

## 2-2 下り伝送容量 1.3 Gbit/s を実現するマルチユーザ OFDM-SDMA/基地局間連携方式による高度移動通信システム

### 2-2 *Advanced Wireless Packet Cellular System using Multi User OFDM-SDMA/Inter-BTS Cooperation with 1.3 Gbit/s Downlink Capacity*

川澤俊夫 井上 隆 藤嶋堅三郎 平良正憲 吉田 誠 赤瀬川章彦  
 KAWAZAWA Toshio, INOUE Takashi, FUJISHIMA Kenzaburo, TAIRA Masanori,  
 YOSHIDA Makoto, and AKASEGAWA Akihiko

#### 要旨

第4世代移動通信の実現に向けて、マルチユーザ OFDM (Multi User Orthogonal Frequency Division Multiplexing : MU-OFDM) 技術、極低温 RF フロントエンド技術、マルチビームフォーミングを用いた SDMA (Space Division Multiple Access) 技術及び基地局間連携スケジューリング技術により、それぞれ周波数及び時空間領域の高度無線信号処理技術の研究開発を進めてきた。本稿では、これらの要素技術を統合した MU-OFDM-SDMA/基地局間連携方式のパケットセルラーシステムを提案し、要素技術の試験結果に基づくシミュレーションにより、下り伝送容量 1.3 [Gbit/s]、周波数利用効率 18 [bit/s/Hz/cell] であることを確認したので報告する。

To realize the 4th generation mobile communications system, we have been developing elements of advanced wireless signal processing technologies for space, time and frequency domain, that are MU-OFDM (Multi User Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technology, Cryogenic RF front-end technology, SDMA and space-time inter BTS (Base Transmission Station) scheduling using multi beamforming technology. This report proposes MU-OFDM-SDMA/Inter BTS cooperation packet cellular system with integration of the technology elements. We also report that the downlink transmission performance and spectral efficiency by simulation using the elements technology results achieved 1.3 [Gbit/s] and 18 [bit/s/Hz/cell], respectively.

#### [キーワード]

MU-OFDM, SDMA, 基地局間連携, 極低温RFフロントエンド, 第4世代移動通信システム  
 MU-OFDM, SDMA, Inter BTS cooperation, Cryogenic RF front-end, 4th generation mobile communications system

## 1 まえがき

第3世代移動通信システムの導入により移動通信システム大容量化しているが、第4世代移動通信システムの飛躍的なブロードバンド化を実現するためには、周波数利用効率を改善する必要がある。2010年ごろの技術では、信号処理デバイス的高速化・低消費電力化、バッテリー容量の増大な

ど無線伝送技術を支える周辺技術の発展が見込まれることから、時間・空間・周波数領域における無線信号処理を高度化させることが有効であると考えられる。

本稿では、第4世代移動通信システムとして移動速度 200 km/h 以上に対応した伝送速度 100 Mbit/s 以上を可能とするために、現在の移動通信システムをベースに高度信号処理技術を用い

た MU-OFDM-SDMA/ 基地局間連携統合システムを提案する。また、各要素技術の実験結果やリンクレベルシミュレーションを基にシステムレベルシミュレーションによるシステム容量特性及びユーザスループット特性を示すとともに、SDMA 技術及び基地局間連携技術の適用範囲を明らかにしたので報告する [1]。

## 2 高度信号処理移動通信システム

### 2.1 MU-OFDM-SDMA/基地局間連携移動通信システム

第 4 世代移動通信システムは、下りピーク伝送速度 100 Mbit/s 以上、移動速度 200 km/h、FDD (Frequency Division Duplex)、周波数繰り返し利用率 (Reuse Factor=1) を満足するパケットセルラーシステム構成を想定した。図 1 に第 4 世代移動通信システムとして高度信号処理技術を統合した MU-OFDM-SDMA/ 基地局間連携システム構成を示す。本システムの特徴は、(1) 高速マルチパスフェージング環境 (移動速度 200 km/h 以上) でも高品質な通信サービスを提供可能にする MU-OFDM (Multi User Orthogonal Frequency Division Multiplexing) による無線アクセス技術、(2) 隣接チャネル (帯域) に対するガードバンド抑

