

マルチホップ無線ネットワークにおける チャンネル選択アルゴリズムに関する基礎検討

向井 務[†] 村田 英一^{††} 吉田 進^{††}

[†] 京都大学 工学部

^{††} 京都大学大学院 情報学研究科

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: {tmukai,murata,yoshida}@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 近年,ユニバーサルアドホックネットワークや,無線アドホックネットワークとして研究されているマルチホップ無線ネットワークはインフラを必要とせず自律的にネットワークを形成する技術である.マルチホップ無線ネットワークでは,送受信端末間の通信距離をセルラネットワークと比較して大幅に短くできるために,適切な中継端末とチャンネルを選択すればセルラネットワークよりも周波数利用効率が改善される可能性がある.本稿では多数の端末が存在する環境を仮定して,マルチホップ無線ネットワークとセルラネットワークとの周波数利用効率と送信電力の比較が行われている.その結果として,マルチホップネットワークはセルラネットワークより周波数利用効率と総送信電力において同等以上の特性を持つ可能性があることが計算機シミュレーションにより示されている.

キーワード マルチホップ無線ネットワーク,セルラネットワーク,周波数利用効率,総送信電力,ルート切断率

Study on Channel Selection Algorithm for Multi-hop Radio Networks

Tsutomu MUKAI[†], Hidekazu MURATA^{††}, and Susumu YOSHIDA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Kyoto University

^{††} Graduate School of Informatics, Kyoto University

Yoshida-hommachi, Sakyo-ku, 606-8501 JAPAN

E-mail: {tmukai,murata,yoshida}@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Multi-hop radio networks, such as the universal ad-hoc networks and the wireless ad-hoc networks, can form radio communication networks without any infrastructure. Since the transmission range of multi-hop radio networks is much shorter than that of cellular networks, spectrum efficiency can be improved if a proper channel selection algorithm is applied to multi-hop radio networks. In this paper, a cellular network and multi-hop radio networks are compared in terms of the spectrum efficiency and the power consumption for transmission on a urban area model with lots of terminals. From computer simulation results, it is revealed that multi-hop radio networks have potential advantage against cellular networks.

Key words Multi-hop radio networks, Cellular networks, Spectrum efficiency, Total transmission power, Route outage ratio

1. まえがき

近年、移動体通信の発展は著しく携帯電話やノートPC, PDA等のモバイル端末が急速に小型化, 高性能化している. それにともなって, 移動通信サービスの普及率は増大し, 携帯電話の加入者数は6000万人を越している.

その一方で, ユーザ数の増加による周波数帯の不足は深刻な問題である. マイクロ波からミリ波にいたる高周波数帯は直進性が高く減衰も大きい. そのため, セル半径を小さくする必要があり, 従来のセルラ方式ではサービスエリアの減少や, 端末の消費電力の増大を招く. このような伝搬環境で構築される無線ネットワークにおいては固定回線で結ばれた基地局を介した通信形態より, 近距離の端末同士で自律分散的に通信ネットワークを構築する通信形態が適すると思われる [1].

マルチホップ無線ネットワーク (以下マルチホップネットワークと呼ぶ) は端末同士が自律分散的に無線通信を行い, 情報を中継することによって通信を行う通信方式である [2]. この実現のためにルーティングアルゴリズム等が盛んに研究されている [3], [4]. マルチホップネットワークでは基地局による集中制御が行われず, 端末は自律的に通信経路およびチャネルを選択する必要がある. しかし端末間の通信距離は短いため, 適切なチャネルおよび中継端末を選択すれば高い周波数利用効率を実現することができる可能性がある. 本稿では, マルチホップネットワークについて, 近傍端末の位置情報と宛先端末の位置情報を既知とした場合において, 中継端末選択アルゴリズムとチャネル選択アルゴリズムの提案を行い, 周波数利用効率と総送信電力においてセルラネットワークとの比較を行っている.

