

機関番号：18001

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010年度

課題番号：21760292

研究課題名（和文）

マルチチャネル中継システムの厳密なチャネルキャパシティ導出

研究課題名（英文）

Deriving accurate channel capacity of multi-channel relay systems

研究代表者

齋藤 将人 (SAITO MASATO)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：30335476

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数のチャネルを用いて情報伝送を行う無線通信方式において、従来の通信システムよりも信号到達距離を増大可能な中継技術を用いた場合に、各チャネルに最適な電力を割り当てることにより最大伝送可能な通信容量を求めることを目的とする。中継技術として、単純な信号増幅を行う方法、通信路品質に従いチャネルを切り替える方法、複数のチャネルを束ねて切り替える方法について電力割当手法の提案と通信容量が得られた。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to clarify the channel capacity of multi-channel wireless communication systems which use relay techniques to expand the reachable area from a sender. Toward the objective, we consider optimal power allocation to each channel of the multi-channel system. As the relay techniques, we propose a simple amplify-and-forward relay, a channel switching method according to the quality of each channel state, and a switching method of chunk of channels based on the channel state information. As the result, we proposed corresponding optimal power allocation methods to each relay technique and derived channel capacities.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：直交周波数分割多重方式，電力割当，周波数選択性フェージング，最適化，中継方式，非再生中継

1. 研究開始当初の背景

移動通信に有用な技術として中継技術・マルチホップ通信が着目されており、WiMAX, 3G LTE (Long Term Evolution), IMT-Advanced 等の標準化作業においても導入が検討されている。これは、周波数資源の逼迫という問題から従来よりも高い周波数帯（数 GHz～数十 GHz）を利用する必要があるものの、当該周波数は伝搬による電力減衰量が大きく、また、信号の直進性が高いため反射・回折による受信電力増も期待できない

ことから中継局を介することにより受信電力を高められるからである。一方、移動通信において伝送レートの向上や高品質な通信を行うためには、通信路で発生するフェージングに耐性がある OFDM（直交周波数分割; Orthogonal Frequency Division Multiplexing）方式が適している。これらの要請により、OFDM 中継システムの通信性能を極限まで高めることが期待されており、その指標となるチャネルキャパシティの導出は学術的にも実用に向けても重要である。

しかし、これまで OFDM 中継システムのチャネルキャパシティを数学的に厳密に求めた報告はなされていない。例えば、Laneman らは、送信・中継局による協調通信のサブセットとして、中継システムのチャネルキャパシティ導出を検討している。Hammerstrom らは、MIMO (Multi-Input Multi-Output)-OFDM 中継システムに対して、チャネル状態 (Channel gain) に応じたサブキャリア割当 (Subcarrier Mapping) も含めた検討をしている。いずれも、各ホップにおけるチャネル状態に応じて送信・中継局への送信電力割当を最適化することによりチャネルキャパシティを得るというアプローチを取っている。

ところが、これらの研究では、最適化問題の目的関数に含まれる受信 SN 比を(問題を解き易くするため)近似していることから、得られた解は近似解にすぎずその妥当性は限定的と言える。

これに対して、研究代表者は上記の最適化問題を近似を用いず最適解が満足すべき必要条件 (KKT (Karush-Kahn-Tucker) 条件) を満たす全ての解を解析的に示した。更に、得られた解から伝送レートの最大化に寄与する有効な解のみを選択する手法を提案し、実用的な SN 比 (-10 dB~) において既存の手法よりも高い伝送レートを達成する電力割当方法を示した。この成果は国際会議 GLOBECOM'08 に採録された。

しかし、上記の検討を通して以下の問題点が明らかになった。

- KKT 条件を満足する全ての解を比較することで割当電力の最適解及びチャネルキャパシティが得られるが、実際に導出した研究はこれまでに無い。
- 解の総数が 3^n (n はサブキャリア数) に従うため、現実的なシステム (n =数十~数百) を評価するには(現状では)膨大な計算時間がかかる。
- 割当電力は連立二元三次方程式の解となり、数式として示すことは可能だが、数値計算を行う場合、単純に数値を代入するだけでは桁落ちなどの問題により信頼性の低い結果となる場合がある。
- 制約(例えば無線局毎に異なる電力制限)を加えると、解の探索が更に複雑になる。
- 中継局においてサブキャリアマッピングを行うことにより伝送レートが向上することは知られているが、その最適マッピング手法を厳密に証明した研究は無い。また、電力割当方式との統合最適化問題に対する解も知られていない。

関連する研究として、国外では、米国・欧州の研究者を始めシンガポール、カナダ等でも OFDM 中継システムのキャパシティ導出に関連する研究が行われているが、国内の研

