

# 高度化無線通信システムにおける増幅器の電力利用効率を考慮した送信制御法の検討

代表研究者 田 久 修 信州大学 工学部 電気電子工学科 助教

## 1. はじめに

本研究課題では、携帯電話に代表される次世代高速大容量移動無線通信システムにおいて、システムをサポートする基地局における消費電力を低く抑える一方で、高速大容量性を失わないようにする、送信方法について検討を進めた。当初3つの課題を設定して研究課題を進めたところ、研究過程において新たな課題が一つ明らかになった。研究過程で生じた課題を含めて下記4つの課題を示す。

1. 送信制御法についての基礎検討 (既設定)
2. 電力増幅器における直流電源と送信電力の関係性について (新規設定)
3. 単一セル環境を想定した消費電力一定条件における伝送容量評価 (既設定)
4. マルチセル環境を想定した消費電力一定条件における伝送容量評価 (既設定)

本研究助成期間の平成23年3月末までに課題3までシミュレーション構築を進め、具体的に定量的な結果を得ている。しかし、課題4については、現在も継続的に研究を進めている。そこで、本報告書では、1から3までの成果を中心に報告し、現在までに明らかになっている事項についてまとめさせていただく。その後、本課題を進めるに当たり生じた新たな課題や4の課題の進捗状況、さらには今後の発展性について議論する。

## 2. 各課題の成果報告

### 2. 1 課題1. 送信制御法についての基礎検討

#### (1) 電力増幅器に対する線形化技術の適用を考慮した、低包絡線化技術の提案。

近年、高速大容量無線通信方式として、複数の異なる周波数チャネルを同時に利用した並列伝送する直交周波数分割多重 (OFDM) が用いられている。具体的には、無線LAN規格であるIEEE802.11n[1]や、最新の移動無線通信規格であるLTE[2]などにおいて採用されている。OFDMが高速大容量通信に適している理由は、広帯域通信に特有のマルチパス通信路において、OFDMでは搬送波当たりの伝送速度を低く抑えることができるため、反射波の影響を小さく抑えられる利点があるからである。それに加えて、特にセルラー通信などの集中制御型の無線通信システムでは、OFDM変調により使用可能な帯域を分割し、利用者間の伝達関数の状態に応じた帯域割り当てが可能であるという点である。これを本稿では、サブキャリア割り当てと呼んでいる。

図1に移動無線環境の模式図と、各携帯端末の通信路状態と帯域との関係の例を示した図を示す。図より、各端末が通信に有利な周波数帯域は異なるため、OFDMを用いることで、状態の優れた帯域を個別に利用者

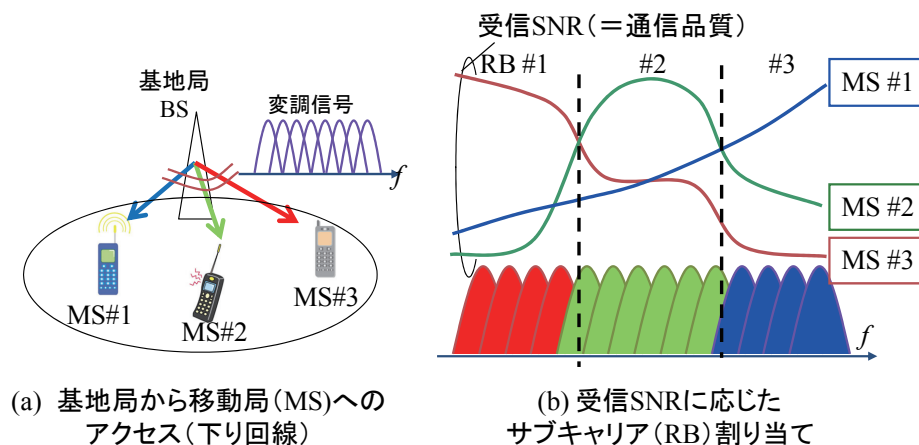
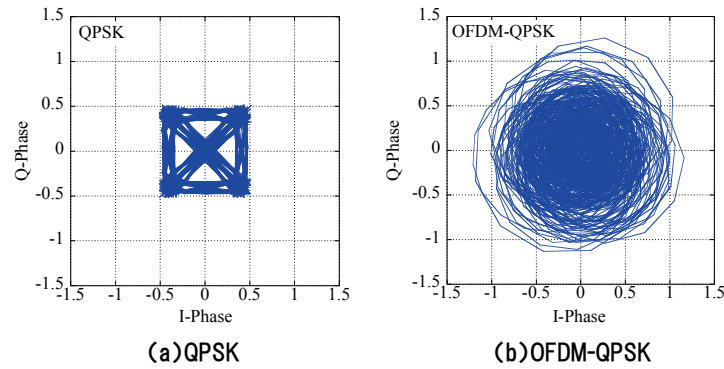


図1 高速大容量移動無線通信システム



**図2 送信信号の振幅変動(マルチキャリア変調(OFDM)が従来変調に比べ、振幅が大きく変動する様子がわかる。**

割り当てることが可能になる。その結果高い、受信品質を達成し高速大容量化を図ることができる。

しかし、OFDMの欠点として、図2に示すように信号の包絡線変動が激しく雑音のような信号となる。雑音のような信号を電力増幅器で線形増幅することは極めて困難である。電力増幅器は、送信機のフロントエンドに配置され、長距離伝送を実現するために信号電力をあらかじめ高める機能を有する。この電力増幅器の起動は、外部より供給されたバイアス電圧により、信号波形が拡張されることが基本原理である。そのため、バイアス電圧以上の信号は出力できないため、雑音のような信号は、平均電力に比べて瞬時の電力が極めて大きく、バイアス電圧を超えてしまい、波形歪が生じてしまう。一方で、バイアス電圧を高くすることで非線形歪を回避することができるが、増幅器により大きな電圧を与えることになるため、消費電力量が膨大になることが問題視されていた[3]。