制を可能にする急峻な周波数遮断特性を有する超伝導フィルタ技術、(3) 複数ユーザへの同時送信割当てによるビーム間干渉低減を可能にする SDMA 技術、(4) セル境界における隣接基地局間干渉低減のための基地局間連携技術の時間・空間・周波数領域における高度信号処理技術を採用し統合したことである。

表 1 に MU-OFDM-SDMA/ 基地局間連携システム主要諸元を示す。第 4 世代移動通信で利用が見込まれる 3 ~ 5 GHz 帯を考慮し、下り中心搬送波周波数は 4.0 GHz とした。占有帯域幅 72.828 MHz とし、16 サブバンドに分割し、各サブバンドにユーザをそれぞれ割り当てた。基地局アンテナは 12 素子円形アレーアンテナを用い SDMA 方式又は基地局間連携方式に用いた。基地局最大出力 47 dBm (1 素子あたり)、移動局アンテナは、オムニアンテナ 2 素子とした。

#### (1) マルチユーザ OFDM (MU-OFDM)

送信信号を高効率に伝送するため、耐マルチパスフェージング性に優れた OFDM をベースにサブバンドごとに周波数多重を行う MU-OFDM を採用した。MU-OFDM は強力な誤り訂正を併用することで Reuse Factor = 1 においても高品質な受信特性を示し、特に高速移動受信時の性能に優れている [2][3]。表 2 に MU-OFDM 諸元、図 1

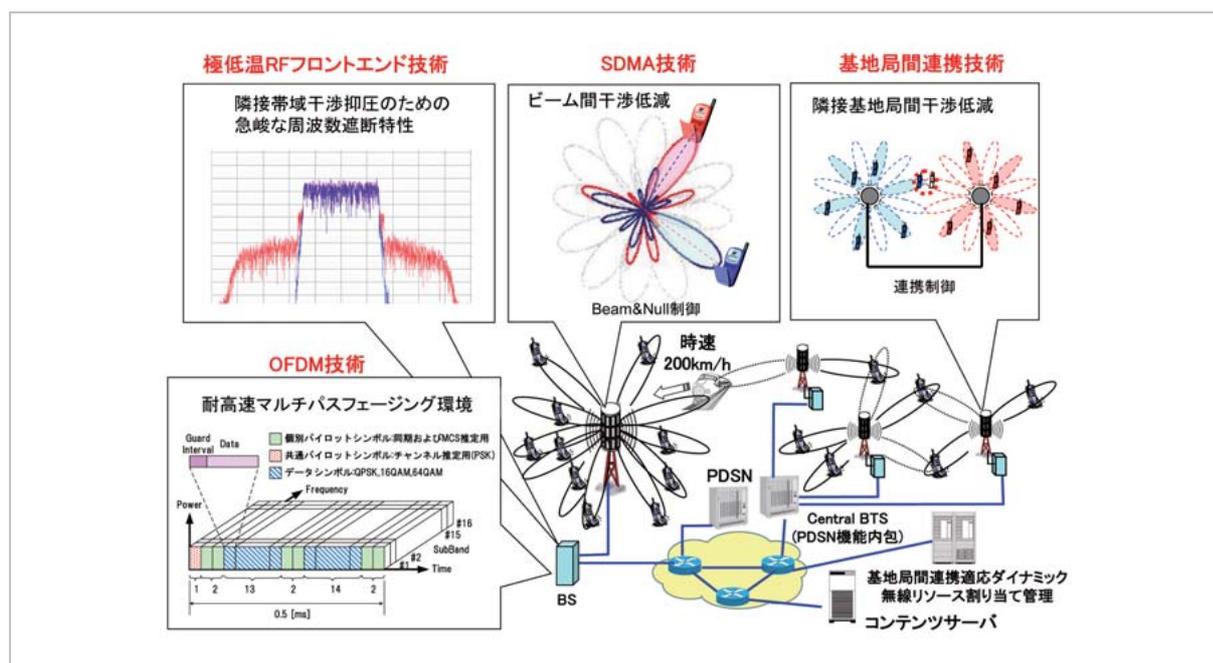


図 1 OFDM-SDMA/基地局間連携システム構成と MU-OFDM 方式フレームフォーマット

表1 MU-OFDM-SDMA/基地局間連携システム諸元

搬送波中心周波数	4.0GHz
帯域幅	72.828MHz
複信方式	FDD
下り回線変調方式	OFDM
基地局アンテナ	12素子円形アレーアンテナ
基地局出力	47dBm/素子
基地局アンテナ利得	20dBi/素子
移動局アンテナ	2素子ダイポールアンテナ
移動局アンテナ利得	-1dBi/素子
移動局雑音指数	6dB

