

# Technology Reports

定額制時代の大容量・高効率通信を支える技術特集

## 将来の高速大容量通信に向けた無線要素技術

IMT-Advanced (4G) およびその発展システムにおいては、現在よりはるかに高速大容量な無線伝送が可能になると期待されている一方で、高周波数帯・広帯域利用に伴うさまざまな困難を補償するための技術が必要となる。将来の高速大容量無線アクセスを実現する要素技術について、最新の技術動向や研究の取組みを解説する。

先進技術研究所 大矢 智之 長 敬三  
 ならはし しょういち  
 檜橋 祥一

### 1. まえがき

移動通信技術の発展に伴い、ピーク伝送速度は2年でほぼ倍のペースで向上してきた。しかしながら、固定網における伝送速度は移動通信よりも5年程度先行しており、今後も高速大容量化に対する要求は続くと考えられる(図1)。

また、アンテナや無線回路においても、FOMAシステムのマルチバンド化(800MHz帯、1.7GHz帯、2GHz帯)に対応した共用技術など、システムの高性能化を実現しながら、置局の簡易化が進んでいる。

将来システムとして、国際電気通信連合無線通信部門(ITU-R: International Telecommunication Union-Radio communication sector)<sup>\*1</sup>で検討されているIMT-Advanced<sup>\*2</sup>(4G) [1]においては新周波数帯を利用

した最高1Gbit/s伝送の実現が想定されており、周波数利用効率の向上はもちろんのこと、さらなるマルチバンドに対応した回路技術や高度なアンテナ技術などが重要になってくる。

本稿では、周波数利用効率向上のための無線信号処理技術の1つとして、基地局間協調送信に基づくMIMO (Multiple Input Multiple Output)<sup>\*3</sup>技術の高度化とともに、基地局および移動端末アンテナ技術と、無線回路技術として移動端末用高効率マルチバンド電力増幅器(PA: Power Amplifier)および基地局用線形PAの動向について述べる。

### 2. 将来の高速大容量通信に向けた要求条件と課題

IMT-Advanced (4G) では、3~4GHz帯をはじめとする高周波数帯域の利用が想定されており、第3世

代移動通信システム(2GHz帯)と比較して、3.5~6dB程度伝搬損失が増加することになる[2]。また、さらなる高速データ伝送のために、使用帯域幅も最高100MHz程度と想定されているため、1.25~20MHz幅利用のシステムであるSuper 3G (LTE: Long Term Evolution)<sup>\*4</sup> [3][4]を単純に高周波数帯・広帯域運用したと仮定すると、リンクバジェット<sup>\*5</sup>として最低でも3.5dB、場合によっては十数デシベル以上の追加利得が必要であることになる(表1)。

これらの課題を克服するための要素技術の例を以下に述べる。

### 3. 無線信号処理技術

セルラ環境において、セル端やセクタ境界でのスループットを低下させる要因として、セル/セクタ間の

\*1 ITU-R: 国際連合の電気通信分野における専門機関であり、無線通信規則の改正や、各国間における周波数利用の調整など、無線通信に関する国際的な管理調整業務を行う部門。

\*2 IMT-Advanced: 第4世代移動通信、第3世代移動通信(IMT-2000)の後継システムとしてITU-Rで検討されている。

\*3 MIMO: 送受信に複数のアンテナを配備し、マルチパスによって生じる空間的な伝搬の性質の違いを利用することでアンテナ数に比例して無線リンクの容量を増大させる無線技術。

