

分散アンテナシステムにおける下り伝送容量を考慮したアンテナ選択方法

余 小明 陳 嵐

加山 英俊

将来のRANアーキテクチャとして有望視されている分散アンテナシステムにおける、下りリンクの容量最大化を基準としたRAUの選択方法に関して研究を行った。なお、本研究は中国 東南大学 無線電工程系移動通信国家重点実験室(尤 肖虎教授)との共同研究により実施した。

1. まえがき

100M~1Gbit/sの高速伝送が要求されるIMT-Advanced^{*1}では高い周波数帯域の割当てが想定されているが、一般に帯域が高くなるほど、伝搬ロスが大きくなる。さらに、空間多重や多値変調などで高速伝送を実現するためには高い信号対雑音比(SNR: Signal-to-Noise Ratio)が要求されることから、1つの基地局のカバーエリアは第3世代(3G: 3rd Generation)システムと比較すると非常に小さくなることが予想される。

この問題に対処するため、WINNER

(Wireless world INitiative NEw Radio)^{*2}やIEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.16j^{*3}ではリレー局を用いたマルチホップ^{*4}システムネットワークが議論されている(図1)。一方、中国のIMT-Advancedに向けた国家プロジェクトであるFuTURE (Future Technologies for Universal Radio Environment) では、図2に示すような分散アンテナシステム(DAS: Distributed Antenna System)がキーテクノロジーの1つとして検討されている。北京研究所ではこのDASの可能性に着目し、これまでFuTUREのリーダーである東南大 尤教授とDASに関

する伝送・制御技術の共同研究を行ってきた。

本稿では、DASにおいて下り容量を最大化する最適な選択方法を提案し、その特性評価を行った結果について解説する。なお今回解説する技術は、FuTUREプロジェクト・フェーズ2において、現在上海にてフィールド実験が進められているテストベッドに実装されている。

2. DASアーキテクチャと伝送容量

DASでは1つのCU (Central Unit)に、地理的に分散配置される複数のRAU (Remote Antenna Unit)が光ファイバを介して接続され、1つのG (Generalized) セルを形成する。RAUは、1つまたは複数のアンテナを有するが、CUではこれら複数のRAUからのアンテナの送受信信号処理を一元的に行う。これにより複数のRAU間にまたがる信号の一括処理が容易となることから、例えば複数のアンテナを用いてダイバーシチ効果や伝送速度を向上させるMIMO (Multiple Input Multi-

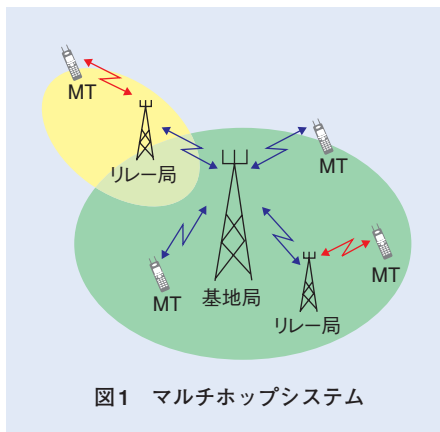


図1 マルチホップシステム

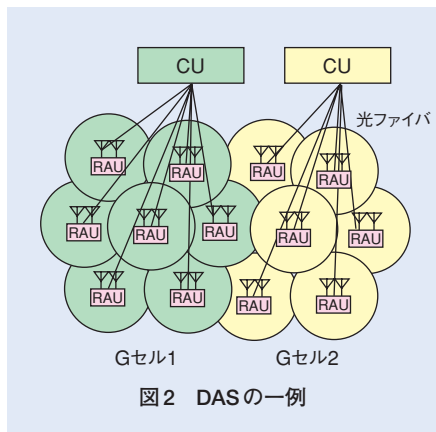


図2 DASの一例

*1 **IMT-Advanced**: ITU-R (International Telecommunication Union-Radio communication sector)において、IMT-2000の後継と位置付けられている規格。高速移動時で100Mbit/sを、低速移動時でも1Gbit/sの実現を想定したもの。

*2 **WINNER**: 欧州での次世代移動通信の無線伝送技術に関する研究フォーラム。2004年に設立。

*3 **IEEE802.16j**: IEEE802.16をベースとし、さらにリレー環境を提供するための次世代無線MAN (Metropolitan Area Network) 規