そこで、OFDM信号を対象として、包絡線変動を低く抑える手法が検討されている[3]。具体的に上げると、「クリッピング and フィルタリング法」は、高い瞬時電力に対して増幅器に入力される以前に非線形処理によりカットする手法である。非線形処理であるため、歪に起因する品質劣化が大きいことが問題視されている。一方、線形処理により低包絡線化を施す手法も提案されている。具体的には、情報送信する順番を任意に入れ替えることによって、各サブキャリアの合成パターンを複数作成し、その中で低包絡線となる信号を選択的に送信する方法である。この手法では、効果的に低包絡線化を実現できる反面、送信パターンを事前に受信機側に通知するための副通信路が必要になり、伝送速度低下を生じてしまう。それゆえ、これまでに低包絡線手法に対する効果的な手法等は提案されていなかった。

そこで、我々は、OFDMの包絡線変動を低く抑えるため、低包絡線となるように、サブキャリア割り当てを動的に変更する手法を提案していた[4]。本手法では、これまで通信路状態が最高品質の端末に割り当てるサブキャリア割り当てルールを、それに準ずる端末への割り当てを許容することによって、品質劣化を許容する一方で、低包絡線化を実現することに成功していた。本手法の利点は、サブキャリア割り当ては、既に高品質大容量伝送を実現するために必須であり、LTE[2]標準では、送受信機間でサブキャリア割り当てに必要な事前情報の交換を設定している。それゆえ、本提案法は、既に別目的で利用されている事前情報の交換通信路をそのまま使用することができる。そのため、LTEなどの集中制御型通信に適しているといえる。さらに、本提案法では、各移動機の処理の変更は不要であり、集中局である基地局が帯域割り当てのルールを切り替えるだけで実現することができる。よって、既にサービスが開始されているLTE標準の移動無線通信システムに対しても、プログラムの書き換え程度で適用することができる利点がある。以上の観点から提案法は、これまでの低包絡線化技術の課題を効果的に解消しているといえる。しかし、欠点として品質劣化が生じる課題が残されていた。これは、サブキャリアを準候補とする利用者に対して割り当てることを許容しなければならないため、品質低下が必然的に生じてしまう点である。この品質低下は、大容量伝送を実現するためのボトルネックとなる恐れがあるため、本課題を克服する必要がある。

そこで、本基礎検討では、品質劣化を改善するため、改良を進めた。改良するため着目した点として、品質劣化を共用して低包絡線化を進める際に、電力増幅器の線形化処理の適用をこれまで考慮していなかった。具体的には、電力増幅器は供給電圧以下の電圧変動に対する線形化を適用するため、プレディストーションなどの線形化技術が適用されている。例として、電力増幅器の入出力モデルを図3に示す。図より、非線形パラメータである $p$ は、現在の高効率電力増幅器では、線形化技術によって極めて高くなることが報告されており、電圧が飽和する電圧レベル以下は線形性が高く確保されている。これまで、提案手法を適用する際に、包絡線変動をできる限り低く抑えることを提案していた。そこで、線形化処理による線形領域の拡

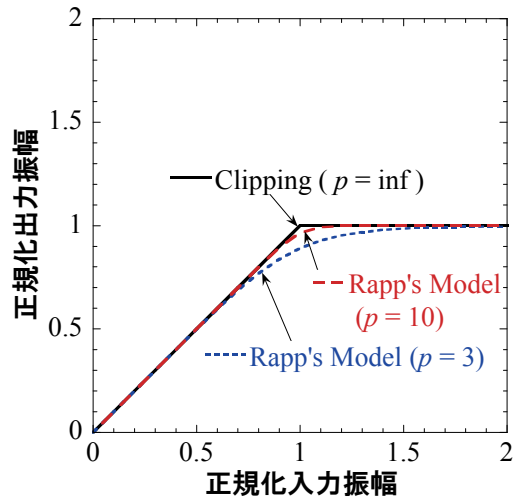


図3 電力増幅器の入出力特性(出力電圧が一定となる飽和領域への遷移が、係数 $p$ : 大のとき線形性が高い)

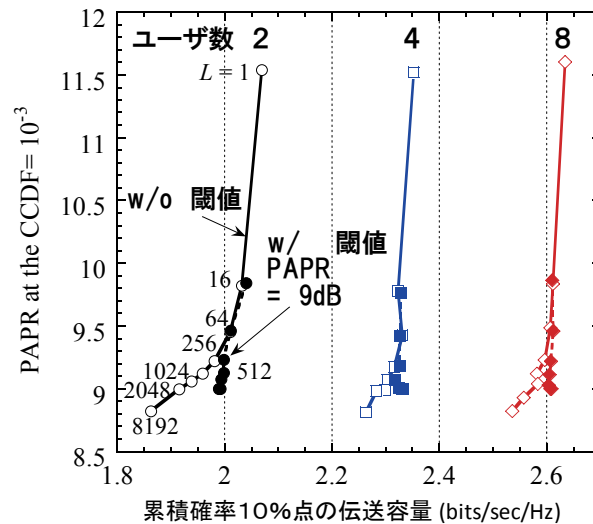


図4 通信路容量に対する包絡線変動の様子を示す値PAPR値特性 (閾値の設定により、容量低下を低く抑え、低PAPR化を実現)