\*4 LTE: 3GPPでLong Term Evolutionとして検討されている第3世代の拡張規格、ドコモで提唱しているSuper 3Gと同義。

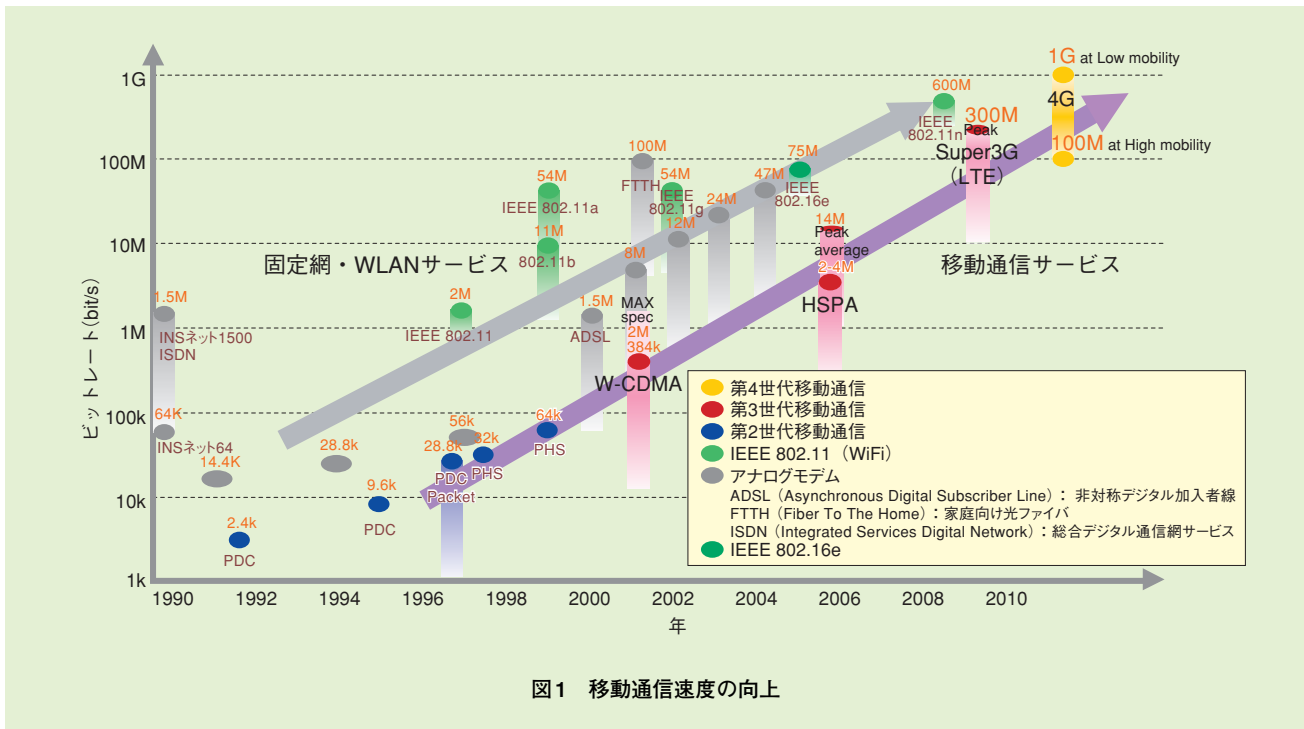


図1 移動通信速度の向上

表1 第4世代移動通信のリンクバジェット

方式	3G	4G	リンクバジェット上の差分
伝搬	2GHz帯	3~4GHz帯	3GHz帯：約3.5dB 4GHz帯：約6dB
使用帯域幅	1.25~20MHz	20~100MHz	20MHzから100MHzへ拡張：7dB 5MHzから100MHzへ拡張：13dB

同一周波数干渉の問題がある。

セル/セクタ間干渉を制御するために、第2世代のPDC (Personal Digital Cellular) では異なる周波数を使用 (周波数間の直交性を利用) し、第3世代のW-CDMAでは異なる拡散符号を使用 (符号間の直交性を利用) している。さらに、Super 3G (LTE) ではOLI (OverLoad Indicator) に基づく低周期のFFR (Fractional Frequency Reuse) が検討されており、セル間干渉を低減することができる[5][6]。そのほか、送信電

力制御、ビームフォーミング\*6、ソフトハンドオフ\*7、周波数繰返し利用\*8 などさまざまな技術があり、GSM (Global System for Mobile communications) における低周期の周波数ホッピング[7]といった実現例やRP (Reuse Partitioning) [8][9]といった研究例が多くなされている。

これらのほかに、基地局間の無線リソースの直交化にMIMOを適用する試みがある。MIMOは空間多重を実現する技術であるため、分散された基地局アンテナ間でMIMOを

適用すれば基地局間の無線リソースの直交化を図ることができ、従来の基地局間非協調型MIMOシステムと比較して高いシステムスループットを達成することができる (図2) [10]~[16]。

(1)SU-MIMOとMU-MIMO

SU-MIMO (Single User-MIMO) と、DPC (Dirty Paper Coding)\*9 によるMU-MIMO (Multi User-MIMO) は、総受信アンテナ数が等しい場合に達成できる総容量の上限は同じであるが、MU-MIMOの方が、よりアンテナ間相関を低減できる可能性があることや、マルチユーザダイバーシチ効果による平均容量の向上の効果が期待できる利点がある (図3)。