格。通信範囲は数キロメートル四方(最大で50km)に達し、現在の無線LAN規格であるIEEE802.11に比べて格段に利用範囲が広い。

ple Output) 伝送を複数のRAUを用いて簡単に実現でき、各RAUが形成する小さなサービスエリアであるマイクロセル端での品質改善が見込めるとともに、同一CU内のマイクロセル間のハンドオーバを簡素化できるメリットがある。

移動端末 (MT: Mobile Terminal) はGセル内の複数のRAUを同時に用いて通信を行うが、この場合どのRAUを用いるかによってMT当りの伝送容量は変化する。これについて、上下チャネルの劣化率および容量計算の詳細な検討がなされているが、RAU数との関係については明らかにされていない[1][2]。

また、一般に上り通信の場合は1つのGセル中のすべてのRAUが信号を受信してCUに転送し、CUでこれらの受信信号を合成処理することで容量最大化が実現できる。一方、下りでは1CU当りの送信電力が一定となることから、選択するRAUの数によって伝送レートが変化する。従来の選択法では常に信号対干渉雑音比 (SINR: Signal-to-

Interference-plus-Noise Ratio)^{*5}が最大のRAUを選択する diversity selection[2]や、1つのGセル中のすべてのRAUを用いる blanket送信法[3]が提案されているが、伝送容量の観点から必ずしも最適な方法とはいえない。

そこで、本研究では情報理論から求められる伝送容量式を用い、下り伝送容量を最大にするRAU数およびRAUの選択方法を提案した。

3. 容量基準のRAUの選択方法

3.1 システムモデル

1つのCUに収容されるRAUの数をN, RAU当りのアンテナ数をL, MTのアンテナ数をMとする時、受信信号は式(1)で表される。

$$\mathbf{y}(\mathbf{d}) = \mathbf{H}(\mathbf{d})\mathbf{x} + \eta \quad (1)$$

ここで $\mathbf{y}(\mathbf{d})$ はMTの受信信号ベクトル ($M \times 1$), $\mathbf{H}(\mathbf{d})$ はRAUとMT間のチャネルマトリックス^{*6} ($M \times NL$), \mathbf{d} は距離ベクトル $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]$ で、

d_i はi番目のRAUからMTまでの距離を表す。また \mathbf{x} はすべてのRAUからの送信信号ベクトル ($NL \times 1$), η はガウス雑音^{*7}である。送信機から受信機までのチャネルマトリックス \mathbf{H} は図3で表すことができる。

ここで g_i はRAUからMTまでの距離による電波の減衰 (シャドーイング^{*8}を含む), h_{ij}^w はチャネルレスポンス^{*9}を表す。

3.2 容量計算式の導出

情報理論から下りの容量は式(2)で表すことができる。

$$C_e = \max_{\mathbf{Q}_{xx}, \text{tr}(\mathbf{Q}_{xx})=P} E \left\{ \log_2 [\det(\mathbf{I} + \mathbf{H}\mathbf{Q}_{xx}\mathbf{H}^{\dagger})] \right\} \quad (2)$$

ここで \mathbf{Q}_{xx} は送信信号の共分散行列^{*10}である。また本方式では選択されたRAUには以下のとおり送信電力を均等に割り当てることとする。

$$p_i = \begin{cases} P/n & i \in \text{RAU}_{\text{sel-set}} \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

ここで n は選択されたRAUの数であり、 P はCUの総送信電力である。選択された n 個のRAUを用いて送信した場合の容量は式(2)および式(3)より式(4)で表される。

$$C_e = E \left\{ \log_2 \det \left[\mathbf{I} + \mathbf{H}^w \text{diag} \left\{ \sqrt{g_1}, \sqrt{g_2}, \dots, \sqrt{g_n} \right\} \mathbf{Q}_n \right] \right\} \quad (4)$$

ここで

$$\mathbf{Q}_n = \begin{bmatrix} \frac{P}{n} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