究者が著名な学術雑誌や国際会議で研究発表を行った事例は見られない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マルチチャネル伝送(直交周波数分割多重 (OFDM) 方式など)及び中継技術を用いる無線通信ネットワークにおいて、無線局が周囲の無線局との通信環境を認識し、状況に応じた伝送効率の最大化を達成する無線中継システムの構築にある。この大きな目的を達成するために、これまで厳密な通信路容量が得られていなかったマルチチャネル中継システムにおいて、理論的に達成可能な通信路容量の上限値を得ることが1つの目的となる。これは、同システムの性能評価においてそのシステムがどの程度優れているのか、理論的な上限と定量的に比較することが可能ならしめるという点で重要である。

また、上記理論的な厳密性に関する重要性に加え、実用的な制約を取り入れたマルチチャネル中継システムの伝送効率最大化を実現する手法の提案と、それにより得られる通信路容量を定量的に評価を行うことも目的としている。制約として次に挙げるものを考慮する。(1) 送信局と中継局で個別の電力制約を持つ(理想的には、送信局と中継局への割当電力の和を制約とすることにより伝送レートの最大化が果たされる)。(2) 複数のチャネルを束ねた"チャック"単位で制御を行う。(3) 中継局における電力割当手法においてFFT(高速フーリエ変換)を用いない。理想的には、FFTを用いてサブチャネル毎に電力を割り当てることが性能を最大化できる。しかし、FFT及びその逆変換を用いることによりOFDMシンボル単位の遅延が発生し、現実にはスループットの大幅な低下が起こる。

3. 研究の方法

特性解析を行うマルチチャネル中継システムのモデルとして、中継システムの最も基本的な形である、(送信・中継・宛先局から構成される)2ホップ中継システムに通信方式として全ての局がOFDM方式を採用したモデル(図1)に基づいて検討した。

計算機シミュレーションにおいては、チャネル利得(図1中Channel Gain)及び雑音を乱数を用いて発生させた。得られたチャネル係数から、解析的に導出した電力割当アル

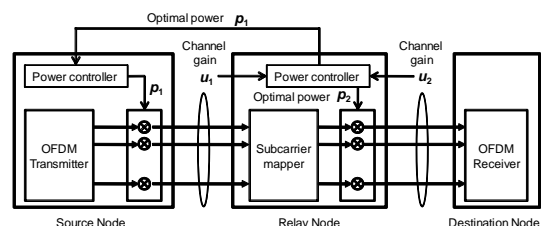


図1 デュアルホップ OFDM 中継システム

ゴリズム (図 1 中 Power controller 内部の計算) に従って数値計算を行い, 割当電力 (図 1 中 p_1 及び p_2) を求めた. 割当電力を通信路容量の解析式に代入し, システム全体の容量を求めた.

4. 研究成果

(1) OFDM を用いた 2 ホップ非再生中継システムにおいて, 複数のサブキャリアを束ねたチャンク単位の電力割当および SCM (サブキャリアマッピング) 手法を提案した. 達成可能な伝送レートを導出するために, チャンク単位の電力割当と SCM の最適化問題を設定し, その解の導出について検討した. チャンク概念図を図 2 に示す. 図において, 横軸は周波数を表す. サブキャリア全体を幾つかのチャンクに分割する. 数値例により, サブキャリア数を 64 本としたときの提案方式の最大伝送レートを示した. チャンル係数が互いに独立した確率過程に基づく場合, その伝送レートはサブキャリア毎の電力割当および SCM を行う従来手法よりも大幅に低い値を示した. しかし, チャンル相関が十分高いときは伝送レートは大幅に向上しており, チャンル相関値に応じて適切にチャンクサイズを決定することで, 従来手法と同程度の伝送レートを達成することが可能であることが分かった. これらの結果から, 提案方式は必要となる通信路情報を従来方式に比べ大幅に低減しながら, 従来方式と同程度の伝送レートを達成できる有効なシステムであるといえる.

(2) 非再生 OFDM 中継システムにおいて, 必要となる副情報を削減可能なチャンク単位の電力割当法の検討及び達成可能な伝送レートについて評価を行った. 各チャンクサイズにおける隣接サブキャリア間の周波数相関値に対する伝送レートを評価した. チャンク毎のチャンネル利得を表す代表値の選定と伝送レートとの関係を明らかにした. チャンネル利得を表す代表値の選び方としてチャンク内チャンネル利得の平均値, 同最大値, 同最小値, 同中央値, と同中心値を用いた場合において, 相関値に対する伝送レートの計算機シミュレーションによる評価を行った.