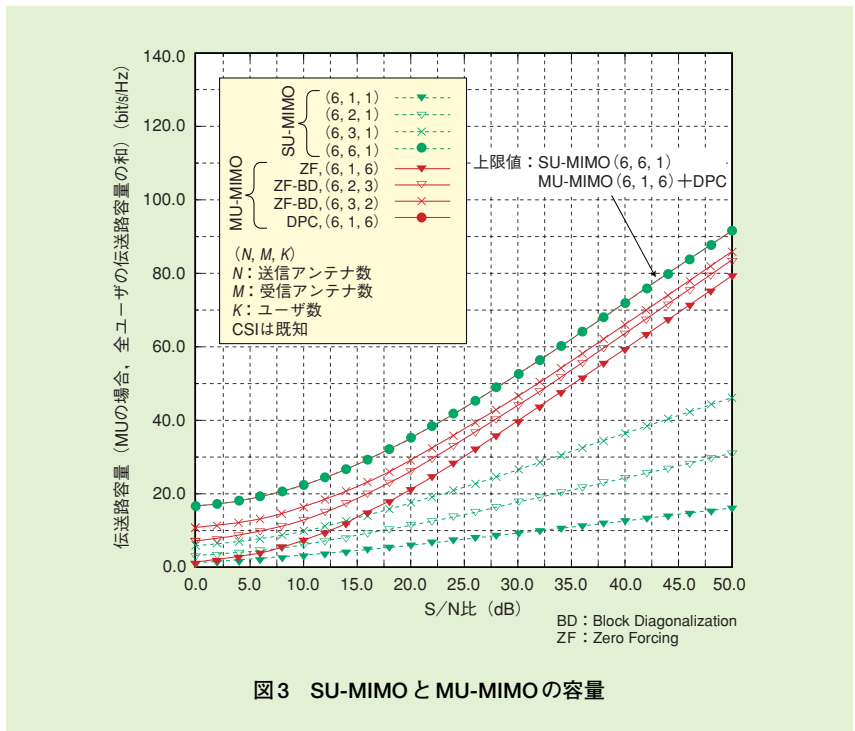
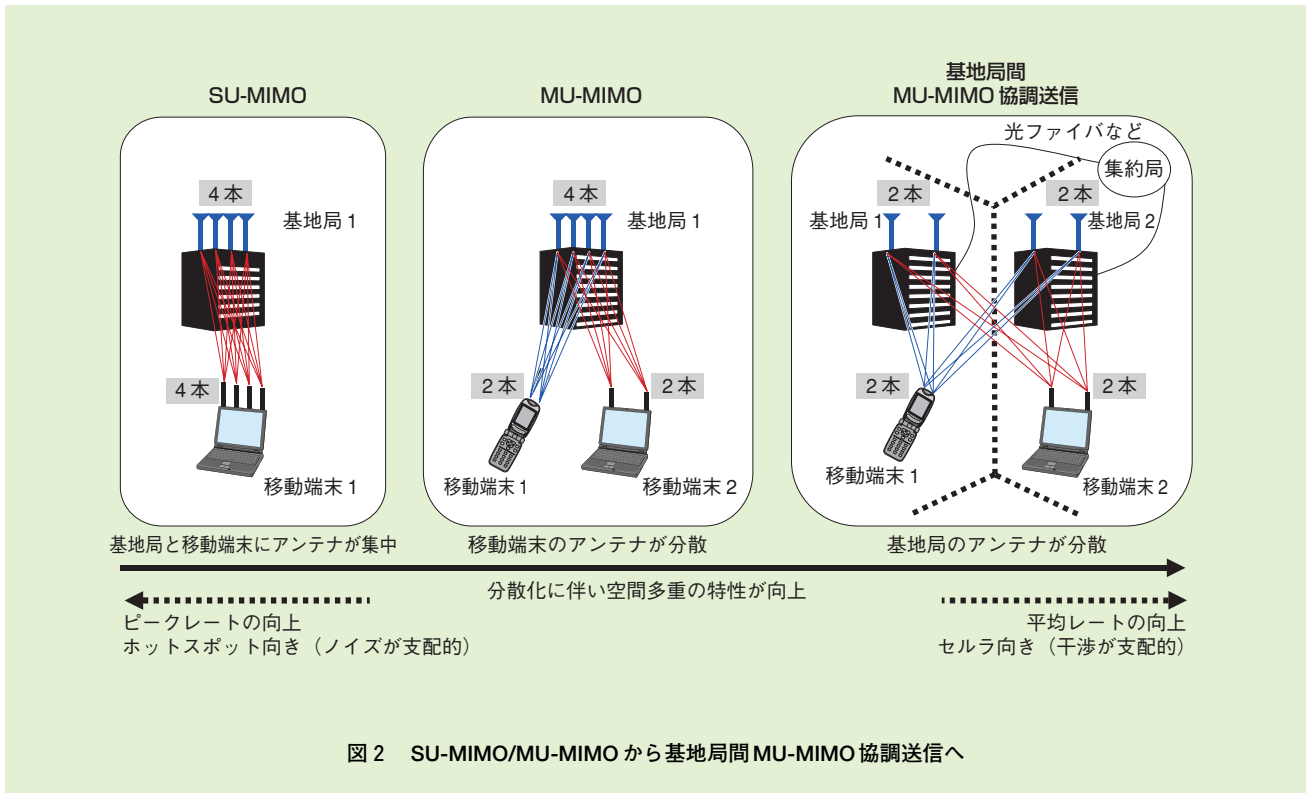
また、MU-MIMOでは送信側で伝送路状態 (CSI: Channel State