表2 MU-OFDM 諸元

サンプリング周波数	83.232MHz
使用サブキャリア数	896
IFFT/FFT ポイント数	1024
OFDM シンボル長	14.706 $\mu$ s
ガードインタバル長	2.403 $\mu$ s
フレーム長	0.5ms
シンボル数	34 symbol / frame (個別 Pilot : 6, 共通 Pilot : 1, Data : 27)
サブバンド数	16
変調方式	QPSK / 16QAM / 64QAM
符号化率	1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4
符号化/復号方式	Turbo 符号化(拘束長 : 4) Max-Log-MAP 復号 (復号繰り返し数 : 8)
伝搬路推定	ZF-FAV(D=1)+連続 2 パイロット の時間平均(時間方向の直線補間)

に MU-OFDM 方式におけるサブバンドとフレームフォーマットを示す。1 フレーム当たりのデータシンボル数を 28 とし、共通パイロットは、ビーム制御時の同期制御及び MCS (Modulation & Coding Set) 決定のために使用した。個別パイロットはフレームの前部、中部及び後部にそれぞれ二つずつ挿入し、連続 2 パイロットの時間平均と時間軸方向の直線補間により、高精度な伝搬路推定を行う。ターボ符号は 3 GPP 2 準拠とした。今回の検討においては周波数同期、FFT タイミング同期及び各基地局間の送信タイミング同期は、理想的にとれているものとした。適応変調による変調方式と符号化率の切替え閾値特性として、移動速度 40 km/h ( $f_D = 150$  Hz) 及び 200 km/h ( $f_D = 750$  Hz) における瞬時 SIR に対するスループット特性を図 2 に示す。

(2) 超伝導フィルタ

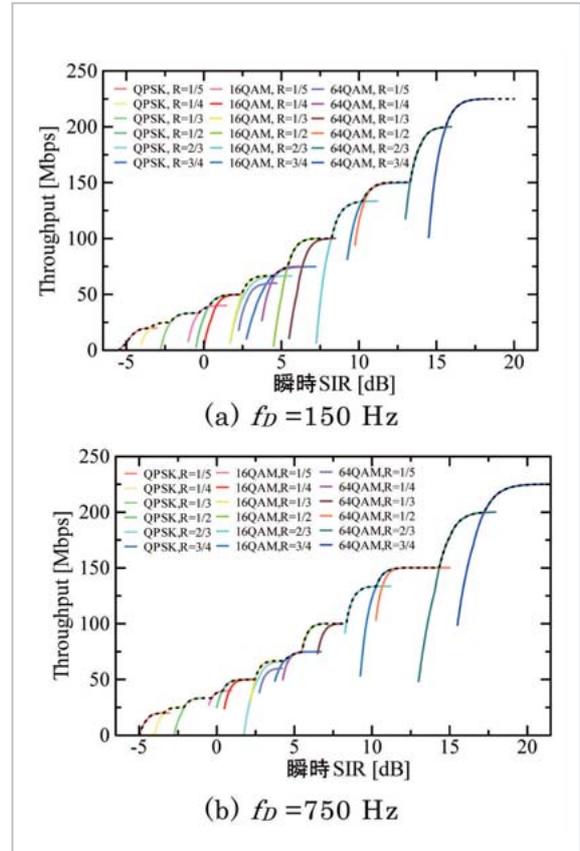


図2 瞬時 SIR 対スループット特性

基地局送信用 RF フィルタとして、基地局受信 RF フィルタ [4][5] と同様に低損失(帯域内)、急峻な周波数遮断特性及び高い帯域外抑圧特性が期待できる超伝導フィルタの周波数特性設計例を図 3 に示す。伝送帯域 72.828 MHz (3 dB 帯域)、中心周波数からの離調 41.414 MHz (ガードバンド 5 MHz) で抑圧比 25 dB 以上を持つ BPF (Band Pass Filter) とした。

