

## マルチホップ接続を用いたCDMAパケット通信システムの容量 およびエリア拡張に関する評価

前島 治<sup>†</sup>

福家直樹<sup>†</sup>

杉山敬三<sup>†</sup>

篠永英之<sup>†</sup>

第4世代移動通信システムに関する検討が各方面で進められている。同システムについては現行の第2、3世代移動通信システムよりも高い周波数での利用も視野に入れた検討が必要であると考えられるが、システムの高周波化に伴いカバレッジエリアが縮小するため、全ての無線端末を直接基地局に収容する形態ではサービスエリアの面的な展開が困難になることが予想される。本稿では移動通信システムのサービスエリアの拡張を目的として、端末中継によるマルチホップ接続を用いたCDMAシステムについて検討したので報告する。マルチホップ接続時の中継端末選択方針に関する考察およびマルチホップシステムの基地局接続率、システム容量に関するシミュレーション評価により、マルチホップ接続によりエリア拡張効果が得られること、比較的低負荷の領域においてマルチホップシステムがシングルホップシステムと同等の特性を示すことを確認した。

### Evaluation on System Capacity and Area Extension of CDMA Packet Communication System utilizing Multihop Connection

Osamu Maeshima<sup>†</sup>,

Naoki Fuke<sup>†</sup>,

Keizo Sugiyama<sup>†</sup>,

Hideyuki Shinonaga<sup>†</sup>

4G mobile communication systems are under study in various fields. One of the issues that have to be considered is frequency bands that are to be assigned for the system and that can be higher than that assigned to 2G/3G mobile communication systems. In that case, due to the reduction of coverage area with the higher frequency bands, it gets difficult to deploy service area densely in conventional way where base stations accommodate mobile stations directly. This paper reports studies on CDMA system utilizing multihop connections by mobile terminals. It also notes on policies dealing with selection of relaying terminals. Computer simulation was conducted to evaluate the system capacity and the effect of coverage area extension and shows that multi-hopping technique does extend the coverage area with the almost equal performance to the conventional single hop system when the system load is relatively light.

---

<sup>†</sup> (株) KDDI 研究所  
KDDI R&D Laboratories Inc.

## 1. はじめに

第4世代移動通信システムに関する検討が各方面で進められている。例えば、ITU-R[1]ではIMT-2000の高度化と後継システム（第4世代移動通信システム等）について、携帯電話システムと無線LAN等の異種無線システムが連携し広帯域通信を実現するという基本コンセプトを基に議論されている。無線LANについては、IEEE802.11 WGにて2.4GHz帯あるいは5GHz帯無線LANの高速化に向けて物理層ならびにデータリンク層の仕様が検討されている。このような状況を踏まえると、次世代の移動通信システムは、現行の第2、3世代移動通信システムよりも高い周波数での利用を視野に入れた検討が必要であると考えられる。

この場合に問題となるのは、システムの高周波化に伴い自由空間損失や反射減衰が増大しカバレッジエリアが縮小するため、全ての無線端末を直接基地局に収容する形態ではサービスエリアの面的な展開が困難になることである。この問題に対して、筆者らは、基地局と端末との間を固定中継機あるいは他ユーザ端末により中継するマルチホップ接続を解決手法として提案した[2]。本稿ではサービスエリアの拡張を目的として、端末中継によるマルチホップ接続を用いたセルラシステムのエリア拡張の効果ならびにシステム容量について、シミュレーションにより評価したので報告する。

## 2. システム構成と中継端末選択方針

### 2.1. システム構成

システム構成を図1に示す。アクセス方式としてDS-CDMA (Direct Sequence-Code Division Multiple Access) を用いたセルラ型移動通信システムにおけるパケット通信を対象とする。基地局(BS)のカバレッジエリア下に存在する移動端末(MS)は基地局と直接接続（シングルホップ接続）する他、基地局と直接接続不可能な移動端末に対する中継端末の候補となる。基地局と直接接続不可能な端末は上記中継候補端末の中から適当な端末を選択し、中継端末経由で基地局へ接続(マルチホップ接続)するものとする。この他、本システムでは以下を前提条件

として仮定する。

- ・ 複信方式として現行 3G セルラシステムで採用している FDD(Frequency Division Duplex)を踏襲する。マルチホップ接続によりセル内端末が増加すると基地局への干渉量の増大が問題となるため、ここでは端末の送受信周波数チャンネルをホップ毎に反転させることとする（図1）。
- ・ 移動端末 - 基地局間通信チャンネルおよび移動端末 - 中継端末間通信チャンネルで使用する拡散コードは各チャンネルに一意に割り当てられる。
- ・ 移動端末の通信は必ず基地局を経由するものとし、基地局を経由せずに移動端末間でトラヒックが終端されることはない。