\*5 リンクバジェット：基地局と移動端末の間の平均的な電力レベル配分の設計値のこと。送信電力や周波数、受信感度などの各種無線パラメータから、セル半径を算出する場合などに用いられる。

\*6 ビームフォーミング：複数のアンテナの位相の制御によってアンテナに指向性パターンを形成し、特定方向に対するアン

テナ利得を増加/減少させる技術。  
\*7 ソフトハンドオフ：ハンドオフ技術の1つであり、移動端末が複数の基地局をまたがって移動する際に、複数の基地局と同時に無線リンクを確立することを特徴とする。ソフトハンドオフの効果は、ハンドオフ時の瞬断時間の短縮や、セル端における受信品質の向上である。

\*8 周波数繰返し利用：利用可能な周波数を複数のグループに分割し、隣接する基地局で異なる周波数グループを利用することで、セル間の干渉を低減させる技術。



Information) を知る必要があるものの、移動端末に多数のアンテナを搭載することが困難な状況での、平均容量の向上に適している側面もある。

(2)基地局間MU-MIMO 協調送信

基地局アンテナを分散配置することにより、到来波の角度広がりが増加し、空間多重の特性が向上する可能性がある。また、基地局当りのアンテナ数を低減させることができ、実装や運用における利点につながることも考えられる。

(3)基地局間 MU-MIMO 協調送信の適用シナリオ

基地局間 MU-MIMO 協調送信を既存の移動通信システムに適用する場

\* 9 DPC：干渉キャンセルのための符号化技術の1つ。DPCでは、受信際の干渉がゼロとなるよう、送信機にて干渉の補償処理が実施される。送信側に送信信号の他に受信側の干渉信号の情報が必要である。

合、複数の基地局間で信号処理のための多量の情報を交換する必要がある、図4(c)に示すような多数基地局間の協調は現実的ではない。一方、図4(a)に示す基地局内(セクタ間)協調はもっとも実現が容易であるが、FOMA網で広く使用されている光張出し[17]の構成を利用すると、図4(b)に示すように少数基地局をクラスタ化して協調させることも可能と考えられる。

限られた基地局をクラスタ化し、基地局間MU-MIMO協調送信を行った検討例として、7基地局間で協調を行った場合の中央セル境界付近のユーザは、SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) の中央値が最大で5dB程度向上することが示されている[18]。

## 4. アンテナ技術

### 4.1 基地局アンテナ

高速伝送実現に向けたアンテナの技術課題を図5に示す。高周波数帯では伝搬損失やアンテナ給電部の損失が増大するため、アンテナ利得の増大・アンテナ給電部損失の低減が必要となる。アンテナ利得が増加すると指向性が鋭くなるため、移動端末を追尾するアダプティブアンテナアレー<sup>\*10</sup>が必要となる。アダプティブアンテナアレーのシステム適用検討結果はドコモをはじめ、その有効性が多数報告されている[19][20]。今後IMT-Advancedに向け、広帯域化への対応や、MIMO伝送との制御の切替法なども重要な課題となる。

アンテナ給電部の損失低減には、増幅器などのアクティブ素子をアン

テナに一体化するアクティブアンテナ構成が提案されており、衛星放送受信アンテナなどで実用化されている。セルラシステムの基地局受信装置に本構成を適用すると、移動端末の送信出力や消費電力の低減に大きく寄与すると考えられる。基地局アンテナにアクティブアンテナ構成を適用するうえで、アンテナと回路の性能を統合的に考えて、より作りやすい構成を実現する目的で、フィルタ機能をアンテナにもたせる検討などを進めている[21]。