であり、 $\{g_i\}$ は $\{g_i\}$ を降順で並べたものである。

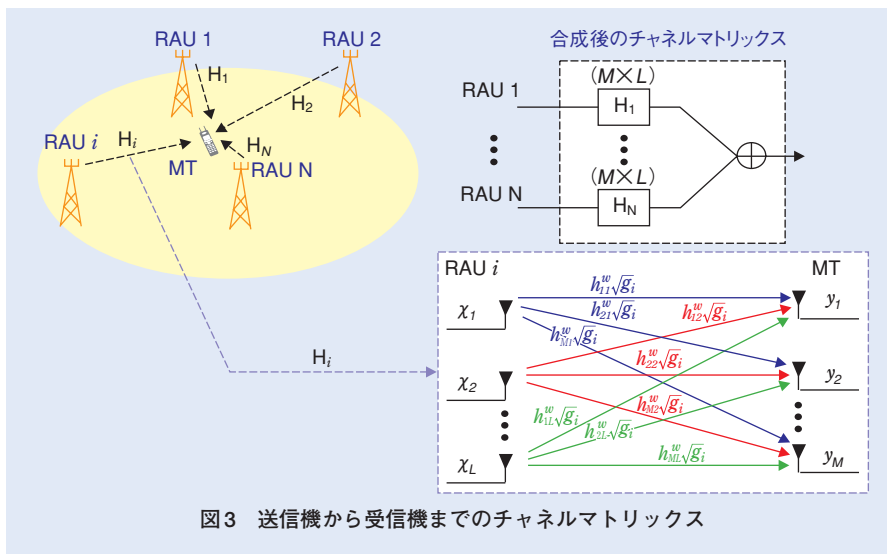


図3 送信機から受信機までのチャネルマトリックス

*4 マルチホップ: 通信端末どうしが直接的に通信を行うだけでなく、複数の通信端末が多段階で接続されたネットワークにおいて、それら複数の端末により通信を中継し、離れた端末どうしでもデータのやり取りを可能とする通信方式。

*5 信号対干渉雑音比: SNRが信号と雑音の電力比を表すのに対し、SINRは信号に対し、雑音と干渉電力の和との電力比を表す。

*6 チャネルマトリックス: 複数の送受アンテナ間のチャネルレスポンス (*9参照) を行列で表したものの。

*7 ガウス雑音: 正規分布する雑音。

*8 シャドーイング: 建物、標識や他車両などにより電波が遮断されてしまう現象。

3.3 容量最大化を基準にしたRAU選択方法

伝送容量を最大にするRAUの最適選択方法について述べる。なお本稿では簡素化のため、1つのGセルにおいては、ある時間に1人のユーザのみに送信するものとする。提案のRAU選択手順は以下のとおりである。

ステップ1：各RAUからMTに対しパイロットを送信する。MTは各RAUからの受信SINRを測定し、一定時間内における平均値をCUにフィードバックする。

ステップ2：CUはSINRの大きな順番にRAUを並べ、式(5)を用いて下り容量が最大となるまでRAUを選択する。

ステップ3：選択されたRAUに送信電力を均等に割り当てる。

以上の手順を一定周期で繰り返すことによって、MTの移動、つまり測定された各RAUの受信SINRの変動に基づいて常に最適なRAUを選択することができる。MTの移動に伴うRAUの動的選択の一例を図4に表す。ここではMTがAからBを経由してCへと移動する際に、それぞれ周辺のRAUが動的に4個、1個および2個と選択されている様子を示している。