(3) SDMA 方式

12 素子円形アレーアンテナを用いて複数ユーザに対してビーム間干渉を抑圧する送信ビームパターンを形成し、複数同時ビーム送信を可能とし空間の利用密度を改善した。送信ビーム及びヌル制御は、FDD を想定して、上り回線で求めた相関行列に基づき到来波方向を推定し、校正データを用いて下り回線の相関行列を算出し、送信アレー重みを決定する方式を用いた [6]。システムシミュレーションでは、屋外評価結果から到来波方向推定誤差及びビーム制御誤差を含めた [7]。また、パケットスケジューリングは、共通パイロットの CIR (Carrier to Interference power Ratio) 測定値

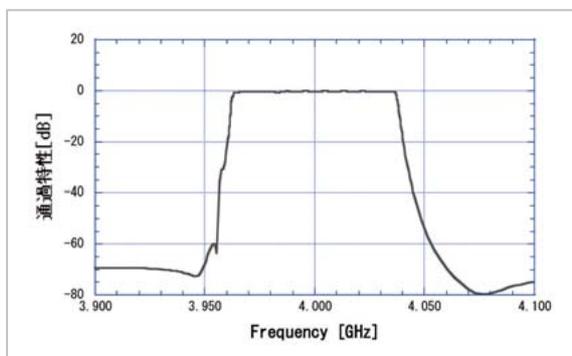


図3 超伝導フィルタ通過特性(設計例)

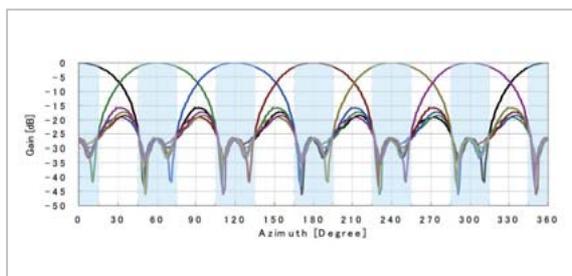


図4 基地局間連携方式のビーム制御特性

に基づく PF 方式 (Proportional Fairness) により、同時送信ユーザの組合せを選定する重み優先法 [8] をサブバンドごとに適用した。

#### (4) 基地局間連携方式

12 素子円形アレーアンテナにより、図 4 に示すようにビーム半値幅 45 度ビームを 60 度ごとに 6 ビーム形成した 2 種類のパターンを用意した。自基地局からの干渉が大きいとセル間干渉低減による受信 SINR の改善が得られないため、隣接ビーム (60 度ごと) 相互の干渉抑圧比を 25 dB 以上として基地局内干渉を抑えている。その上で、基地局間連携制御により隣接基地局間干渉を低減する。そのため、移動局は隣接基地局が出力する指向性ビームごとの干渉状態を基地局に報告し、基地局は隣接基地局の指向性ビームの出力タイミングと上記干渉状態を照合することで、移動局ごとに干渉のない送信タイミングを計る連携制御 [9] を実施した。パケットスケジューリング方式は SDMA 方式と同様 PF 方式をベースとし、連携制御によるユーザ選択を加えた方法である。