このようなマルチホップ接続によって構成されるシステムでは、そのカバレッジエリアを制限するのはバッテリー制約のある端末によってパスが確立される上りリンクによるところが大きいと考えられる。そこで本稿では上りリンクを評価の対象とする。

### 2.2. 中継端末選択方針

シングルホップ接続を採用する従来のセルラシステムと異なり、マルチホップ接続を用いるシステムの場合には適切な中継端末の選択がシステム設計上重要な要素になると考えられる。ここで、中継端末選択において考慮すべき種々の制約条件としてシステム上の制約とユーザ端末の制約の2種類を考える。

システム上の制約に関しては、CDMA方式ではシステム内の干渉電力がシステム容量に大きく影響することから、端末の所要送信電力を低減しシステム

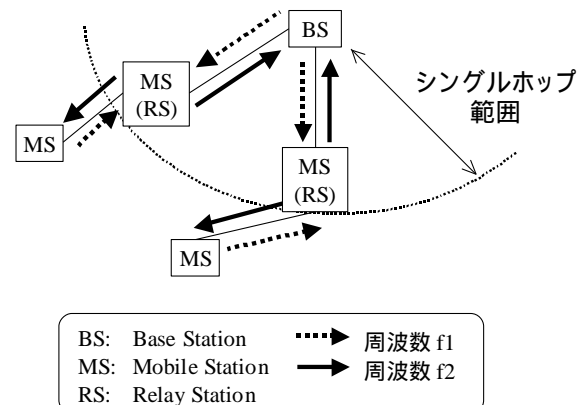


図1 システム構成

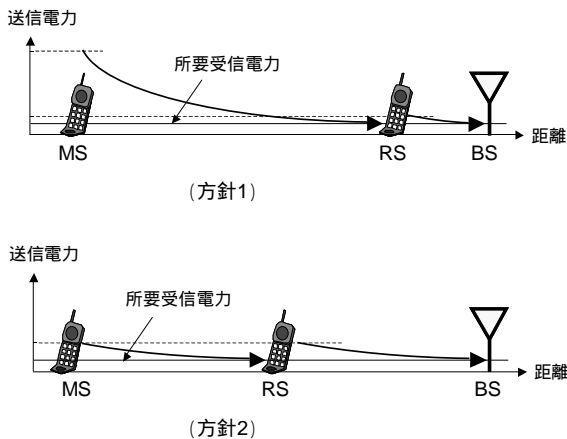


図 2 中継端末選択方針

内干渉量を抑制するような中継端末の選択が一つの手法として挙げられる[3]。

一方、ユーザ端末の制約に関しては、他ユーザトラフィックを中継するために自端末のバッテリーを消費する中継端末と、端末中継によりネットワーク接続サービスを得るユーザあるいは同ユーザを得る接続事業者との間の利害関係が存在する。特に、特定のノードに中継が集中するとバッテリーが不公平に消費される可能性がある。この問題に対して、バッテリー制約のない基地局や通信の当事者であるユーザ端末がパケット送信に必要な電力を最大限負担し、中継端末に依存する送信電力量を抑制するという方針が考えられる。

本稿では上記制約条件を基に次節に述べる 2 種類の中継端末選択方針を考え、各々のケースおよびシングルホップ接続時における基地局接続率、パケット到着率、スループットについて評価する。

この他、バッテリー量に関連して中継候補端末のバッテリー残量をマルチホップパス計算のメトリックとして扱う手法[4]も提案されているが、ここでは全ての端末のバッテリー容量はシミュレーション期間中のパケット送信に消費する電力量を十分満たすものとし、シミュレーション期間中にバッテリー残量情報の配信をトリガとするマルチホップパスの更新(中継端末の変更)はないものとした。

### 2.2.1. 方針 1 : 中継端末依存電力量最小

基地局と直接接続不可能な端末は最大送信電力以

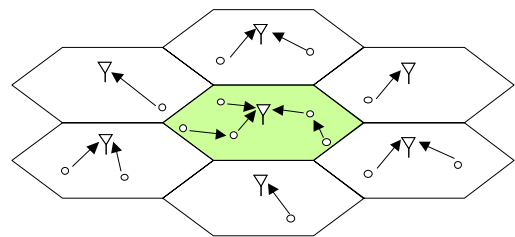


図 3 セル構成

内で接続可能な端末群を検査し、基地局との接続を有している端末を中継候補端末とする。これら中継候補端末群の中で基地局への送信電力が最小となるものを当該端末の中継端末とする(図 2 方針 1)。