### 4.2 移動端末アンテナ

移動端末においてはマルチアンテナ伝送やワンセグや無線ICカードなどさまざまな機能の要求のため、複数システム間でアンテナを共用することなどによるアンテナ

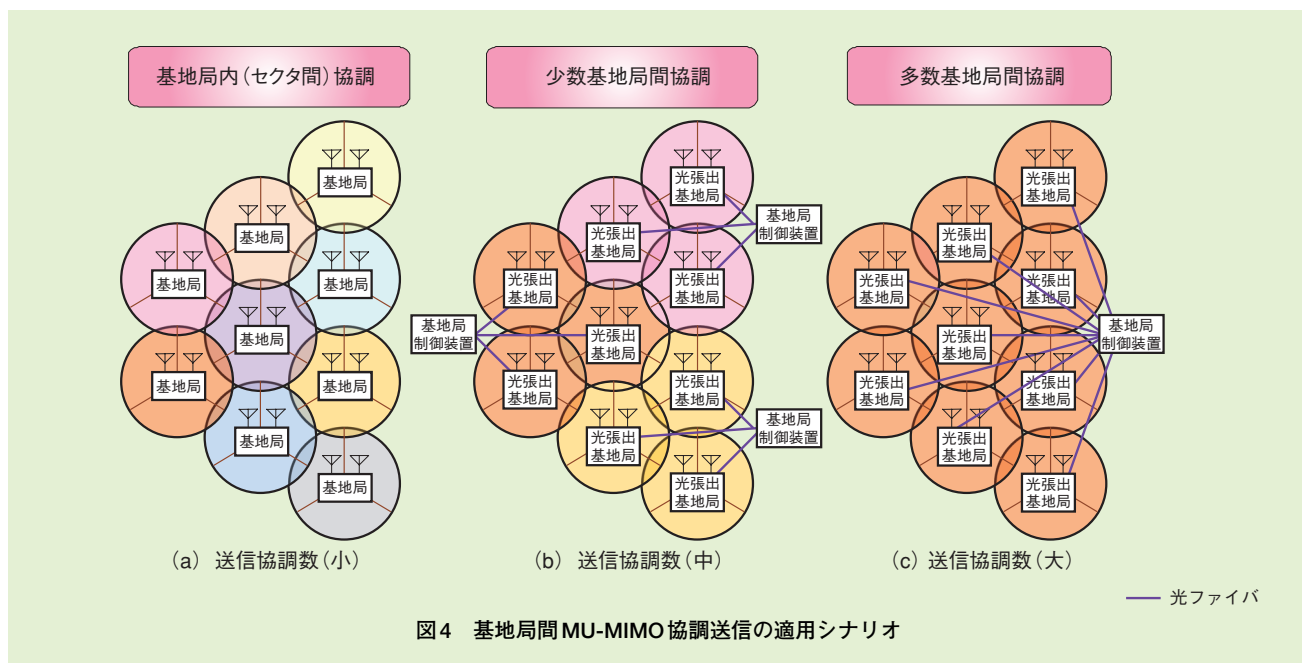


図4 基地局間 MU-MIMO 協調送信の適用シナリオ

\*10 アダプティブアンテナアレー：複数のアンテナ素子を並べて配置し、各素子で受信する信号に重み付けをして合成することにより、アンテナの指向性を適応的に変えることができるアンテナ。指向性の形成は、ベースバンドのデジタル信号に対して、デジタル信号処理により各素子の信号に重み付けを行うデジタルビー

ムフォーミング構成が一般的である。

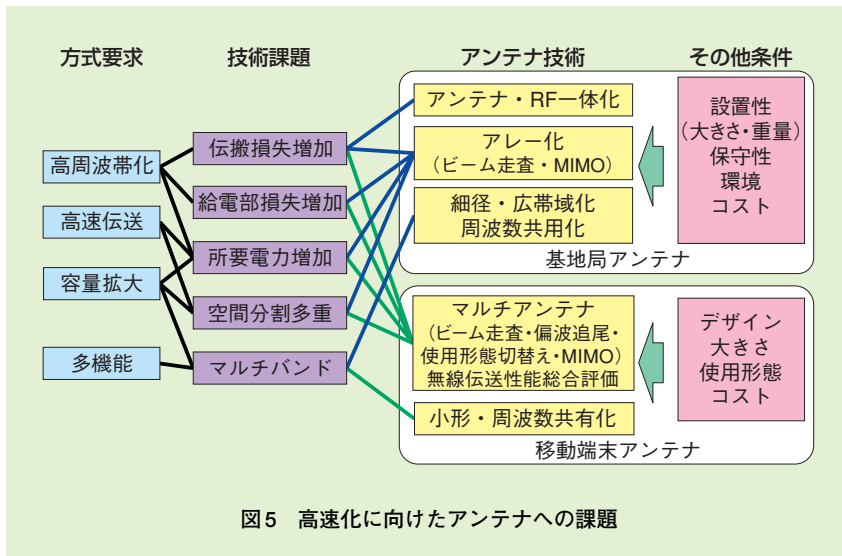


図5 高速化に向けたアンテナへの課題

容積削減が重要な課題となっている。また特にマルチアンテナ伝送においては、電波の到来環境や実使用状態、総合的な無線伝送性能まで考慮したアンテナ性能評価技術の確立、アンテナ性能改善が重要であり、実使用を考慮したアンテナ配置法、性能評価法についてドコモをはじめ積極的に検討されている[22]~[26]。

## 5. 無線回路技術

PAは無線回路の重要デバイスの1つであり、移動端末用PAのマルチバンド化と、高い非線形ひずみ補償能力を有し高効率動作可能な基地局用線形PA構成法の確立、という主要課題がある。