## 2.2 システムシミュレーション

本システムで SDMA 方式と基地局間連携方式の適用領域とシステム伝送容量特性を明らかにするために、表 3 にシミュレーション諸元を示す。

表3 シミュレーション諸元

シミュレーション時間	5000[frame]
トラヒック	常時あり (Full Buffer)
基地局配置	基地局間連携方式: 中心 7 セル (Inter-BTS) SDMA 方式: 中心 1 セル (SDMA) 中心 7 セル以外: Omni 基地局
基地局間距離	2[km]
端末配置	低トラヒック: 16AT/Cell 高トラヒック: 128AT/Cell
端末移動速度	40[km/h] (ドップラー周波数 $f_D=150$ [Hz])
伝搬路	
距離特性	$40\log(d) - 30\log(f_b) + 28\log(f) + 58$ [dB] d[m]: (基地局からの距離) $f_b$ : 50[MHz] (基地局アンテナ高) f: 4[GHz] (キャリア周波数)
シャドウイング特性	対数正規分布
標準偏差	8.9[dB]
基地局間相関	0.5
相関距離	20[m]
フェージング特性	レイリー (12path, 指数減衰, 遅延スプレッド 400ns)
空間角度広がり	5[deg]
適応変調方式	AT の CINR に基づく適応変調・チャネル符号化
端末受信機	
熱雑音	-174[dBm/Hz]
雑音指数	6[dB]
端末アンテナ数	2
基地局間連携基地局	
最大送信電力	47dBm/素子
アンテナビーム利得	16dBi
時定数	1024
最大同時ビーム数	6
スケジュールの共有範囲	中心 7 セルで共有
干渉 Pilot の判定閾値	0.2
干渉 Pilot 報告数	1
SDMA 基地局	
最大送信電力	47[dBm/素子] (送信機最大出力)
アンテナ素子利得	20[dBi] (0)
共通 Pilot beam offset	7[dB]
スケジューリング方式	重み優先法
時定数	1024
方向差条件	30[deg]
最大同時ビーム数	12
ビーム制御方式	DOA と空間角度広がりを考慮
ビーム形成雑音	-10[dB]
ビーム制御誤差	
レベル設定誤差	1.1[dB p-p] (一様分布)
位相設定誤差	11.4[deg p-p] (一様分布)
到来角推定誤差	2.0[deg p-p] (一様分布)
オムニ基地局 (干渉局)	
最大送信電力	47[dBm]
アンテナ利得	16[dBi]

## 2.2.1 SDMA 方式と基地局間連携方式の適用

### (1) 移動局配置特性(トラフィックモデル)

SDMA 方式及び基地局間連携方式は、シングルセル内において一様高トラフィック及びセル境界高トラフィックに対してそれぞれ有利と考え、図5に示すようにトラフィック(移動局)分布モデルを以下のとおり仮定した。

(a) Model-1: SDMA 方式は高トラフィックの中心セルのみ SDMA 基地局、周囲 18 セルはオムニ基地局として SDMA 基地局のスループット特性を評価した。基地局間連携方式は、中心セルを囲む 7 セルでの制御を行い周囲 12 セルはオムニ基地局とした。中心セルにおける移動局の分布は周囲セルに比べて高い密度で配置した。高及び低トラフィックセルの移動局(AT)数は、それぞれ 128 AT/cell 及び 16 AT/cell とした。

(b) Model 2: SDMA 方式はトラフィックが集中するセル境界に隣接するセルを含む中央 4 セルに配置し、基地局間連携方式は中央 4 セルを囲む 14 セルとした。高及び低トラフィックセルの移動局数は、それぞれ 24 AT/cell 及び 16 AT/cell とした。

表4にSDMA方式と基地局間連携方式との比較結果を示す。Model-1ではセル内一様に高トラフィック状態のためにSDMA方式は適応ビーム制御により低干渉で多重通信ユーザ数(平均空間多重数)を多く収容できるため、基地局間連携制御方式に比べスループットで約14%優位であった。Model-2ではセルフリッジに高トラフィックが集中することで、SDMA方式による空間多重数の優位性が低下し、基地局間連携制御による隣接基地局ビームの回避制御による干渉抑圧特性が改善し、SDMA方式とほぼ同等のセルスループット特性が得られていると考えられる。

### (2) 角度広がり特性

トラフィックモデル比較では、埼玉県ふじみ野市のFT結果を考慮して空間角度広がり平均3度程度とした[10]が、都心部などのマルチパス環境では空間角度広がりが増大するために、到来方向推定誤差の増加などによるD/U特性の低下が顕著になると考えられる。本節では、空間角度広がり依存特性について、Model-1を用いて評価した。