### 2.2.2. 方針 2 : マルチホップパス総送信電力最小

基地局と直接接続不可能な端末は最大送信電力以内で接続可能な端末群を検査し、基地局との接続を有している端末を中継候補端末とする。このうち、端末から中継候補端末への送信電力および同中継候補端末から基地局への送信電力の総和が最小となるものを中継端末とする(図 2 方針 2)。

但し、いずれの選択方針の場合においても、端末がそれ自身の最大送信電力以内で基地局と直接接続可能な場合にはこれを優先させる。

## 3. シミュレーションモデル

検討システムのシミュレーションモデルを図 3 に示す。7 個の六角形セルより構成するマルチセルモデルとし、端末は各セル内に一様分布に従ってランダムに配置させる。ここで、基地局は各セルエリア全体を必ずしもカバーするものではない。また、マルチホップ接続時のホップ数は最大 2 ホップまでとする。7 セルのうち中央セル内基地局で受信されたトラフィックを統計データの対象とし、他セル基地局へ接続する端末が送出するトラフィックは中央セルへの干渉源として扱う。

### 3.1. 伝搬モデル

移動端末 - 基地局間および移動端末 - 中継端末間

の伝搬モデルにはパスロスおよびシャドウイングを考慮し、フェージングの影響はないものとする。移動端末 - 基地局間の伝搬モデルには、見通し外伝搬モデルとして建物による回折、散乱効果を理論的に表現した Walfisch-池上モデル[5]を適用し、対象とする都市の地形データとして表 1 に示す値[6]を用いる。また、移動端末 - 中継端末間のパスロスには見通し内伝搬モデルとして二波モデルより以下の式を使用する。

$$L = 46.6 + 19.7 \log R, \quad (R < 150) \quad (1)$$

但し、移動端末 - 基地局間に適用する地形を考慮し、ここでは見通し区間を Break Point (=150m) 以内の範囲に制限した。シャドウイングは標準偏差の対数正規分布に従う乱数を見通し外区間に適用した。伝搬モデルのパラメータを表 1 に示す。

表 1. 伝搬モデル用地形データ

周波数 [GHz]	5.0 GHz
平均建物高 [m]	25 m
基地局アンテナ高 [m]	50 m
端末アンテナ高 [m]	1.5 m
道路幅 [m]	20 m
平均建物間隔 [m]	80 m
シャドウイング	8 dB

### 3.2. チャネルモデル

端末 - 基地局間および端末 - 中継端末間の通信チャネルには次の条件を仮定した。

- (1) 送信電力は受信ノード（基地局、中継端末）における所要受信電力にチャネルのパスロスとシャドウイングを補償した値でなおかつ端末の最大送信電力以下であるとする。
- (2) 通信チャネルは固定長のタイムスロットに分割され、全ての通信チャネルのスロットは同期している。
- (3) パケット送信中の送信電力は一定とする。

パケットの正常受信の判定は式(2)で表されるように、ノード  $j$  (基地局あるいは中継端末) がノード  $i$  (送信端末) からのパケットを受信する時の所望信号の受信電力  $P_{rx}(i, j)$  に拡散率  $SF$  を乗算した

値とノード  $j$  が受信する干渉電力との比を受信ノードの所要品質と比較し、これを満たす場合に当該パ

$$E_b / (I_0 + N_0)_{ij} = \frac{SF \cdot P_{rx}(i, j)}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K P_{rx}(k, j) + N} \quad (2)$$

ケットの正常受信とした。

ここで、干渉電力は中央セル内他移動端末および周辺 6 セルに存在する移動端末からのパケット送信に要する電力とした。

### 3.3. 生成トラヒック

基地局に接続可能な端末のみが上り方向のトラヒックを生成し、中継端末もトラヒックを生成する。トラヒックは指数分布に従う間隔で固定長のパケットを発生させる。ここで、パケットサイズは 1 つのタイムスロットに収容される大きさとする。発生したパケットおよび中継端末で受信されたパケットは送信キューに格納され、Slotted-ALOHA に従い逐次送信される。但し、正常受信されなかったパケットの再送はしないものとする。