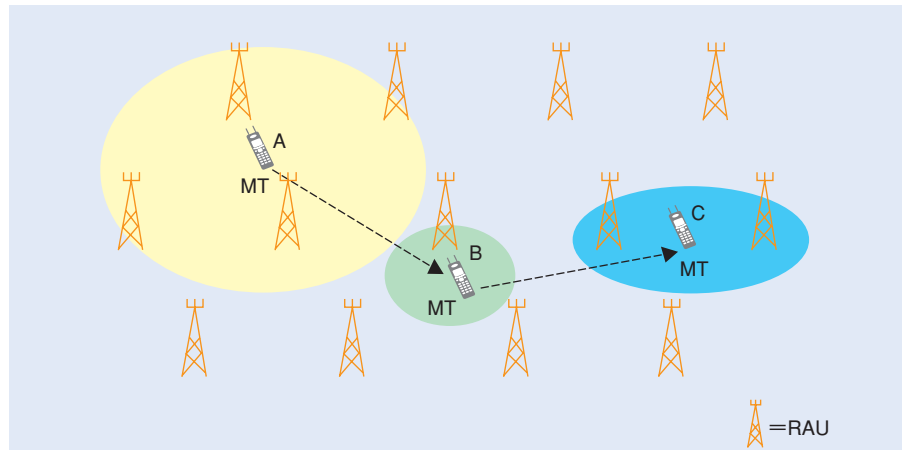


図4 RAUの動的選択の一例

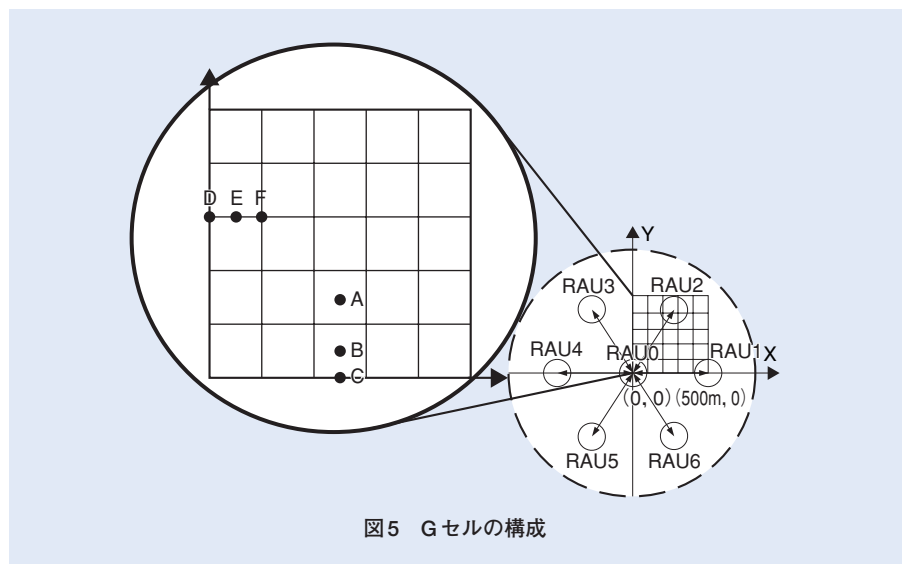


図5 Gセルの構成

(250,50), C (250,0), D (0,300), E (50,300) およびF (100,300) の座標上に存在するとした。

A～Fの6カ所の異なる場所に位置するMTに対し、容量が最大となる送信RAU数を図6に示す。図5から分かるように、AおよびDに位置するMTでは最適RAU数は3、BおよびCに位置するMTでは最適RAU数は2、EおよびFに位置するMTでは最適RAU数が1となった。このように、MTの位置する場所により最適なRAU数が変化することが明らかになった。

次に、従来のRAU選択方法との特性比較を行った。ここで、提案方式をCBRS (Capacity Based RAU Selection), 1つのRAUのみを選択する diversity selection 方法を1RAU, 固定した2つまたは7つのRAUを選択する方法をそれぞれ2RAUs, 7RAUsと略称する。MTの受信アンテナ数が1と2の場合における下り容量の累積密度関数 (CDF: Cumulative Density Function)^{*12} を図7に示す。これらから従来の固定RAU数の選択方法に比べ、提案方式では常に容量が最大となるよう最適な

3.4 特性評価

図5のように1つのGセル内に7個のRAUが分布し、各RAUは1つのアンテナを持つ場合を考える。また一例として距離減衰係数^{*11}を4、平均受信SNRを10dBと仮定する。エリアの対称性を考え、図4の網かけのエリアを評価対象とし、評価対象のMTはそれぞれ本エリア内のA (250,145), B

*9 チャンネルレスポンス：送受信間の無線伝搬路を通過する際に送信信号が受ける減衰、位相回転および遅延を表すパラメータ。チャンネル応答ともいう。
*10 共分散行列：各変数の分散を対角成分とし、その他の要素はそれぞれ2つの変数の変動

方向 (正・負) の相関度合いを表す行列。
*11 距離減衰係数：移動通信における伝搬損失を計算する際に、送信機から受信機までの距離のn乗を用いる。このnを距離減衰係数という。