大効果を考慮し、包絡線変動の目標値である閾値を出力電圧が一定となる飽和領域へと切り替えられる位置に設定した。これによって、包絡線変動の必要要件を緩和し、品質劣化を緩和できる。目標値を用いた低包絡線化手法について、計算機シミュレーションによる評価を実施した。評価結果を図4に示す。本特性の見方は、横軸に単位周波数当たりの伝送速度を示す通信容量、縦軸に包絡線の変動を示す規範値として最大瞬間電力（ピーク電力）対平均電力比（PAPR）値を示している。よって、PAPRが低く、通信容量が大きくなるほど、電力消費を低く抑え、より大きな伝送容量を達成していると考えられる。また、 $L$ とは、提案法における低包絡線の優先度合いを示し、 $L$ が大きくなるほど包絡線変動を低く抑えるために、最高品質の端末に準ずる端末へのリソースを割り当てを許容している。図より、閾値を用いた特性が少ない伝送容量で必要PAPRである9dBを達成しており、閾値の設定によって、伝送容量の低下を低く抑えられることが明らかになった。そのため、電力増幅器の線形化処理が重要な役割を担い、その結果として目標となる包絡線変動値の設定が可能となることがわかった。なお、本評価の派生的な結果として、サブキャリア割り当て手法をLTE規格における上り回線移動無線規格であるIFDMAに、本研究課題が進める低包絡線化手法を適用することで、高品質化に貢献できるという成果を発表している。

## (2) 通信路状態情報の削減に伴う、サブキャリア割り当ての影響について

我々が推奨するサブキャリア割り当てでは、伝送品質に応じて帯域を動的に割り当てる。そのため、送信前に、伝送品質情報を得る必要がある。高速移動無線通信規格であるLTEでは、各端末が観測した品質情

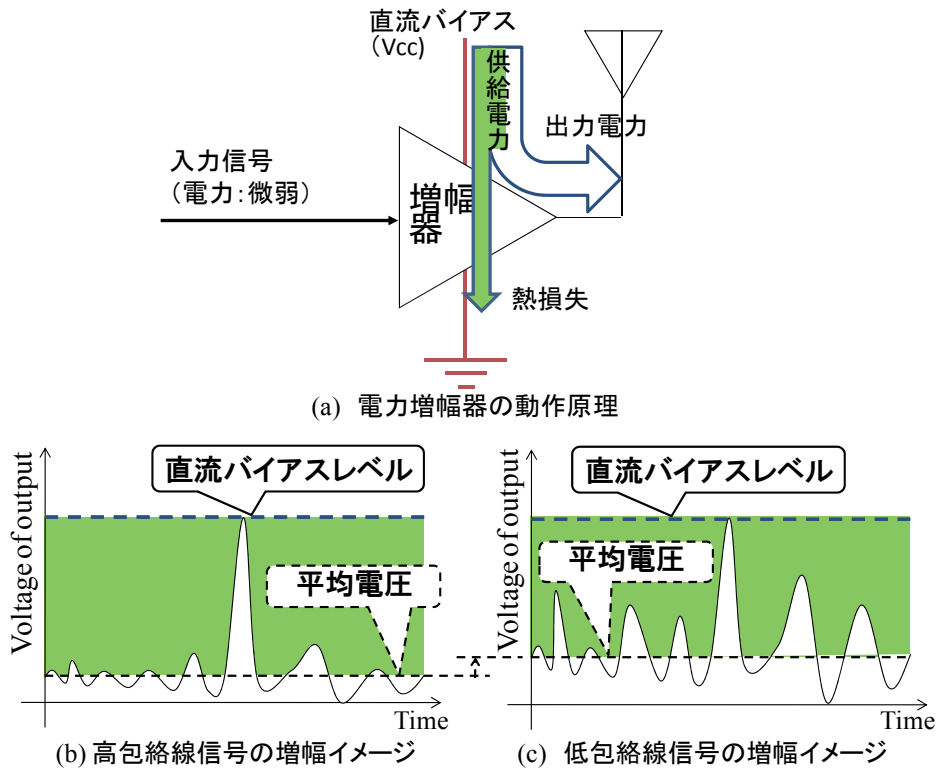


図5 電力増幅器の動作原理  
(低包絡線により熱損失を削減し高い電力を出力可能)

報を、制御信号に乗せて、基地局へとフィードバックする方法がとられている。ここで、品質情報による伝送容量低下を回避するため、各端末が自己判定的に品質を評価し、低品質状態の帯域の品質情報は通知を控える方法が提案されている[5]。この手法を用いることで、帯域割り当てが期待されないチャネルへの不要な通信路状態情報の通知が避けられる。しかし、本手法を我々が推奨するサブキャリア割り当てに適用すると、準高品質であった端末が低品質と判断し、通信路状態の通知をやめてしまう可能性がある。この通信路状態情報削減法の適用時における影響を計算機シミュレーションによる評価を進めた。その結果、予見通り、削減量の拡大に伴い、準高品質な利用者からの通信路状態情報が得られなくなった結果、品質劣化が提案するサブキャリア割り当て適用以前に比べて劣化が激しいことが明らかとなった。ただし、同時アクセスを試みる端末の数が増えると、1 端末当たりの削減量が大きくなって、いずれかの利用者からの情報が通知されるようになるため、伝送効率の低下が緩慢になることも明らかとなった。それゆえ、通信路情報が限定的である環境においては、基地局が収容する端末を多く増やすことによって、情報削減手法による影響を軽減することができる。これまでに、本手法の特徴として、利用者の数が増えたとき、最高品質を与える利用者や準高品質を与える利用者との品質差が小さくなることを既に明らかにしていた。よって、収容ユーザ数をより多くすることは、情報削減手法からの影響回避と品質低下を最小に抑える2つの効果が得られるという利点があることを明らかにしたといえる。