### 5.1 移動端末用PAのマルチバンド化

移動端末の無線回路部に関して、現状のFOMA端末では周波数帯

(800MHz帯, 1.7GHz帯, 2GHz帯)ごとに回路を搭載することでマルチバンド化(対応周波数帯の追加)を図っている[27]が、この手法でのさらなるマルチバンド化は移動端末の大きさの点から困難である。1つの無線回路で複数の周波数帯に対応させる手法として、回路の広帯域化、リアクタンス可変素子<sup>\*11</sup>の適用などがある。MEMS(Micro Electro-mechanical Systems)技術<sup>\*12</sup>を用いたMEMSスイッチ[28][29]は、無線周波数帯でもオン時の低挿入損失とオフ時の高アイソレーション<sup>\*13</sup>を両立でき、低ひずみである点で近年注目されている。ドコモではMEMSスイッチの利点を活かしたPAのマルチバンド化を検討している[30]。MEMSスイッチを用いた900MHz帯, 1.5GHz帯, 2GHz帯, 2.6GHz帯の4バンド1W級PAモジュールの試作例を図6に示す[31]。入力側と出力側の同じ番号のMEMSスイッチ

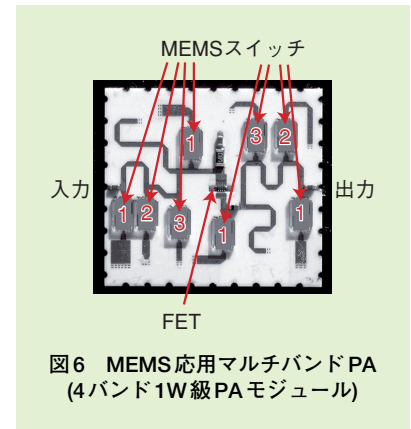


図6 MEMS応用マルチバンドPA (4バンド1W級PAモジュール)

に関して、1番をオンにすれば900MHz帯で、2番をオンにすれば1.5GHz帯で、3番をオンにすれば2GHz帯で、そして、すべてオフにすれば2.6GHz帯でそれぞれ動作する。また、実用化の観点から、さらなる小型化、ひずみ補償・送信電力制御時の低消費電力化などに対するマルチバンド化手法の確立が課題である。

### 5.2 基地局用線形PA構成法の確立

基地局用線形PAの構成では、PAで発生する非線形ひずみを効果的に補償するとともに高効率に動作させることが要となる。FOMAシステムでは低消費電力化および変復調部(デジタル信号処理)との親和性の観点から、非線形ひずみ補償法としてデジタルプリディストorter(DPD: Digital PreDistorter)<sup>\*14</sup>を採用している。高効率動作の観点では、ドハティ増幅器<sup>\*15</sup>が着目されるとともにドハティ増幅器とDPDを組み合わせる構成が提案され[32][33]、PA

\*11 リアクタンス可変素子：リアクタンスとは、直流回路における抵抗のように、交流回路のコイルやコンデンサにおける電圧と電流の実効値を関連づける量のこと。リアクタンスでは電力は消費されないため、抵抗とは区別する。リアクタンス可変素子とは、リアクタンスの値を可変にできる素子であり、代表的なものとして可変容量ダイオードがある。

\*12 MEMS技術：MEMSとは、半導体と同様のプロセスによってセンサ、アクチュエータ、電気回路が集積化された、微小寸法電気機械システムのこと。MEMS技術とは、MEMS製造に用いられる半導体製造技術、電気回路技術、機械加工技術などの技術を体系的に統合した技術のこと。

\*13 高アイソレーション：アイソレーションとは、信号の分離度を表す指標であり、スイッチの場合ではオフ状態での信号の漏れる度合いを表す。高アイソレーションとはアイソレーションの高い状態であり、アイソレーションが高いほど信号の漏れが少なく、スイッチとして良好な特性を示す。

の飽和点近傍で動作させる方法が検討された。

飽和点近傍においては従来のDPDでは補償困難な、周波数に依存する非線形ひずみが発生することから、DPDの補償能力改善が求められる。ドコモではこれを可能とするDPDを考案[34]するとともにドハティ増幅器との組合せ評価[35]およびB級PA<sup>\*16</sup>との組合せ評価[36]を実施している。考案したDPDの非線形ひずみ補償例を図7に示す。基地局用線形PAのさらなる高効率化に向け、PAへの入力信号の包絡線に基づきPAの動作点を適応的に制御する構成（Envelope Tracking）などが検討されている[37]。

## 6. あとがき

本稿では、将来の高速大容量移动通信システムを支える無線要素技術の動向について述べた。また、

MIMO技術を発展させ、基地局間干渉を制御しながらシステムスループットを向上させる技術や、基地局・移動端末アンテナの高度化技術、PAのマルチバンド化・高効率化技術などの動向や技術課題を明らかにした。

今後はこれらの課題の解決を図り、実システムへの適用についてさらに検討を進める予定である。

## 文献

- [1] ITU-R Recommendation M.1645 : “Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000,” 2003.
- [2] 北尾 光司郎, 市坪 信一: “第4世代移动通信システムの市街地伝搬損失推定式,” 第485回電波研連F分科会資料, Jun. 2004.
- [3] 中村, ほか: “Super 3Gの技術動向 その1 Super 3Gの概要および標準化活動状況,” 本誌, Vol.14, No.2, pp.50-54, Jul.2006.