*12 累積密度関数：確率変数がある値以下の値をとる確率を表したもの。

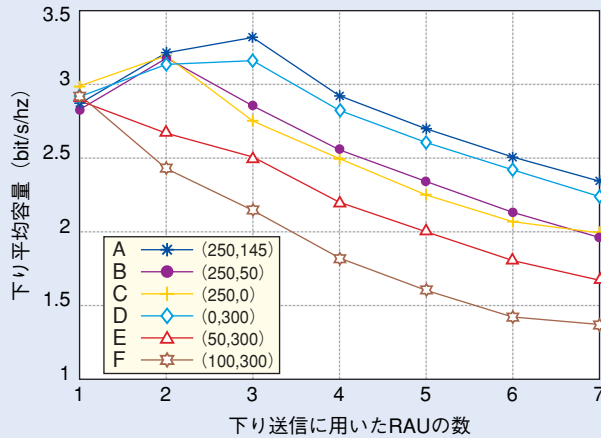


図6 異なる場所に位置するMTに対するRAU数と容量の関係

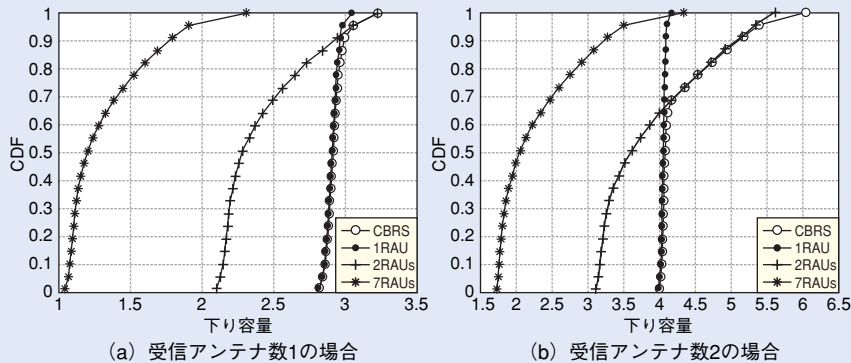
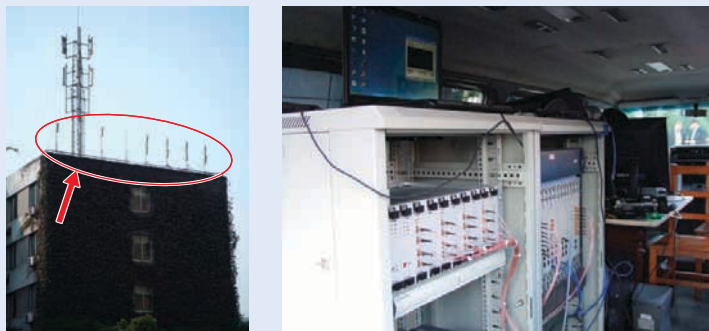


図7 下り容量のCDF



(a) RAU (8アンテナ)

(b) MT内部 (4アンテナ)

写真1 RAUとMTの外観

RAUの数が選択され、その結果従来の方法に比べて常に伝送容量が最大となっていることが分かる。また、受信アンテナ数が2の場合は1の場合に比べ、容量が大きくなっていることも分かる。

4. フィールド実験について

FuTUREプロジェクト・フェーズ2では時分割複信 (TDD: Time Division Duplex)^{*13}、周波数分割複信 (FDD: Frequency Division Duplex)^{*14}の両方のMIMO-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)^{*15}無線伝送技術の検証のため、上海市内においてテストベッドが構築され、フィールド実験が行われた。実験で用いられたRAUおよびMTの外観を写真1に示す。

周波数は3.5GHz帯の20MHz帯域を使用し、6RAUで3つのGセル構成となっている。実験では、ピークデータレート100Mbit/s (5bit/s/Hz)の実現が確認され、DASの実現性およびパケットエラー率の改善効果の確認が行われた。また本アルゴリズムに基づくRAU選択・切替が導入され、設計どおり動作することが確認された。

5. あとがき

移動通信システムの容量拡大のために有望視されているDASにおいて、下りの容量最大化を基準にした最適なRAU選択方法を提案し、特性評価により提案方式の有効性を示した。

今後はマルチGセル/マルチユーザの環境において、送信電力配分やスケジューリングと組み合わせた場合の検討を進める予定である。

*13 時分割複信：双方向の送受信方式の1つ。上りリンクと下りリンクに同一の周波数帯を使用し、異なる時間を割り当てることにより双方向通信が可能。

文 献

- [1] W. Roh and A. Paulraj: "Outage performance of the distributed antenna systems in a composite fading channel," IEEE Veh. Technology Conf., pp.1520-1524, Sep. 2002.
- [2] W. Choi, J.G.Andrews and C.Yi: "The Capacity of Multicellular Distributed Antenna Networks," Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, Vol.2, pp. 1337-1342, Jun. 2005.
- [3] C.Shen, L.Dai, S.Zhou and Y.Yao: "A novel spectrally efficient transmit diversity scheme in MIMO- DAS," Military Communications Conference, Vol.1, pp.638-642, Oct. 2003.

* 14 周波数分割複信：双方向の送受信方式の1つ。上りリンクと下りリンクに異なる周波数帯域を割り当てる方式であり、同時に送受信が可能。

* 15 OFDM：直交周波数分割多重。デジタル変調方式の1つであり、マルチパス干渉へ

の耐性を高めるため、高速な伝送レートの信号を多数の低速な狭帯域信号に変換し周波数軸上で並列に伝送する方式。高い周波数利用率での伝送が可能である。