技術で ある周波数,送信電力等リソース割当て法について検討した。まず,マルチホップリンクにおける周波数チャネ ル割当について,既に提案しているチャネル棲み分け動的チャネル割当(CS-DCA)を適用することにより,従 来の固定割当(FCA)に比べ著しく失敗率を改善できることを明らかにした。次に,移動端末からエンドポー トまでのユーザリンクとマルチホップリンクの双方に CS-DCA を適用したときの呼損率特性を求め,従来のセ ルラ方式よりも呼損率が小さくなることを明らかにした。さらに,マルチホップ通信では直接通信をしている無 線ポートばかりでなく,同一経路上の他の無線ポートからの信号も受信できるので,これらの信号を合成するマ ルチホップ最大比合成ダイバーシチ(MHMRC)ダイバーシチを適用することを提案し,送信電力低減効果を明 らかにした。

今後は,拡散符号,アドレスなどを含めたリソース割当法,さらにはマルチホップパケットスケジューリング について検討していく。

参考文献

- F. Adachi, "Wireless Past and Future-Evolving Mobile Communication Systems", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, no.1, pp.55-60, Jan. 2001.
- [2] E. Kudoh and F. Adachi, "Power and Frequency Efficient Wireless Multi-Hop Virtual Cellular Concept", IEICE Trans. Communications, vol.E88-B, no.4, pp.1613-1621, April 2005.
- [3] 工藤栄亮,安達文幸, "マルチホップバーチャルセルラネットワークにおけるチャネル棲み分けを適用した動的チャネル割当ての効果",信学技報, RCS2004-100, pp.67-71, 2004年7月。
- [4] Lalla Soundous El Alami, Eisuke Kudoh, Fumiyuki Adachi, "On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Virtual Cellular Networks using Channel Segregation algorithm," 信学技報, RCS2004-376, pp.57-62, 2005年3月.
- [5] Imane Daou, Eisuke Kudoh and Fumiyuki Adachi, "Transmit Power Efficiency of Multi-Hop MRC Diversity for a DS-CDMA Virtual Cellular Network", 信学技報, RCS2004-239,pp.19-24, Jan. 2005.
- [6] I. Katzela and M. Naghshineh, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: a comprehensive survey", IEEE Personal Communications, vol.3, no.3, 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ネル割当て法",信学技報, RCS2003-232, pp.103-107, Nov. 2003.
- [9] 進士編,移動通信の基礎,信学会,1986
- [10] J. G. Proakis, Digital communications, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995.

〈発表資料〉

題名	掲 載 誌 · 学 会 名 等	発表年月
マルチホップバーチャルセルラネットワー クにおけるチャネル棲み分けを適用した動 的チャネル割当ての効果	信学技報, RCS2004-100, pp.67-71	2004年7月
Transmit Power Efficiency of Multi-Hop MRC Diversity for a DS-CDMA Virtual Cellular Network	信学技報, RCS2004-239, pp.19-24	2005年1月
On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Virtual Cellular Networks us- ing Channel Segregation algorithm	信学技報, RCS2004-376, pp.57-62	2005年3月
Adaptive Route Reconstruction Algorithm for Multi-hop Virtual Cellular Network	信学技報, RCS2004-377, pp.63-68	2005年3月
Transmit Power Efficiency of Multi-Hop Hybrid Selection/MRC Diversity for a DS-CDMA Virtual Cellular Network	信学総大, B-5-233, p.682	2005年3月
Distributed Dynamic Channel Assignment for Multi-Hop DS-CDMA Virtual Cellular Network	IEICE Trans. Communications, vol.E88-B, no.6, pp.2525-2531	2005年6月
Transmit Power Efficiency of Multi-Hop MRC Diversity for a Virtual Cellular Network	IEICE Trans. Communications, vol.E88-A, no.9(掲載予定)	2005年9月