図6に空間角度広がりに対するSDMA方式と基地局間連携方式のセルスループット特性を示す。

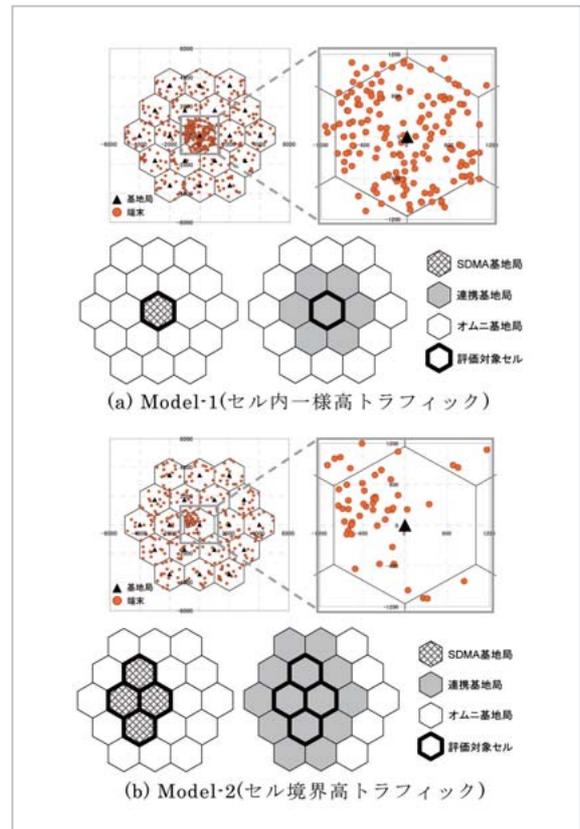


図5 SDMA方式と基地局間連携方式比較モデル

表4 SDMA方式と基地局間連携方式比較

配置モデル	Model-1		Model-2	
	SDMA	連携	SDMA	連携
セルスループット [Mbit/s]	63.3	55.3	30.0	31.2
平均空間多重数	8.8	6.0	4.5	4.1
平均伝送レート [Mbit/s]	7.0	8.7	6.2	8.0

セルスループットは、空間角度広がり 12 deg を境に、基地局間連携方式と SDMA 方式の優位性が変わる。空間角度広がりは、建築物に影響されるために、基地局周辺の建築物の変化に対して SDMA 基地局方式から基地局間連携方式又はその逆に変更することにより、スループット特性の改善が可能と考えられる。

### 2.2.2 平均スループット特性

SDMA 方式及び基地局間連携方式のスループット特性についてシミュレーションを行った。ただし、SDMA セル数は基地局間連携と同じ 7 セルとし比較した。

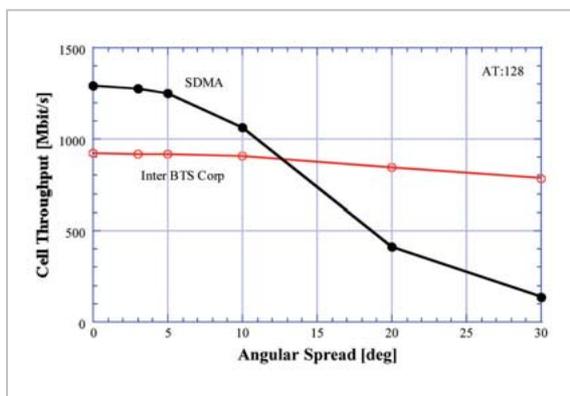


図6 空間角度広がりに対する SDMA 方式及び基地局間連携方式によるセルスループット特性

図7に MU-OFDM-SDMA 方式及び基地局間連携方式のスループット特性を示す。移動局数 10 台以下では、いずれの方式も最大 200 Mbit/s 以上、平均 60 Mbit/s 以上のユーザスループットが得られた。また、移動局数 100 台以上でセルスループット 1.3 Gbit/s (周波数利用効率約 18 bit/s/Hz/cell) が得られた。

### 3 まとめ

第4世代移動通信システムとして、時間、空間及び周波数領域における無線信号処理技術の高度化技術を統合した MU-OFDM-SDMA/基地局間連携システムを提案し、システム最大ユーザ