## 2.2 課題2. 電力増幅器における直流電源と送信電力の関係性について（新規設定）

基礎検討を踏まえて、セルラー環境での評価に移る際に、新たな課題が発生した。注目した点は、電力増幅器の動作原理である。原理を模式した図面を図5に示す[6]。これは、本研究では、消費電力一定条件下においては、供給されるバイアス電圧が一定条件と言い換えることができる。そのとき、提案法により低包絡線化を実現し、電力増幅器の高効率化に伴い、送信電力拡大効果を引き出すことが可能になる。その結果、セルラー環境を想定した場合、図6のような循環サイクルを構築することができる。このように、提案法では、低包絡線の実現のため品質低下を犠牲としていたが、セルラー環境では、低包絡線による電力増幅器の効率化に伴い大出力化を実現し、カバレッジ拡大効果が期待できる。その結果、収容ユーザ数が拡大することとともない、よりよい品質のサブキャリアを割り当てることができ、高品質化を図れる。この効果をユーザダイバーシチ効果と呼ぶ[7]。この効果によって、品質改善が期待できるため、許容される品質劣化に対して、余裕をもたらすことができる。その結果、さらに提案法によるサブキャリア割り当てによって、低包絡



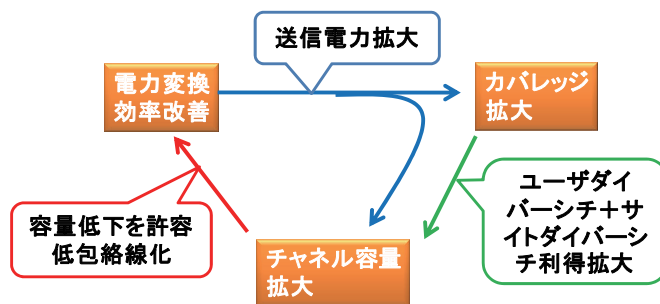
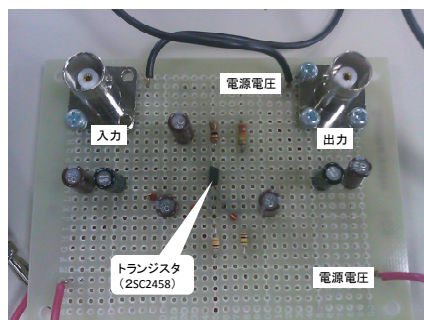
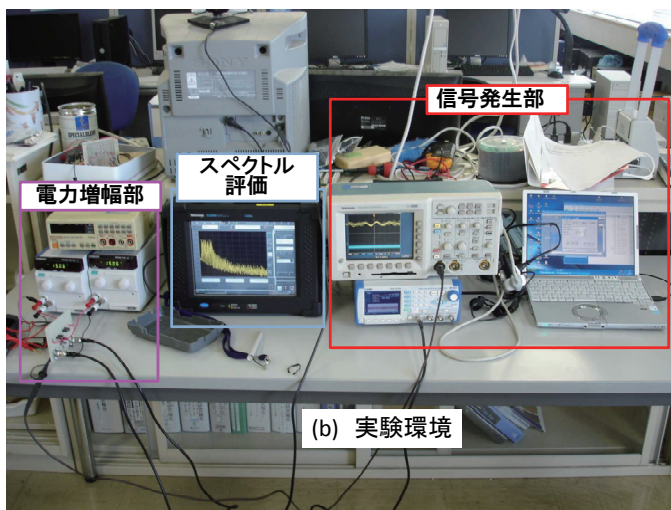


図6 提案法による電力・通信品質(伝送容量) 循環サイクル構想



(a) 試作した電力増幅器



(b) 実験環境

図7 実機による測定実験環境

線化を高めることで、送信電力を高めることができる。最終的には、消費電力一定条件での最適なサブキャリア割り当てが存在することが予見されるため、その導出が必須課題となっていた。

しかし、評価を進めるに当たり、実際に低包絡線化に伴う大出力化がどこまで図れるかについては定量的に明らかになっていなかった。そこで、本課題では、実機による測定実験を新たに開始することとなった。図7に実験環境を示す。実験環境では、大きく3つの構成部からなり、信号生成部、電力増幅部、そして出力電力のスペクトル評価の部分である。まず、信号生成部では、任意信号発生器により OFDM 変調信号を生成した。しかし、本実験で用いた信号発生器 (NF 社製 WF1974) の帯域が狭いため、サブキャリア割り当てによる低包絡線化処理を適用することが困難であった。そこで、別手法としてクリッピング and フィルタリング (CF) を適用による代替処理とした。電力増幅部では、電力増幅器はバラックから試作し、A 級増幅動作を確認した。回路では、周波数帯域を高く確保するため、帰還回路をつけている。その結果、増幅利得は 8 倍程度と低く抑えている。また、増幅器の基礎評価として、入出力特性を評価したところ、飽和電圧レベルに遷移するまでの線形領域は比較的広いことを確認している。増幅された信号は、スペクトル評価部において、周波数領域のスペクトル解析を実施した。評価部では、スペクトルアナライザ (テクトロニクス社製 SA2600) により、占有可能帯域の 2 倍から 4 倍以上の広帯域の成分を検出することで、非線形に伴う、帯域外へのスプリアス放射の観測を行った。

実験課程としては、増幅器に入力される信号の電力を、信号発生器内のプリアンプで電力を拡大した。これにより、ある一定以上の電力が入力されると、電力増幅器の飽和電力を超えるため、非線形増幅に伴う、スプリアス放射が観測される。観測例を図8に示す。このスプリアス放射量の発生は、隣接する他のシステムに対して深刻な干渉を与えることになるため、法規で極めて厳密に抑えることが定められている。スプリアス放射の発生量に所要値を設定することで、所要値以下となる送信電力の最大値を明確にした。図9に、入力信号電力に対する隣接及び次隣接帯域における所望電力対非所望電力の比率(DUR)を評価した。ここで、隣接帯域及び次隣接帯域とは、図8に示すように所要帯域を設定した時、帯域と同じ幅で所要帯域の隣から測定した範囲を隣接帯域、さらにその隣の範囲を次隣接帯域と設定した。次隣接帯域の方が、より多くのシステムに対して影響を及ぼす可能性があるため、スプリアス放射の許容出力値はより低く抑えるように定められている。図より、低包絡線処理を適用した(w/ CF)が一定の DUR の条件で、より高い電力まで送信電力を