サブキャリア数 256 本, SNR が 10 dB の場合に評価を行ったところ, 周波数相関値に応じて適切なチャンクサイズを設定することにより, チャンクを用いない従来方式(チャンクサイズが 1 の場合に相当) とほぼ同等の伝送レートを実現可能であるという結果が得られた. また, 様々なチャンネル利得の代表値の選択のうち, 平均値と中央値を用いた場合に, 他の代表値よりも高い伝送レートとなり, チャンルの周波数相関値が 1 に近い場合, 中心値により最も高い伝送レートが得られることが分かった. 以上より, 隣接サブキャリア

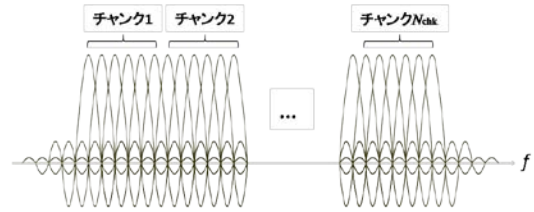


図 2 チャンク概念図

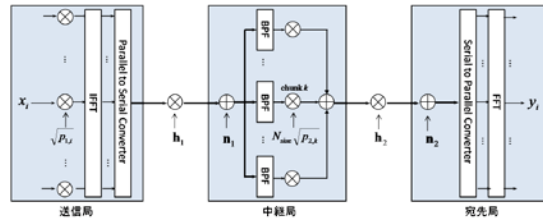


図 3 提案方式 A のシステムモデル

間の周波数相関値に応じて適切なチャンクサイズと, チャンル代表値を設定することにより, 提案方式は従来手法に比べ必要となる副情報を減らして, 同程度の伝送レートが得られることが明らかとなった.

(3) 中継局において FFT/IFFT を必要としない純粋な非再生 OFDM 中継システムを対象として, その伝送レート向上を目的とした電力割当手法について検討する. 提案手法では, 中継局において複数の隣接サブキャリアを帯域分割フィルタを用いてチャンクに分割し, チャンク内では一様電力割当を行うことにより, FFT が不要な低遅延の中継を行う. システムの伝送レートを最大化するために, 提案手法における割当電力の最適化問題を設定し, 解の導出を行う. 次に, 提案手法 A, B, C について説明する.

①提案手法 A (図 3) は, 送信局においてサブキャリア単位の適応電力割当を行い, 中継局においてチャンク単位の電力割当を行う. 送信局においてサブキャリア単位の電力制御を行うため, 伝送路状態に応じた電力割当が可能になり, チャンク単位制御と比較して高いレートを達成することが期待できる. 一方で, サブキャリア単位のチャンネル情報が必要となるため, 副情報の大きさという点で不利と言える.

②提案手法 B (図 4) は, 送信局と中継局の両方においてチャンク単位の電力割当を行う. 中継局においてチャンク単位の電力割当を行うために, BPF (Band-Pass Filter) を用いる. この手法では, 送信局でより柔軟な電力割当が可能な提案手法 A よりも伝送レートが低下すると予想される. 一方, 送信局もチャンク単位の制御を行うことで, 副情報の量を大幅に低減できるという利点がある. 手法 A では, 割当電力の計算に, ホップ 1 とホップ 2 の全サブキャリアに関するチャンネル利得が必要になる. 一方手法 B では, 各チャンクに 1 つのチャンネル利得情報だけが必要であ

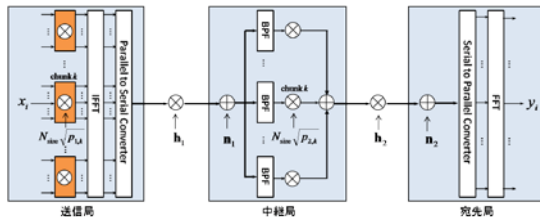


図 4 提案手法 B のシステムモデル

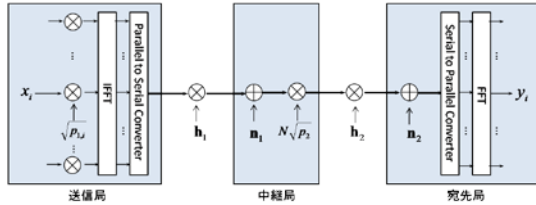


図 5 提案手法 C のシステムモデル

るので、その情報の量をチャンク数分の 1 に低減できる。チャンクサイズを大きくする程、副情報量を低減できるが、隣接チャンネル間の周波数相関が小さい場合、チャンク内におけるサブキャリアのチャンネル利得にばらつきが生じるための確な割当電力が得られず、伝送レートが劣化することが予想される。従って、チャンクサイズは、チャンネル（周波数特性、時間変動）や副情報の許容値に応じて適切な値が異なるため、特性評価に基づき決定する必要がある。