2. システムモデル

正方形のエリアに端末を配置する. 端末は静止しているものとし, それぞれの端末は中継機能を持っているものとする. 図1のように発呼端末と宛先端末をランダムに決定し, 発呼端末から宛先端末へ情報を中継する. 中継において送信を行った端末を送信端末, 送信端末が情報を伝えようとした端末を受信端末と呼ぶ. 送信端末から受信端末への1つの通信路をリンクと呼びその長さをリンク長と呼ぶ. また発呼端末から宛先端末へ張った

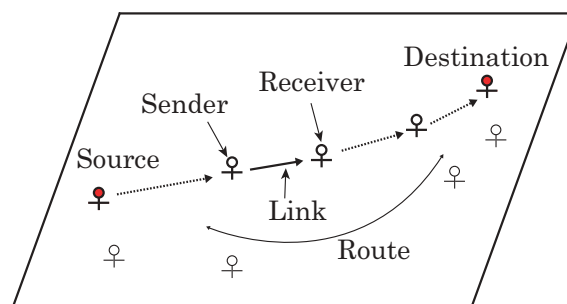


図1 マルチホップネットワークのシステムモデル

リンクの列をルートと呼ぶ. 本稿ではチャネル選択アルゴリズムの特性を評価するためチャネルは専有されるとした. また一度切断されたリンクの再構築も行わない. 干渉は同一チャネル間干渉のみを考慮し, フェージングやシャドウイング等の影響は考慮しない. また各端末の送信電力は等しく, 受信電力は距離の α 乗に反比例する. 受信端末における所望信号電力対干渉電力比 SIR が閾値を下回るとリンクが切断される. 以降この閾値を切断 SIR と呼ぶ. 各端末は宛先端末の位置と自身の近傍に存在する端末の位置情報のみを知っているものとする.

中継端末選択アルゴリズムと, チャネル選択アルゴリズムの詳細は以降に示す. なお, 本稿におけるチャネル選択アルゴリズムでは送信端末での SIR で選択を行う場合 (以降送信端チャネル選択と呼ぶ) と受信端末で選択を行う場合 (以降受信端チャネル選択と呼ぶ) の2つの場合を考えている.

2.1 中継端末選択アルゴリズム

中継端末選択アルゴリズムではリンク長がほぼ一定となるように中継端末を選択する. 近傍の端末までの距離を l , 宛先端末からの偏角を θ , 1ホップの推奨距離を L_{hop} とする. 図2のように送信端末から一定の同心円状の範囲を仮定し, これを推奨中継範囲 (図中 Recommended Hop Area) と呼ぶ. 推奨中継範囲の最小距離を H_{min} , 最大距離を H_{max} とすると, 推奨中継範囲は

$$H_{min} \leq x \leq H_{max} \quad (1)$$

となる, ただし送信端末からの距離を x とする. 推奨中継範囲にある端末で, 受信端チャネル判定の受信端末, もしくは送信端チャネル選択の送信端末での SIR が少なくとも γ_{check} を満たすチャネルが存在する端末の中で

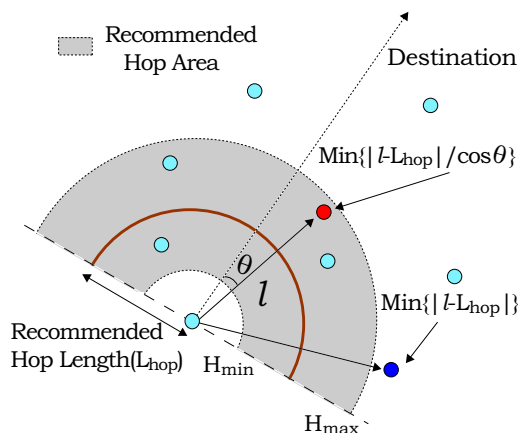


図 2 中継端末選択アルゴリズム

$$|l - L_{hop}| / \cos \theta \quad (2)$$

が最小の端末を中継端末として決定する．この範囲に端末が存在しない場合は，宛先端末への角度 θ は考慮せず，宛先端末へ近付く端末の中で

$$|l - L_{hop}| \quad (3)$$

が最小となる端末を中継端末と決定する．すべての端末の全チャンネルが， γ_{check} を満たさない場合は，切断 SIR を満たすチャンネルを持つ端末に対して，上記の端末選択アルゴリズムを適用する．また近傍の端末の位置情報を既知と仮定しているので，宛先端末までの距離が推奨中継範囲内であれば，直接宛先端末にホップする．