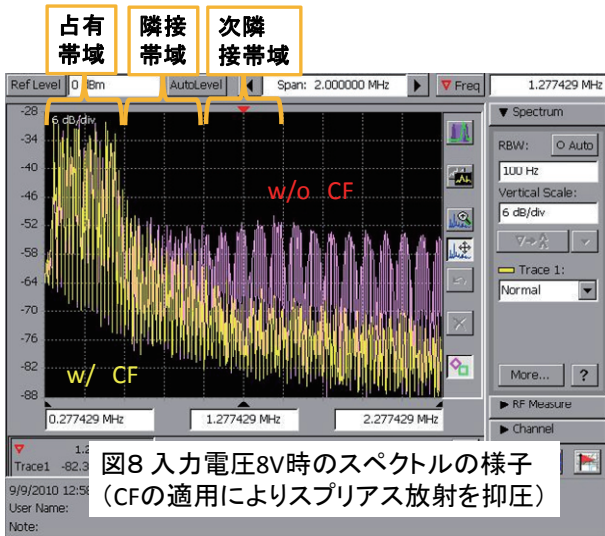


図8 入力電圧8V時のスペクトルの様子 (CFの適用によりスプリアス放射を抑制)

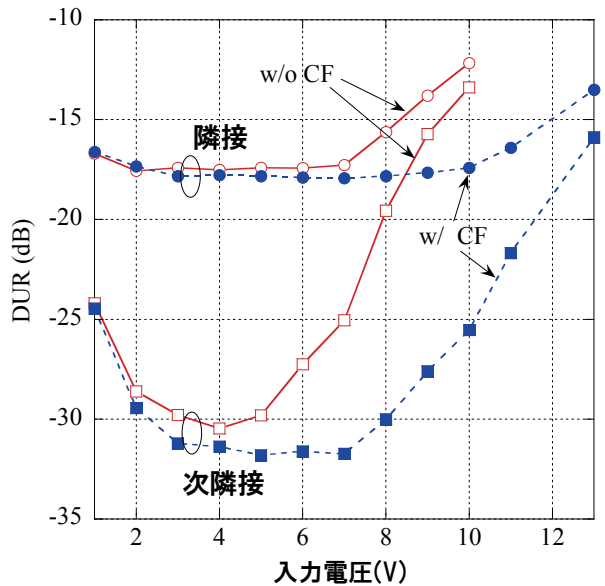


図9 入力電圧に対する所望電力に対する非所望電力比(DUR) (CFによる低包絡線によって、高い入力電圧で低DURを実現)

拡大する効果が確認することができる。本評価結果より、仮定であった、高効率化による送信電力拡大効果について実機を通して明らかにした。特に、定量的にその関係を明らかにすることができたことによって、課題3以降において、本関係をシミュレーション評価に適用することが可能になった。

### 2.3 課題3. 単一セル環境を想定した消費電力一定条件における伝送容量評価 (既設定)

課題2を通して、低包絡線化による送信電力拡大効果があることが認められた。課題2の定量的な結果を活用し、単一セル環境での伝送速度評価を実施した。評価モデルとして図10に示す。基地局は、複数の端末をサポートする環境を想定し、今回は基地局から移動局への下り回線環境を想定している。基地局は、各移動局から通知された通信路状態を示す値 (CSI) を得る。そして、受信品質に基づく利用者ランキングをサブキャリア割り当ての最小単位であるリソースブロック (RB) 別にランキングを作成する。ここで、ランキング形成において、考慮した点として、セル環境では、基地局近傍の利用者は、サポート範囲 (セル範囲) の境界付近にいる利用者比べて、伝搬距離が短く、高い受信電力を得やすい。そのため、高品質基準によって、サブキャリアを割り当てた場合、基地局近傍の利用者が、サブキャリアを独占してしまい、不公平性が生じる。そこで、不公平性を緩和するために、ランキングする際の基準を、品質の絶対量ではなく、その