③提案手法 C（図 5）は、送信局ではサブキャリア単位の電力割当を行い、中継局では全サブキャリアに対して一様電力割当を行う。ただし、中継局では中継局の総電力の制御は可能であるとする。手法 C は中継局において、BPF も不要であるため、3つの手法の中で構成が最も簡易となるが、ホップ 2 におけるチャンネルの周波数特性が反映されないため、伝送レートは最も悪くなることが予想される。

①～③の提案手法を次の 4 種類の移動体通信シナリオに適用した場合において特性を評価した。

B1-NLOS:都市部マイクロセルのチャンネルモデル。固定または移動体の端末が周囲の建造物よりも低い位置にある屋外モデル。通信距離は 20 メートルから 400 メートル。

C1-NLOS:地方・郊外都市の屋外環境におけるマクロセルモデル。通信範囲は 35 メートルから 3,000 メートル。基地局は広い領域をカバーするために屋根よりも高い位置に配置されるモデル。

C2-NLOS:都市部のマクロセルを想定したシナリオで、基地局は建物より高く、移動体は道路のような低い位置にある。通信範囲は 35 メートルから 3,000 メートル。

D1-NLOS:100 平方キロメートルをカバーする田舎・田園地帯のマクロセル。その通信範囲は 35 メートルから 10,000 メートル。

チャンネルモデル B1-NLOS, C2-NLOS に

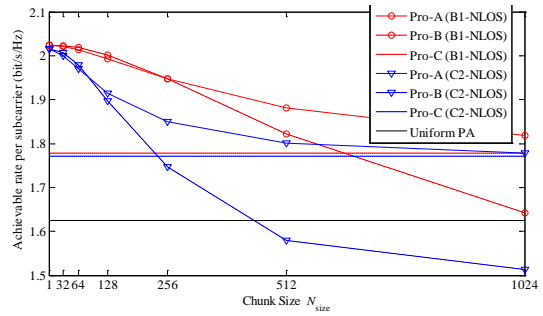


図 6 チャンネルモデル B1-NLOS, C2-NLOS における各提案手法の伝送レート

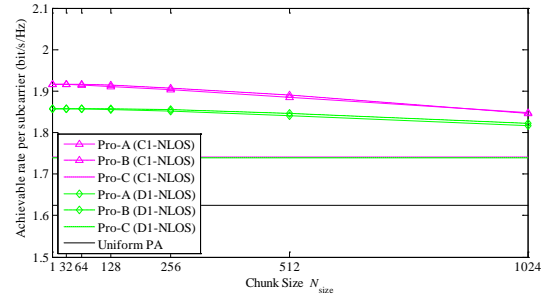


図 7 チャンネルモデル C1-NLOS, D1-NLOS における各提案手法の伝送レート

における各提案手法のチャンネルサイズに対する達成可能な伝送レートを図 6 に、C1-NLOS, D1-NLOS の特性を図 7 に示した。ここで、サブキャリア数は 4096 本とし、各リンクの平均 SNR は 5 dB としている。比較のため、送信局・中継局とも一様電力割当を行った場合の特性（Uniform PA）を示した。

図 6 から、B1-NLOS における手法 A と手法 B の伝送レートはチャンクサイズが 256 以下の時、ほぼ同程度の値になることが分かる。よりチャンクサイズが大きくなると、手法 B の伝送レートは手法 A と比較して減少し、1024 以上で手法 C よりも低い値となる。手法 A は送信局においてサブキャリア単位の電力制御を行うため、チャンクサイズが変化しても他の手法よりも特性劣化が小さい。一方、手法 C はチャンク単位の制御を行っていないため、チャンクサイズによらずレートは一定値となる。手法 B はチャンクサイズによって特性が大きく変動するが、チャンクサイズが 256 以下の時、他の手法よりも高いレートが得られる。また、チャンクサイズが 32 の時、サブキャリア単位の電力制御を行う場合（伝送レートの上限と言え）とほぼ等しいレートが得られ、このチャンネルモデルに最も適したチャンクサイズと言え。また、C2-NLOS における手法 A と手法 B により達成される伝送レートは、チャンクサイズの増加に伴い急激に減衰する。両手法による特性はチャンクサイズが 128 以下で同程度となる。一方、256 以上になると、手法 B の伝送レートは手法 A よりも大きく減少し、更に手法 C