2.2 チャンネル選択アルゴリズム

チャンネル選択アルゴリズムは SIR を基準としてチャンネルを選択する．SIR が小さいチャンネルを選択した場合，トラフィックの増加によってリンクが切断され易くなる．一方 SIR が大きいチャンネルを選択した場合，周波数再利用距離が長くなり，チャンネル利用効率の低下を招くと考えられる．そこで SIR の閾値 γ_{ass} を導入し，図 3 のように SIR が γ_{ass} 以上でかつ SIR が最小のチャンネルを選択する．また全チャンネルが γ_{ass} を満たさなくなった場合図 4 のように最も SIR が大きいチャンネルを用いる．

3. 計算機シミュレーション諸元

シミュレーション諸元を表 1 に示す． 1km^2 四方に 20,000 台の端末が存在するとし，チャンネル数は 200，切断 SIR は 10 dB とする．

本稿では周波数利用効率を評価するために総ルート数に対するルート切断率特性および確立ルート

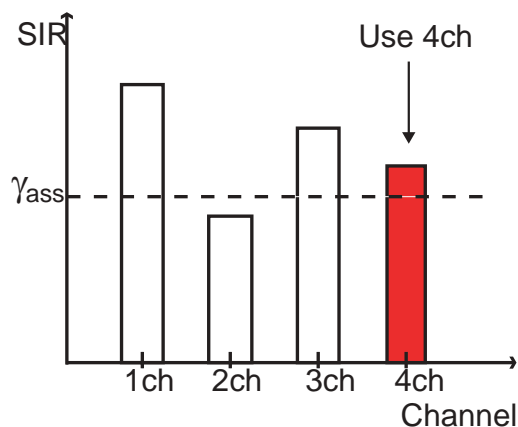


図 3 チャンネル選択において γ_{ass} を満たす端末が存在する場合

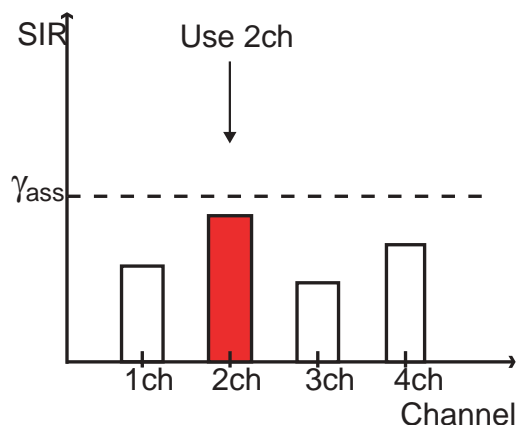


図 4 チャンネル選択において γ_{ass} を満たす端末が存在しない場合

数特性を用いる．総ルート数は端末が発呼した回数を表し，ルート切断率は発呼数に対するルート作成に失敗または，後に切断されたルート数の割合を表す．確立ルート数は，総ルートの中で切断されずに維持されているルートの数を示す．またマルチホップ無線ネットワークとセルラネットワークの減衰定数に対する平均送信電力比較を行う．平均送信電力とはマルチホップネットワークとセルラネットワークにおいて，同一の端末配置，発呼端末および宛先端末の条件下で通信を行った場合の 1 ルートの平均送信電力である．マルチホップ無線ネットワークにおける送信電力は，発信及び中継によるものを考え，セルラネットワークでは発信端末から最寄の基地局への送信のみを考える．また，マルチホップネットワークのすべての端末の送信電力は等しいとし，セルラネットワークでは各端末から基地局への送信電力を理想的にコントロールしているものとする．基地局と端末の受

表 1 計算機シミュレーション諸元

シミュレーションエリア		1000 m × 1000 m
端末数		20,000 台
チャンネル数		200
切断 SIR		10 dB
減衰定数		3, 3.5, 4
γ_{ass}		37 dB
L_{hop}		8 m, 12 m, 16 m
H_{max}		$L_{\text{hop}} \times 150\%$
H_{min}		$L_{\text{hop}} \times 50\%$
γ_{check}	受信端チャンネル選択	10 dB
	送信端チャンネル選択	13 dB