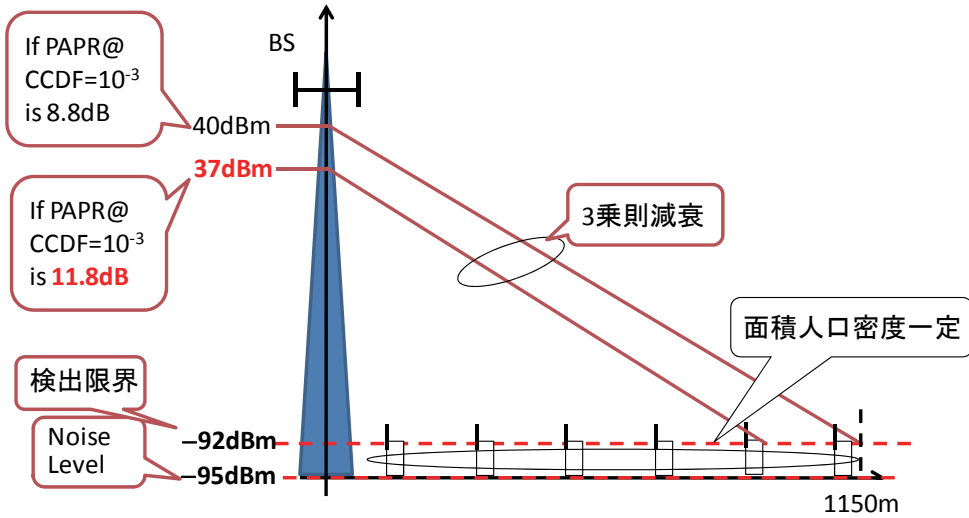


図10 シングルセル環境における基地局と移動局の関係

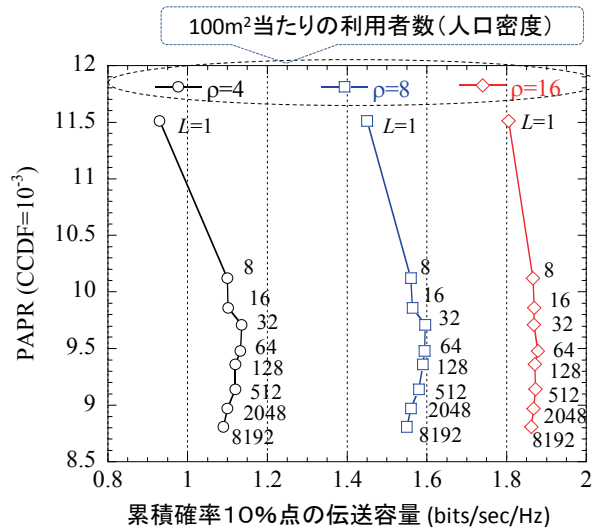


図11 通信路容量に対する包絡線変動の様子を示す値PAPR値特性  
(低包絡線化(低PAPR)による送信電力拡大を考慮)

品質を得る際の確率的な値を基準とする手法がとられている．これをプロポーションナル・フェアネス (PF) 規範と呼ぶ[2]．無線通信におけるPF規範では，伝送路の品質が確率的なモデルとして与えられることに着目され，伝送路品質の瞬時的な値を平均値で規格化した値を規範値として用いられている．これにより，平均値に比較した瞬時的な品質が高くなる条件は，端末の位置によらずほぼ一定条件とみなすことができるため，端末へのサブキャリア割り当ての公平性を保つことができる．ただし，瞬時的に高品質な利用者に対して，サブキャリアを割り当てることになるため，これまでの検討と同様に品質的に有利な利用者にサブキャリアをわりあてることの効能は失われない．

計算機シミュレーションに評価結果を図11に示す．図11では，図4と同様に，単位周波数当たりの伝送速度である伝送容量に対して，包絡線変動の大きさを示すPAPRを評価した．また， $L$ は，リソースを割り当てる際に，低包絡線化への優先度を示してしており， $L=1$ は，包絡線への考慮無しで規範値の最高順位の利用者に割り当てた従来法といえる．本評価では，課題2の定量的な結果を考慮し，包絡線の評価値であるPAPRの低減量と等しい値だけ送信電力が拡大できる関係を用いている．図より，低包絡線化をより優先させたとき，伝送容量が最大となる最適な割合係数が存在することが分かる．これは，包絡線変動を考慮しないとき，包絡線変動が大きいため，送信電力が制限され，セル範囲が狭くなり，サポートできる利用者数が少なく限定されてしまう．その結果，サブキャリア割り当て可能な利用者が減ってしまい，通信路状態のより良好な利用者への割り当てが困難になる．加えて，送信電力が小さくなると，受信電力が低くなるため，伝送速度が低下することになる．一方，低包絡線化により重きを置きすぎると，低順位の利用者に対してサブキャリアを割り当てることになり低品質化を引き起こしてしまう．カバレッジ拡大によりサポートできる利用者の数を確保しつつ，提案法の低包絡線化手法による品質劣化を考慮した最適な割り当てが存在することがわかった．

また，本評価では，利用者の人口密度を変えた場合も検討している．人口密度が大きくなるとき，より包絡線変動の低下を優先させたときが，高い伝送容量を達成していることが分かる．これは，人口密度の拡大に伴い，低包絡線化により送信電力拡大が拡大し，カバレッジを拡大したときのサポートできる利用者が急増することで，より，品質の良い利用者へサブキャリアの割り当てが可能になるユーザダイバーシチ効果が高まり，より多くの伝送容量が期待できる．人口密度が高いときは，ユーザダイバーシチ効果をわずかな送信電力の拡大で高めることができるため，低ランクの利用者への割り当てに伴う品質劣化を凌駕する，ユーザダイバーシチによる高品質化が期待できると考えられる．以上の評価結果から，単一セル環境での最適なサブキャリア割り当てルールが存在を明らかにすることができた．

### 3. まとめ

本研究課題では，次世代の高速大容量通信の実現に向けて，消費電力を一定条件においたときに最大の伝送容量を達成するための送信方法についての検討を進めた．まず，基礎検討として，電力増幅器の消費電

力を低く抑えるため、低包絡線手法を提案した。その際、提案法では、従来の手法に比べて、非線形歪が発生しない等の利点がある一方で、最高品質に準ずる品質の利用者に対して、周波数帯域を割り当てるため、品質劣化が生じることが問題視されていた。そこで、電力増幅器の線形性が高くなっていることに着目して、必要包絡線基準を緩和する方法を提案し、品質劣化を低く抑えることに成功した。

さらに、移動局からの通信路品質情報の通知が制限された場合の影響について評価した。

次に、電力増幅器と包絡線の関係性を明らかにするために実機を用いた評価実験を実施した。実験結果から、包絡線を低く抑えることで、より高い電力を出力できる関係を明確にした。

低包絡線と出力電力の関係結果を用いて、単一セル環境における通信路容量の評価を実行したところ、提案する低包絡線化手法を適切に設計することによって、最大の伝送容量が達成できることを明らかにした。