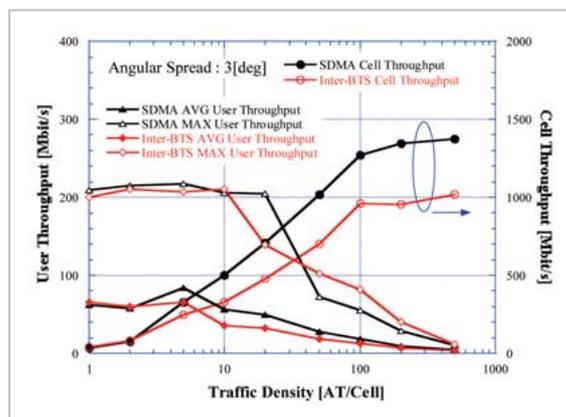


図7 MU-OFDM-SDMA/基地局間連携のスループット特性

スループット 200 Mbit/s 以上、セルスループット 1.3 Gbit/s (周波数利用効率約 18 bit/s/Hz/cell) が得られたことをシミュレーションにより確認した。また、SDMA 方式と基地局間連携方式の適用指針としては、空間角度広がり特性を基準とすることを明らかにした。

### 謝辞

本報告は、情報通信研究機構委託研究「移動通信システムにおける高度無線信号処理技術の研究開発」の成果であり、関係各位に深謝いたします。

### 参考文献

- 川澤ほか, “下り伝送容量 1.3 Gbit/s を実現するマルチユーザ OFDM-SDMA/ 基地局間連携方式による高度移動通信システム”, 信学技報, RCS2005-119, pp.73-78, 2005年11月.
- 吉田ほか, “広帯域移動通信システム向け下りリンク多重方式の比較”, 信学技報, RCS2003-175, pp.135-137, 2003年11月.
- M.Yoshida, et. al., "A Comparison of OFCDM and Segmented-OFDM in Broadband MIMO Downlink Channel", in Proc. IEEE WCNC2004, pp.1182-1187, Atlanta, Mar.2004.
- 赤瀬川ほか, “4 GHz 帯クライオ RF フロントエンドの受信部の試作・評価”, 春季低温工学・超電導学会講演概要集, Vol.72, p.245, 3D-p06, 2005.
- 山中ほか, “小型 4 GHz 帯クライオ RF フロントエンドの開発”, 春季低温工学・超電導学会講演概要集, Vol.72, p.246, 3D-p07, 2005.
- Y.Amano, et. al., "Forward Link Beamforming Performances of FDD-SDMA Packet Cellular Testbed System", Proc. IEEE PIMRC 2005, Berlin, Sep. 2005.
- 天野ほか, “アレーアンテナ用送信キャリブレーション装置の屋外評価”, 信学技報, AP2005-29, pp.113-118, 2005年5月.

- 8 川本ほか, “空間分割多重を用いた無線パケットセルラーシステムの送信ビーム割当法の特性比較”, 2003年信学ソ大, B-5-2, 2003年9月.
- 9 藤嶋ほか, “基地局間で連携動作する時空間パケットスケジューラの干渉低減効果に関する検討”, 信学技報, RCS2004-275, pp.95-100, 2005年1月.
- 10 T.Inoue et. al. "Angular Spread Estimation with Eigenvalue Decomposition Technique", Proc. ISAP 2005, Vol.2, pp.749-752, Aug.2005.



かわざわとしお  
**川澤俊夫**

KDDI株式会社技術開発本部技術戦略部ワイヤレスブロードバンド開発室課長  
無線通信システム、移動通信システム



いのうえ たかし  
**井上 隆**

株式会社KDDI研究所YRPリサーチセンター無線アクセスグループリーダー  
無線通信システム、アンテナ伝搬

ふじしまけんざぶろう  
**藤嶋堅三郎**

株式会社日立製作所中央研究所ネットワークシステム研究部研究員  
移動通信システム

たいら まさのり  
**平良正憲**

株式会社日立コミュニケーションテクノロジーキャリアネットワーク事業部CDMA開発部技師  
移動通信システム

よしだ まこと  
**吉田 誠**

株式会社富士通研究所NGWプロジェクト部主任研究員  
移動通信システム

あかせがわあきひこ  
**赤瀬川章彦**

株式会社富士通研究所新材料研究部超伝導材料及びデバイス