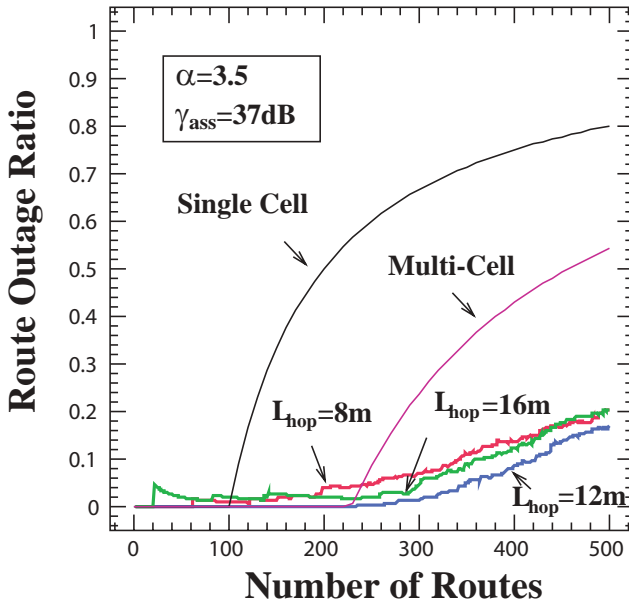


図 5 受信端チャンネル選択における総ルート数に対するルート切断率特性

信感度は等しいとした．基地局アンテナと端末アンテナの利得差は結果を評価する際に考慮する．

4. 計算機シミュレーション結果

図 5 に受信端チャンネル選択， $\alpha = 3.5$ ， $\gamma_{\text{ass}} = 37 \text{ dB}$ において L_{hop} を変化させた場合の，総ルート数に対するルート切断率特性を示す．図中 Single Cell は，エリア内に 1 台の基地局が存在する場合のセルラネットワークの総ルート数に対するルート切断率特性である．チャンネル数は 200 のため総ルート数が 100 以下であればルート切断が起こらず，それ以降のルートはすべて切断される．参考として基地局数 16，周波数繰り返し数 7 とした場合の総ルートに対するルート切断率特性を Multi-Cell として示した．

マルチホップネットワークでは $L_{\text{hop}} = 8 \text{ m}$ の場

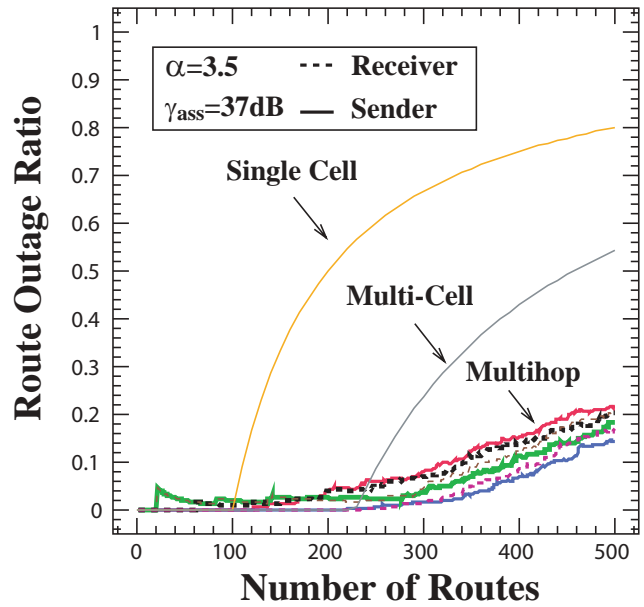


図 6 セルラネットワークに対する受信端チャンネル選択と送信端チャンネル選択の総ルート数に対するルート切断率特性

合 70 ルート程度から僅かな確率ながら切断が見られる．これは L_{hop} が小さいと，推奨中継範囲の面積が小さくなり，リンク長を L_{hop} 付近に保つことが難しくなる．その結果短いリンクが作成されると，所望信号電力が強くなるため，近傍で使用されているチャンネルが SIR を満たしこれを使ってしまい，そのリンクを切断してしまうことが原因と考えられる． $L_{\text{hop}} = 12 \text{ m}$ の場合は，235 ルートまでルート切断が観測されておらず，5% のルート切断を許容するならば，350 ルート程度までルートを確保することができている． $L_{\text{hop}} = 16 \text{ m}$ の場合 20 ルート程度からルート切断が起こり総ルート数の増加につれて特性が劣化している．これは L_{hop} が大きくなるとリンク長が長くなり，周波数再利用の効率が劣化しているためと考えられる．