以上が助成期間中の成果である。本研究成果は極めて高い評価を受けており、対外発表において多くの質問が寄せられた。電子情報通信学会において、移動無線通信の選りすぐりの研究が集まる無線通信システム研究会 (RCS) において、本研究成果が高く評価され、2011年5月に活動奨励賞を受賞した。今後海外に向けて広く発信を進める予定である。

## 4. 本研究の今後の課題と発展性について

次に、現在の進行状況と今後の課題について報告する。

### 4.1 課題4. マルチセル環境を想定した消費電力一定条件における伝送容量評価（既設定）

我々が推奨するサブキャリア割り当て法を、マルチセル環境において展開を進めている。特にマルチセル環境での評価で重要なことは、基地局間連携送信技術への拡張である。基地局間連携送信法とは、これまでの単一の基地局による利用者のサポートとは異なり、複数の基地局が同時に利用者をサポートすることによって、伝送容量を拡大する手法である。この基地局間連携送信技術では、基地局がサポートする範囲であるセル半径を相互に拡大して、セルをオーバーラップさせることにより、利用者が複数の基地局に対してアクセス可能な状態にする必要がある。このセルのオーバーラップをさせるためには、基地局が送信電力を大きくしなければならないが、その送信電力の拡大法に、我々が推奨するサブキャリア割り当てを活用することができる。単一セルと同一の議論になるが、我々が推奨するサブキャリア割り当てでは、準高品質の利用者に割り当てを許容する代わりに低包絡線化を実現する。ただし、低包絡線化によって送信電力の拡大が可能になる。ここで、基地局連携では、この送信電力の拡大に伴い、セルのオーバーラップ範囲を拡大することができ、より多くの利用者が、複数の基地局へとアクセスが可能になる。これは、単一セルのときのユーザダイバーシチ効果に加えて、複数基地局へとアクセスできることになり、基地局選択という次元を広げることができる。この次元拡大効果を、サイトダイバーシチ効果と呼ぶ。よって、サイトダイバーシチ効果を併用することによって、更なる大容量化を実現することができるため、早急にシミュレーション評価を進める必要がある。

現状は、基地局連携送信には、通常の OFDM 送信に加えて、MIMO 技術の一種であるプレコーディング処理技術が必要であり、処理技術の適用を進めている。

### 4.2 研究を通して新たに明らかになった課題

以上の課題を進めた結果、新たに2つの研究課題が明らかになった。新たな課題の発見も本研究成果の一つとして考えられるため紹介する。

## 1. 理論検討の必要性

本研究が推進するサブキャリア割り当て法の欠点の一つとして、低包絡線である信号電力を決定する際に、多数ある候補すべてに対して OFDM 変調を適用し、包絡線の評価係数である PAPR を評価して、最小となる候補を選択している。この際、候補数をより大きくすることで包絡線を低く抑えられるものの、計算量が指数関数的に増大するため、計算量に対する要求条件が比較的低い基地局においても、許容できない範囲に拡大している。そこで、低包絡線となる適切なサブキャリア割り当て決定するための、低複雑な手法が必要になる。そこで、現在、本研究が推進しているサブキャリア割り当て法に対して、数式を用いた理論解析による展開法を検討している。理論解析では、包絡線の規範値である PAPR 及び単位周波数当たりの伝送容量である通信容量を理論的に数式で表現し、さらに、課題2で明らかにした、包絡線と送信電力量の関係から、PAPR と伝送容量をまとめた、伝送容量値の導出を目指している。すでに、提案法では、包絡線変動を優先する係数  $L$  に対して、伝送容量が凸特性を有することは明らかになっている。そこで、伝送容量値を利用することで、本手法は凸最適化問題へと帰着化することで、最適な容量を与える  $L$  を理論解析により明示するこ



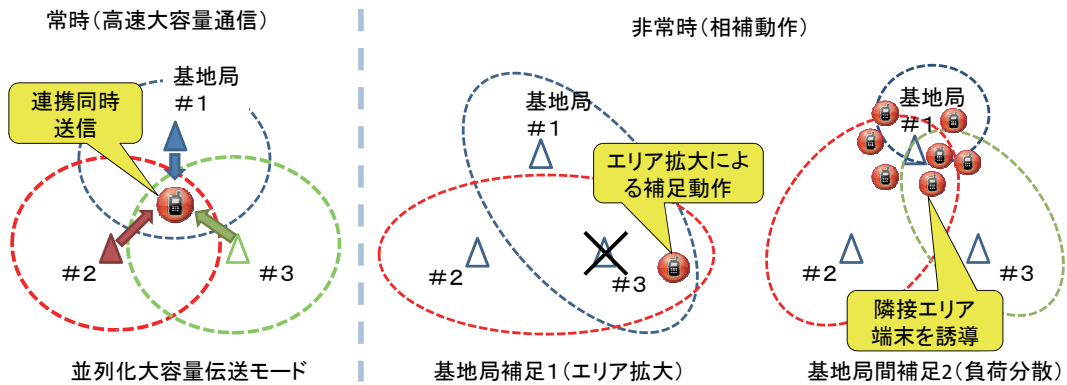


図12 基地局連携動作における、高速大容量通信及び相補動作のイメージ  
(基地局の柔軟なカバーエリア制御(送信電力制御)が必須技術)

とが可能になる。このように最適化問題として明示することによって、提案法における計算量を削減することと同時に、理論的な妥当性を明示することが可能になり、学術的な成果としても重要度を高めることができる。