- [4] 安部田, ほか: “Super 3Gの技術動向 その2 Super 3Gの技術検討,” 本誌, Vol.14, No.3, pp.63-69, Oct.2006.
- [5] 3GPP, RAN1, R1-073674 : “Overload Indicator handling for LTE”
- [6] 3GPP, RAN1, R1-074477 : “Way forward on UL ICIC/Overload Indicator for LTE”
- [7] C. Carneheim, S-O, Jonsson, M. Ljyunberg, M.Mad-fors and J. Naslund : “FH-GSM Frequency Hopping GSM,” IEEE 44th VTC, Jun. 1994.
- [8] S. W. Halpern : “Reuse Partitioning in Cellular Systems,” IEEE Veh. Tech. Conf., pp.323-327, May. 1983.
- [9] H. Furukawa and Y. Akaiwa : “Self-organized reuse partitioning, a dynamic channel assignment method in cellular system,” IEEE 43rd Veh. Tech. Conf., pp.524-527, May. 1993.
- [10] M. K. Karakayali, G. G. Foschini, R. A. Valenzuela and R. D. Yates : “On the Maximum Common Rate Achievable in a Coordinated Network,” Proc. ICC'06, Jun. 2006.
- [11] M. V. Clark, T. M. Willis III, L. J. Greenstein, A. J. Rustako, V. Erceg and R. S. Roman : “Distributed versus centralized antenna arrays in broadband wireless networks,” IEEE VTC Spring, Vol.1, pp.33-37, 2001.
- [12] W. Roh and A. Paulraj : “Outage performance of the distributed antenna systems in a composite fading channel,” IEEE VTC Fall, pp.1520-1524, 2002.
- [13] C. Shen, S. Zhou and Y. Yao : “Comparison of channel capacity for MIMO-DAS versus MIMO-CAS,” APCC, pp.21-24, 2003.
- [14] S. Han, S. Zhou, J. Wang and W. Park : “Capacity analysis of generalized distributed wireless communication system and transmit antenna selection for maximization of average coverage,” IEEE VTC Fall, pp.2186-2190, 2004.

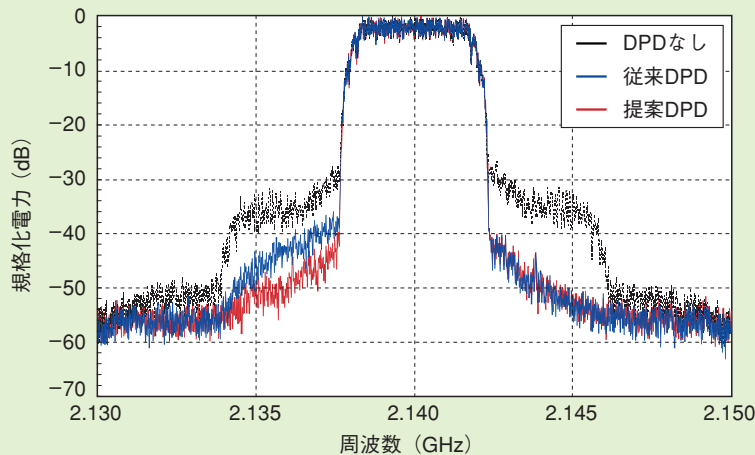


図7 2GHz帯QPSK変調波を用いた非線形ひずみ補償特性例

\*14 デジタルプリディストータ (DPD) : プリディストータとは、電力増幅器の非線形ひずみを補償する方法の1つである。電力増幅器で発生する非線形ひずみを予測して、ひずみの逆特性をもつ信号を電力増幅器への入力信号に加える操作を行う。デジタルプリディストータとは、この操作をデジタル信号処理により行う。

\*15 ドハティ増幅器: キャリア増幅器およびピーク増幅器の2つを並列合成して構成される増幅器。ドハティ増幅器への入力信号レベルの高低に応じて、キャリア増幅器およびピーク増幅器の増幅特性を利用することにより、広い範囲の入力信号レベルで効率の高い増幅動作を狙う。

\*16 B級PA: 電力増幅器構成法の1つであり、交流の入力信号のうち半周期分のみが増幅されるようにPAを構成したものの、B級PAの最大効率率は約78%であるため、大電力増幅回路に用いられる。