通信を行う前に受信端末での干渉電力を知るには特別な制御チャンネル等を必要とする．しかし，マルチホップネットワークではリンク長が短く，受信端末での干渉電力と送信端末での干渉電力は大きく変わらないと考えられるため，受信端チャンネル選択と送信端チャンネル選択では特性がさほど変化しない可能性がある．

図 6 にセルラネットワークと比較した受信端チャンネル選択と送信端チャンネル選択の総ルート数に対するルート切断率特性を示す．なお， $\alpha = 3.5$ ， $\gamma_{\text{ass}} = 37 \text{ dB}$ とした．図 6 より，受信端チャンネル選

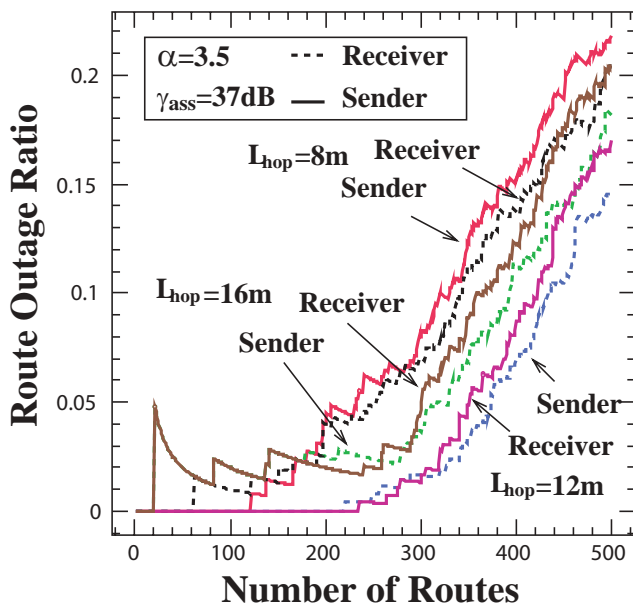


図 7 受信端チャンネル選択と送信端チャンネル選択の総ルート数に対するルート切断率特性比較

択及び送信端チャンネル選択では僅かな特性差が観測されたが、ある程度のルート切断を許容すれば、概ねセルラネットワークよりルートを多く確保できていることが分かる。

図 7 に、図 6 の拡大図を示す。図中 Receiver 及び Sender はそれぞれ受信端チャンネル選択と送信端チャンネル選択を行った場合の結果である。 $L_{hop} = 8m$ の場合、受信端チャンネル選択を行った場合では 60 ルート程度からルート切断が観測されているのに対し、送信端チャンネル選択を行った場合、120 ルート程度までルート切断が確認されていない。しかし、それ以降総ルート数が増えるにつれて送信端チャンネル選択のルート切断率が高くなり、総ルート数が 200 ルート付近から受信端チャンネル選択より特性は劣化している。しかし、 $L_{hop} = 12m$ および $16m$ の場合、送信端チャンネル選択を行ったほうが受信端チャンネル選択を行った場合より概ね特性は改善される。仮に $L_{hop} = 12m$ の場合、210 ルートまでルート切断が観測されず、5% のルート切断を許容するなら 370 ルート確保することができている。これは、送信端チャンネル選択を行うことによって受信端末での SIR を正確に知ることはできないが、チャンネルを使うことによる周囲への影響を正確に評価することができるようになるため、新規リンクによって周囲のリンクを切断してしまう現象が減ったためと考えられる。