### 3.4. 評価項目

評価項目とその定義を以下に示す。

- (1) 基地局接続率: 中央セル内配置端末を対象として、中央セル基地局へシングルホップあるいはマルチホップで接続可能な端末数のセル当りの配置端末数に対する割合。
- (2) パケット到着率: 中央セル基地局に接続する端末がシミュレーション期間中に送信したパケットの総数に対する同基地局の正常受信パケット数の割合。
- (3) スループット: タイムスロット当りの基地局の正常受信パケット数。

上記項目をシングルホップ接続のみの場合、マルチホップ接続(中継端末選択方針 1、2)の場合について比較評価した。

## 4. シミュレーション結果

表 2 に示す諸元に基づいてシミュレーションを行った。

表2 シミュレーション諸元

セル半径	100 ~ 600 m
セル当りのノード数	60
周波数	5.0 GHz
拡散率	16
基地局所要受信電力	-90 dBm
中継端末所要受信電力	-70 dBm
端末最大送信電力	23 dBm
基地局アンテナ利得	0dBi
端末アンテナ利得	0dBi
所要品質 $E_b/(I_0+N_0)$	3.5 dB
スロット間隔	4 ms
シミュレーション期間	1000スロット

#### 4.1. 基地局接続率

セル当りの配置ノード数を 60 とした時の端末から基地局への上り方向の接続率を図4に示す。基地局接続率 80%を満たすセル半径がシングルホップ接続の場合では 200m であるのに対し、マルチホップ接続を適用することにより約 300m まで拡張しうることがわかる。また、セル半径 300m 付近においてマルチホップ接続による基地局接続率向上の効果が高く現れており、シングルホップ時の約 44%に対して約 2 倍の接続を收容しうることがわかる。

中継端末選択方針については、シングルホップ接続のみで收容しうるセル半径の狭い領域 (200m 未満) とマルチホップ接続が減少し始める領域との境界付近 (200m ~ 300m) において二つの方針に若干の差異が見られるものの、全体として同じ傾向を示した。本稿で用いた伝播モデルでは、端末 - 基地局間の減衰率が端末 - 中継端末間の減衰率よりも大きいため端末 - 基地局間の減衰が支配的となり、中継端末選択方針による経路の違いが生じにくい結果となった。逆に下りリンクの場合には、基地局 - 端末間の送信電力に関してはバッテリーの制約を考慮する必要がないこと、基地局のチャンネル当りの送信電力は端末の送信電力よりも大きくしうることから、中継端末選択方針により容易に異なる経路を構成しうることが予想される。これについては今後検討する予定である。