- [15] X. Yu, G. Chen, M. Chen and X. Gao : "Toward Beyond 3G : The FuTURE Project in China," IEEE Communications Magazine, Vol.43, No.1, pp.70-75, Jan. 2005.
- [16] Y. Song, K. Wu and X. Zhu : "Coexistence of collaborative MIMO with single-base-station based MIMO," C80216m-07\_163, 2007.
- [17] 大矢根, ほか : "IP化対応無線基地局装置の開発," 本誌, Vol.15, No.1, pp.8-13, Apr. 2007.
- [18] 白壁 将成, ベンジャブール アナス, 萩原 淳一郎, 大矢 智之 : "基地局間 MU-MIMO 協調送信に関する特性評価," 信学総大, B-5-83, Mar. 2008.
- [19] 佐和橋, ほか : "W-CDMA技術 その6 W-CDMAにおけるリンク容量増大技術," 本誌, Vol.9, No.4, pp.44-70, Jan. 2002.
- [20] Y. Ogawa and T. Ohgane : "Advances in adaptive antenna technologies in Japan," IEICE Trans. Commun., Vol. E84-B, No.7, pp.1704-1712, Jul. 2001.
- [21] 蔣恵玲, 山口 良, 長 敬三 : "短冊状素子によるスロット励振パッチアンテナの送受信間結合低減特性," 信学技報, AP2007-83, Sep. 2007
- [22] 岡野 由樹, 長 敬三 : "マルチバンド逆Lアンテナを用いたPDA端末用マルチアンテナの基本特性," 信学技報, AP2006-98, Dec. 2006.
- [23] 小柳 芳雄, 林 俊光, 佐藤 浩 : "端末内蔵型  $2 \times 2$  MIMO用アレーアンテナの基礎検討," 2005年信学ソ大会 B-1-227, Sep. 2005.
- [24] K. Karlsson, J. Carlsson and P.-S. Kildal : "Reverberation Chamber for Antenna Measurements: Modeling Using Method of Moments, Spectral Domain Techniques, and Asymptote Extraction," IEEE Trans. AP, Vol.54, No.11, pp.3106-3113, Nov. 2006.
- [25] 岩井 浩, 坂田 勉, 山本 温, 小川 晃一, 梅田 快貴, 阪口 啓, 荒木 純道 : "移動体端末アンテナ評価用フェーシングエミュレータの提案," 信学技報AP2004-35, May. 2004.
- [26] 岡野, ほか : "移動体端末用アンテナ測定システムの開発," 本誌, Vol.15, No.2, pp.40-46, Jul. 2007.
- [27] 小岩, ほか : "マルチバンド移動体端末の開発," 本誌, Vol.14, No.2, pp.31-37, Jul. 2006.
- [28] H.J. De Los Santos : "RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications," Artech House, 2002.
- [29] G. M. Rebeiz : "RF MEMS Theory, Design, and Technology," John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [30] A. Fukuda, H. Okazaki, T. Hirota and Y. Yamao : "Novel Band-Reconfigurable High Efficiency Power Amplifier Employing MEMS Switches," IEICE Trans. Electron., Vol.E88-C, No.11, pp.2141-2149, Nov. 2005.
- [31] H. Okazaki, A. Fukuda, K. Kawai, T. Furuta and S. Narahashi : "MEMS-based Reconfigurable RF Front-end Architecture for Future Band-free Mobile Terminals," Proc. 37th EuMC, pp.1058-1061, Oct. 2007.
- [32] O. Hammi, S. Bousnina and F. M. Ghanouchi : "A linearized Doherty amplifier using complex baseband digital predistortion driven by CDMA signals," in Proc. Radio and Wireless Conference, pp.435-438, Sep. 2004.
- [33] W-J Kim, K-J Cho, S. P. Stapleton and J-H Kim : "Piecewise pre-equalized linearization of the wireless transmitter with a Doherty amplifier," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.54, No.9, pp.3469-3477, Sep. 2006.
- [34] S. Mizuta, Y. Suzuki, T. Hirota and Y. Yamao : "Digital predistortion linearizer for compensating frequency-dependent IM distortion," in 34-th European Microwave Conference Digest, pp.1053-1056, Oct. 2004.
- [35] Y. Suzuki, S. Mizuta, T. Hirota and Y. Yamao : "Linearized Doherty amplifier using a new digital predistorter compensating frequency-dependent intermodulation distortion for mobile radio," in Proc. 10-th Asia-Pacific Conference on Communications, pp.558-562, Sep. 2004.
- [36] S. Mizuta, Y. Suzuki, S. Narahashi and Y. Yamao : "A new adjustment method for the frequency-dependent IMD compensator of the digital predistortion linearizer," in IEEE Radio and Wireless Symposium Digest, No.WE3A-2, pp.255-258, Jan. 2006.
- [37] D. F. Kimball, J. Jeong, C. Hsia, P. Draxler, S. Lanfranco, W. Nagy, K. Linthicum, L. E. Larson and P. M. Asbeck : "High-efficiency envelope-tracking W-CDMA base-station amplifier using GaN HFETs," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.54, No.11, pp.3848-3856, Nov. 2006.