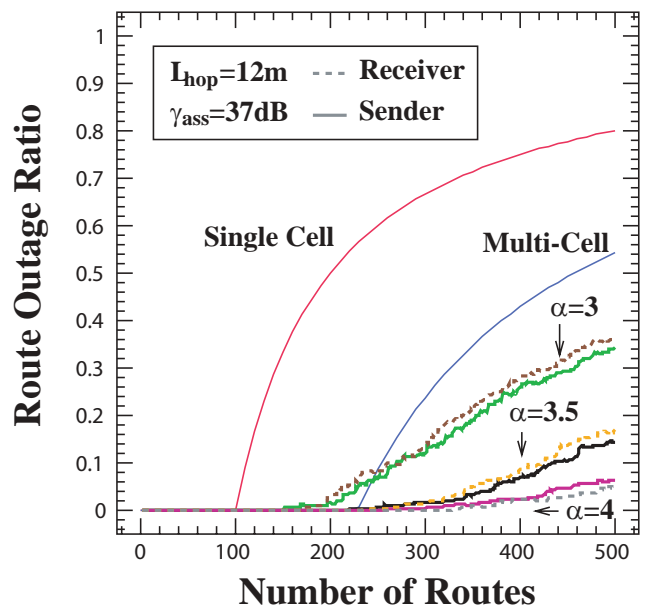


図 8 受信端チャンネル選択と送信端チャンネル選択におけるルート切断率特性比較

図 8 に $L_{hop} = 12m$, $\gamma_{ass} = 37dB$ において送信端チャンネル選択と受信端チャンネル選択における減衰定数 α を 3 , 3.5 および 4 とした場合の総ルート数に対するルート切断率特性を示す。図中 Receiver 及び Sender はそれぞれ受信端チャンネル選択と送信端チャンネル選択を行った場合の結果である。図 8 より、受信端チャンネル選択、送信端チャンネル選択のいずれの場合も減衰定数 α が増大するとルート切断率が減少することが分かる。これは減衰定数 α が増大するほど SIR が増大するためである。また減衰定数 α が 3 および 3.5 の場合は送信端チャンネル選択のほうが特性が良いが、 $\alpha = 4$ の場合は受信端チャンネル選択のほうが特性が良い。これは α が大きくなると、リンクを構築する送信端末と受信端末における SIR の差が大きくなるためであると考えられる。

図 9 に送信端チャンネル選択における、減衰定数変化時の総ルート数に対するルート確立特性を示す。横軸は作成したルート数であり、縦軸は確立することのできたルート数である。なお、 $L_{hop} = 12m$, $\gamma_{ass} = 37dB$ とした。総ルート数が 500 において確立することのできたルート数は $\alpha = 3$ では 330 , $\alpha = 3.5$ では 430 , また $\alpha = 4$ では 450 ルート以上になる。

確立することのできたルート数が多いほど周波数利用効率が高いと考え、総ルート数が 500 において、セルラネットワークでは Single Cell が

100 ルート, Multi-Cell が約 230 ルート確立することができるため, マルチホップネットワークの周波数利用効率は $\alpha = 4$ の場合では Single Cell の 4.5 倍, Multi-Cell の 2 倍となり, $\alpha = 3$ においても Single Cell の 3.3 倍, Multi-Cell の 1.4 倍となっている. さらに, $\alpha = 3$ の場合では 200 ルート以上では総ルート数に対する確立ルート数の割合が低下しているが, $\alpha = 3.5$ 及び 4 では確立ルート数の増加に顕著な飽和は観測されないことから確立可能な最大ルート数は 450 を大きく超えるものと思われる.

図 10 に減衰定数に対するマルチホップ無線ネットワーク及びセルラネットワークの 1 ルート当たりの平均送信電力を表す. 図中 b_n はエリア内の基地局数を表す. なお便宜上 1m 電波を送信するのに必要な送信電力を -30 dB としている.