を下回る以上の事から、都市部モデルのように、周波数変動が激しいチャネル環境においてはチャンクサイズを適切に設定する必要がある、B1-NLOS のような通信路環境において手法Bは手法Aと同程度かわずかに高い伝送レートが得られることが分かる。

一方、図7より、C1-NLOSとD1-NLOSにおける手法Aと手法Bの伝送レート特性は、チャンクサイズによらず常に同程度の値となることが分かる。これは、C1-NLOSとD1-NLOSとも周波数相関が高いチャネルモデルであるため、同一チャンク内のサブキャリア間では、そのチャネル利得がほぼ等しいためと推測される。

以上の観測から、手法Bはチャンクサイズを適切に選択することにより、3つの提案手法及び既存の手法の中で、最も高い伝送レートが得られ、副情報を低く抑えることが可能な、最も効果的な電力割当手法であると考えられる。また、実際のシステムでは、副情報（各リンクのチャネル利得）の量や精度、フィードバック周期等を考慮してパラメータ設定を行う必要があるが、チャンク単位の電力制御はこれらの要素を考慮した場合においても、サブキャリア単位の電力制御よりも有利であると言える。

(4) OFDMを用いた2ホップ中継システムにおいて、送信局と中継局でそれぞれ別の電力制約を持つ場合において各サブキャリアへの電力割当手法の提案及び達成可能な伝送レートの評価を行った。これまで送信局と中継局への割当電力の総和を制約とした電力割当手法についてはKKT条件を満足する手法が提案されていたが、局別に電力制約を持つ場合について、KKT条件を満足する割当電力導出手法を提案した。割当電力の最適解は、二元三次方程式の解となる。方程式と電力の条件を満足する解は、基本的にサブキャリア毎に2個ずつ存在するため、全ての解の組み合わせから、伝送レートが最大の組み合わせを求める必要がある。また、2局の電力制約に対してそれぞれ最適化するべきパラメータ（ラグランジュ乗数）が存在するため、2次元におけるパラメータ最適化を行う必要がある。これら、解の効率的な探索手法、2次元パラメータ最適化の効率化は、今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計9件)

(1) Masato Saito, Shuhei Haraguchi, and Minoru Okada, Non-regenerative OFDM Relay Systems with Chunk-Based Power Allocation, The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2010), Recife, Brazil, Oct. 13, 2010.

(2) 齋藤 将人, サブキャリアマッピングを用いた OFDM 中継システムのエルゴードキャパシティ導出に関する一検討, 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, vol.110, no.222, pp.75-80, 奈良市ならまちセンター, 2010年10月8日.

(3) Masato Saito, A Study on Achievable Rate of Dual-hop OFDM Relay Systems with Separate Power Constraint, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-5-10, p.95, 大阪府立大学, 2010年9月16日.

(4) 齋藤 将人, 木村 聡, 岡田 実, Deep Clipping and Filtering による OFDM 信号のピーク抑圧, 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, vol.110, no.144, pp.29-34, 東京都, 2010年7月23日.

(5) 齋藤 将人, 非再生中継 OFDM 方式の伝送レート最大化手法に関する研究, 第10回無線分散ネットワークワークショップ, 沖縄県男女共同参画センター, 2010年7月2日.

(6) 齋藤 将人, OFDM 方式を用いた非再生中継システムにおける電力割当手法の検討, 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, vol.110, no.72, pp.47-52, 沖縄県青年会館, 2010年6月11日.

(7) 原口 修平, 齋藤 将人, 岡田 実, チャンク単位の電力割当を用いた非再生 OFDM 中継システム, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.118, 新潟大学, 2009年9月18日.

(8) S. Haraguchi, M. Saito, C.R.N. Athaudage, and M. Okada, Achievable rate of dual-hop OFDM relay system with non-regenerative relay without FFT process, The 6th International Symposium on Wireless Communication Systems 2009 (ISWCS'09), Siena, Italy, Sep. 9, 2009.

(9) 原口 修平, 齋藤 将人, 岡田 実, 非再生 OFDM 中継システムにおける複数サブキャリアを束ねた電力割当およびサブキャリアマッピング手法の検討, 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, vol.104, no.144, pp.25-30, 静岡大学工学部, 2009年7月23日.

〔その他〕

(1) 学会発表(1)の成果が国際会議 WPMC 2010 の Best Paper Awards を受賞. 受賞を紹介するホームページの URL.

<http://iecom.dee.ufcg.edu.br/~wpmc2010/generalInfo/bestpaperAwards.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 将人 (SAITO MASATO)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：30335476