## 2. 災害時における安定的な通信接続性を実現する基地局連携化技術

本年3月に発生した、東日本大地震の際に、携帯電話は非常用の通信機として、活用されるシーンが多くあった。しかし、深刻な被害の発生した震源地周辺の地域では、基地局の倒壊等により、携帯電話は不通となる状況が多く生じた。加えて、震源地からは比較的遠くに離れていた都心においても、通信接続の急増の観点から、通信サービスを提供する移動通信キャリアが自主的に通話を規制したため、通話が不通となる状況も確認された。以上のように、携帯電話は地震などの震災が発生した時には、通信接続を維持することは困難であることが明らかとなった。これに対して、本研究課題で進めた基地局連携化技術が、極めて効果的な対策であると考えられる。具体例を図12に示す。図12は、常時接続状態と、非常事態に伴い基地局が停止した場合や、特定基地局に呼が集中した場合を示している。常時接続時には、これまで検討した通り、相互の基地局が連携することによって、特定の利用者の基地局選択の幅を拡大して、サイトダイバーシチ効果によって高い伝送速度が期待できる。一方、震災により、基地局が停止した場合には、生き残った残りの基地局が、送信電力を拡大するように動作することによって、通信不通状態であるエリアを補完する動作が可能になる。さらに、特定基地局に呼が集中した場合にも、他の基地局がカバーエリアを拡大することで、呼を周辺基地局に分散化することができる。以上のように、複数の基地局が連携することで、非常事態においても柔軟に対応することができる。一方、通常時には、高速大容量無線通信を提供するような動作をすることができる。この後者のメリットは、移動無線通信産業の発展を促す起爆剤としての役割を担うこととなるため、経済効果を相まって、広く普及できるという利点があることに注目したい。この利点は、これまでに災害時における緊急用無線技術の検討がなされてきたのに対して、今回の震災で活用できなかった欠点の一つとして、震災発生時まで広く普及できなかったという点があげられる。現在は、震災直後で非常時対策が重要視されているが、長期的に考えると、非常時の対策だけに多くの予算を費やすことができない。そのため、通常時と非常時を同時にサポートする本技術の注目度がこれまで以上に高まってきていると考えられる。

この技術課題として、送信電力の変動幅をより大きくすることが必要不可欠となる。特に、今回の震災のように広域にわたって被災した場合には、生き残った基地局がカバーすべき範囲は極めて広範囲となるため、送信電力の拡大量をより大きくできる技術が必要になる。その拡大量を大きくするために貢献できる技術として、本研究が推奨しているサブキャリア割り当て法の適用が期待される。具体的には、本手法によって、包絡線変動をより低く抑えるようにすることによって、送信電力拡大を図り、より広域なカバーエリアをサポートする。しかし、課題として、包絡線を低く抑えるためには、候補数が膨大になる恐れがあるため、1の理論解析による展開が必須となる。加えて、包絡線を低く抑えるため他の手法との併用や包絡線をより効果的に低く抑えるサブキャリア割り当て法の開拓など課題が多い。また、送信電力拡大効果は、電力増幅器の構成にも依存すると考えられるため、実機での評価は必要不可欠である。一方で、セルカバレッジの異なる環境における特性評価など、様々なセル環境を想定した、送信方法について検討を拡張することも可能である。

## 5. 本研究調査のまとめ

我々が提唱するサブキャリア割り当て法は、本研究調査を通して高速大容量化、消費電力削減に加えて、非常時における通信接続性を高めるためなど各種目的において広く適用できる可能性を広げることができた。今後実用化に向けて広く応用されることが期待される技術であると考えられる。

### 【参考文献】

- [1] 守倉, 久保田, 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス R&D, 2008 年 4 月
- [2] 服部, 藤岡, ワイヤレス・ブロードバンド HSPA+/LTE/SAE 教科書, インプレス R&D, 2010 年 2 月
- [3] 松本, 落合, OFDM 変調方式の応用, トリケップス, 2001 年 10 月
- [4] 田久 修, 榎田洋太郎, ``ブロック伝送型マルチユーザ OFDM におけるピーク電力と通信路容量のトレードオフを実現する副搬送波リソース割り当て,`` 電子情報通信学会 無線通信システム研究会 (RCS), RCS2009-89, pp. 67--72, 2009 年 8 月
- [5] Jing Wang, Yan Wang, Xiqi Gao and Xiaohu You, "Average-SNR-Optimized User Selection Algorithm in MIMO BC Systems," IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 2101-2105, May 2008.
- [6] 鈴木, トランジスタ回路の設計, CQ 出版, 2009 年 8 月
- [7] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, ``Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation`` IEEE J. Selected Areas in Commun. vol. 17, no. 10, pp. 1747 -- 1758, Oct. 1999

### 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Phase Rotation for Constructing Uniform Frequency Spectrum in IFDMA Communication	電子情報通信学会 英文論文誌 B	2010 年 12 月
Frequency Rotation for Suppressing Multipath Interference and Achieving Large Frequency Diversity in Uplink IFDMA,	電子情報通信学会 英文論文誌 B	2010 年 5 月
Subcarrier Assignment for Achieving Tradeoff between Peak Power and Channel Capacity in Block Transmission of Multiuser OFDM	アメリカ電気学会 (IEEE) 国際会議 ICCS 2010	2010 年 11 月
PAPR を考慮した副搬送波割り当て法におけるシングルセル環境での評価	電子情報通信学会 無線通信システム研究会 (RCS)	2011 年 3 月
OFDM ブロック伝送における CSI 情報量を制限したときのピーク電力低減を考慮した副搬送波リソース割り当て法の検討	電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2010 年 9 月
ブロック伝送型マルチユーザ OFDM におけるピーク電力とチャネル容量のトレードオフを実現する副搬送波割り当て法の解析	電子情報通信学会 無線通信システム研究会 (RCS)	2010 年 6 月
研究活動奨励賞	電子情報通信学会 無線通信システム研究会 (RCS)	2011 年 5 月