マルチホップ無線ネットワークでは, 送受信端末間の距離が短いため減衰定数は小さくなり, セルラネットワークでは端末基地局間の距離が大きいため減衰定数は大きくなると考えられる. 仮に, 端末間の減衰定数 3 の場合 (マルチホップネットワーク) と端末基地局間の減衰定数 (セルラネットワーク) を 3.5, 基地局数 b_n を 1 とした場合の平均送信電力を比較すると, マルチホップ無線ネットワークのほうが総送信電力が 36.1 dB 小さくなる. ここで基地局アンテナの利得を 20 dBi [5], 端末アンテナの利得を 0 dBi とすると, アンテナ利得差は 20dB となるが, これを考慮してもマルチホップ無線ネットワークはセルラネットワークより 16.1dB 総送信電力が小さくなり, マルチホップネットワークの総送信電力は基地局数 $b_n = 4$ とした場合のセルラネットワークの送信電力とほぼ同等になる.

5. む す び

本稿では, 近傍端末と宛先端末の位置情報を既知としたマルチホップ無線ネットワークにおいて, 端末選択アルゴリズムとチャネル選択アルゴリズムを提案し, 周波数利用効率と送信電力について, セルラネットワークとの比較を行った.

その結果, 周波数利用効率の点でマルチホップネットワークはセルラネットワークより優れた特性を有する可能性があることを示し, また送信電力においても, アンテナの利得差を考慮してもセルラネットワークより概ね小さくなることを示した.

謝辞 本研究の一部は通信・放送機構「創造的情

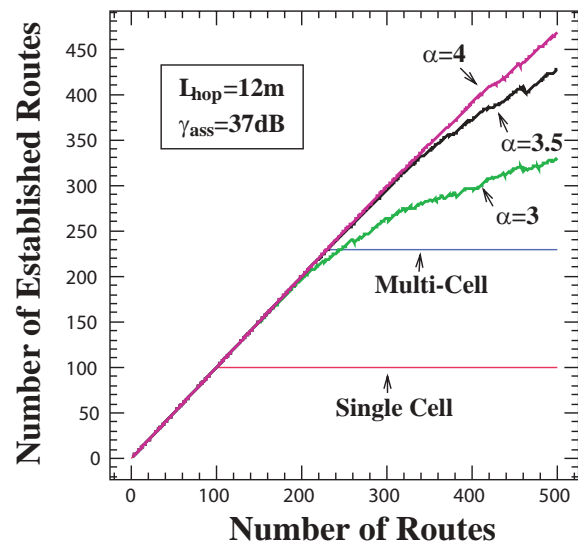


図 9 送信端チャネル選択における総ルート数に対する確立ルート数特性

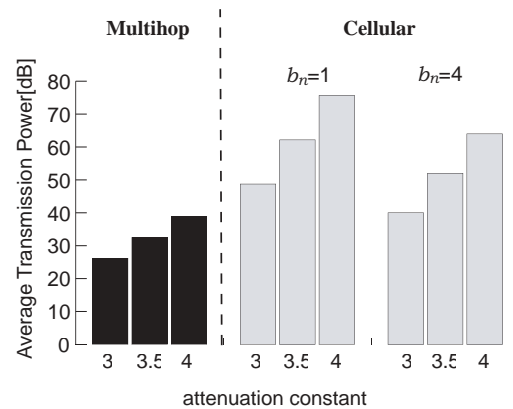


図 10 マルチホップ無線ネットワークとセルラネットワークの減衰定数対平均送信電力特性

報通信技術研究開発推進制度」に係る研究助成によるものである.

文 献

- [1] 森野洋平, 佐方連, 村田英一, 吉田進, 自律分散ネットワークとセルラネットワークにおける送信電力の比較, 信学技報 2000-174, (2000-4), pp. 79-84.
- [2] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, 次世代アドホックネットワークの動向と課題-ユニバーサル・アドホックネットワークの提案-, 信学技報 RCS IN2000-7, (2000-4), pp. 37-42.
- [3] 中村元紀, 工藤栄亮, 中山正芳, 須田博人, “無線マルチホップネットワークにおけるデフォルトルート管理法”, 信学技報 RCS2001-23, (2001-4), pp. 45-50.
- [4] 小川智明, 工藤栄亮, 須田博人, “アドホックネットワークにおけるマルチルート化技”, 信学技報 RCS2000-43, (2000-6), pp. 37-42.
- [5] 恵比根佳男, “次世代移動通信 (IMT-2000) 基地局アンテナの設計”, 電子通信情報学会誌, (2000-4), pp. 23-30.