この他、端末 - 中継端末間に Walfisch-池上モデル (見通し外) を適用した場合には距離減衰が二波モデルに比して増大するため 2 ホップ接続によるエリ

ア拡張効果が殆ど得られない結果が得られた。マルチホップ接続では端末 ~ 中継端末間の見通しの有無が接続率に大きく影響するといえる。

#### 4.2. パケット到着率

セル半径 300m、ノード数 60 とした場合の中央セ

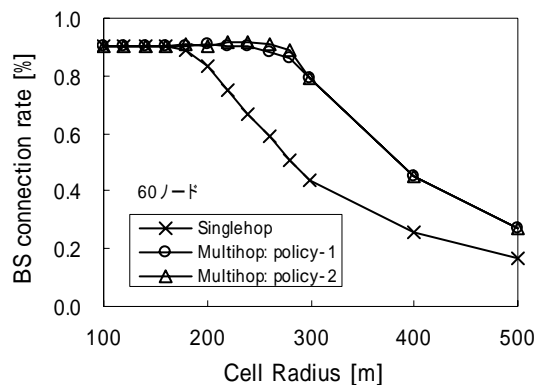


図4 基地局接続率

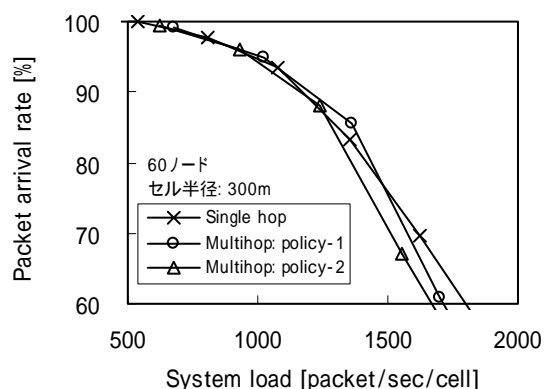


図5 パケット到着率

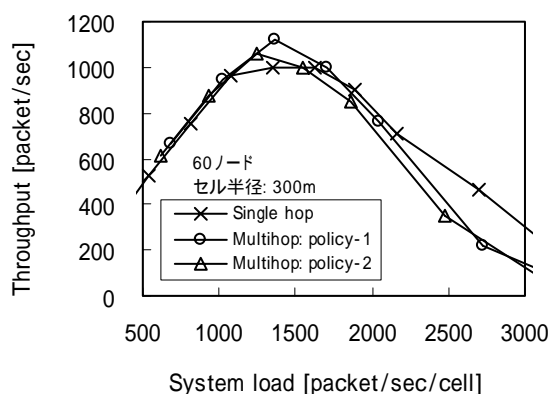


図6 スループット

ル基地局におけるシステム負荷とパケット到着率の関係を図5に示す。シングルホップの場合とマルチホップの場合とで基地局に接続する端末数が異なるため、セル当りのパケット発生レートが一定となるよう、基地局接続端末のパケット発生レートを調整した。パケット到着率 90%以上を満足する 1000 packet/sec/cell 以下の低負荷の領域においては、シングルホップ/マルチホップ両システムともに同様の特性を示している。本モデルではマルチホップ接続時にはホップ毎に送受信の周波数を反転させているため、マルチホップ接続端末の送信電力がシングルホップ接続端末の信号に影響しない。そのため、基地局が受信する干渉量が所要品質に影響しない低負荷領域においては、マルチホップ接続端末のトラヒックは中継端末からの増加トラヒックと同様に振舞う。一方、高負荷になるとマルチホップ接続の場合では各ホップにおける品質劣化が寄与し、シングルホップの場合よりも基地局へのパケット到着率が劣化する。

#### 4.3. スループット

4.2 と同じ条件でのシステム負荷とスループットの関係を図6に示す。所要品質を満たす低負荷領域ではシステム負荷の増加とともにスループットは単調に増加する。また、諸元の拡散率およびタイムスロット間隔より所望信号の品質はシステム負荷 1800 packet/sec/cell 付近で所要品質 ( $E_b / (I_0 + N_0) = 3.5\text{dB}$ ) 程度に低下することになる。シミュレーション結果からも同様の傾向が見られ 1500 ~ 1800 packet/sec/cell 付近でピークに達しそれ以上のシステム負荷領域では単調に減少している。また、高負荷領域におけるマルチホップシステムのスループットの劣化はパケット到着率の劣化と同様にシングルホップシステムよりも大きい。

#### 5. おわりに

移動通信システムのカバレッジエリアの拡張を目的として、端末中継によるマルチホップ接続を用いた CDMA システムを検討した。さらに、マルチホップ接続時の中継端末選択方針について検討し、基地局接続率、パケット到着率ならびにスループット

に関してシミュレーション評価した。その結果、マルチホップ接続によりエリア拡張効果が得られること、比較的 low 負荷の領域においてマルチホップシステムがシングルホップシステムと同等の特性を示すことを確認した。中継端末選択方針の差異については、端末 - 中継端末間に適用する伝搬モデルにも大きく依存すると考えられ、今後は他の伝搬モデルによる評価ならびに下りリンクに関する評価を行う予定である。

最後に日頃ご指導いただく KDDI 研究所浅見所長、松島副所長、水池取締役に感謝します。

#### 参考文献

- [1] <http://www.itu.int/ITU-R/study-groups/rsg8/rwp8f/index.asp>
- [2] 前島他, “マルチホップ無線ネットワークによるサービスエリア拡張に関する検討,” 信学会ソサイエティ大会 SB-3-2, 2002.9.
- [3] 藤原淳, 竹田真二, 吉野仁, 大津徹, 山尾泰, “ブロードバンド CDMA セルラ方式におけるマルチホップアクセス法のシステム容量増大効果,” 信学論 Vol. J85-B, No. 12, pp. 2073-2079, Dec. 2002.
- [4] C.-K. Toh, “Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks,” IEEE Communications Magazine, June 2001
- [5] H.H. Xia, “A Simplified Analytical Model for Predicting Path Loss in Urban and Suburban Environments,” IEEE Trans. V. T., vol. 46, no. 4, pp. 1040-1046, Nov. 1997.
- [6] 竹田真二, 藤原淳, 吉野仁, 大津徹, 山尾泰, “CDMA セルラパケット伝送方式へのマルチホップ接続適用によるエリアカバレッジ拡大効果,” 信学技報 RCS2002-18, pp. 7-10, 2002-04.