

移動通信システムの発展と技術課題



東京工業大学大学院
理工学研究科 集積システム専攻
教授 鈴木 博

1 まえがき

日本の本格的な公衆移動通信システムは、1979年12月に自動車電話システムとして導入され、その後は携帯電話として飛躍的に発展した。その30年の発展の概略を振り返るとともに、無線アクセスに関連する技術のトレンド、技術課題を考察してみよう。

2 移動通信システムの発展

2.1 概略

移動通信システムの発展の概略を、第1図に示す。この発展は、高い利便性を実現するための周波数利用効率向上技術と、より高い無線周波数への移行による帯域拡大がもたらしたものである。ハードウェア実現という観点から、半導体集積回路技術の発展が必須であったことは言うまでもない。周波数利用効率向上のために、時間・

周波数領域における変復調技術、多元接続技術および空間領域における周波数リユース技術が重要な役割を果たしてきた。周波数リユースはセルラーコンセプトに従っている。このコンセプトは、エリアをセルに分割し、セルの集合であるクラスタ単位で同じ周波数を場所的に繰り返し、更にもそのセルが需要に応じて細胞のように分裂していくというものである^{1), 2)}。この空間領域の技術は、時間・周波数領域の技術と密接に関係しており、周波数利用効率により定量化されている。

2.2 周波数利用効率

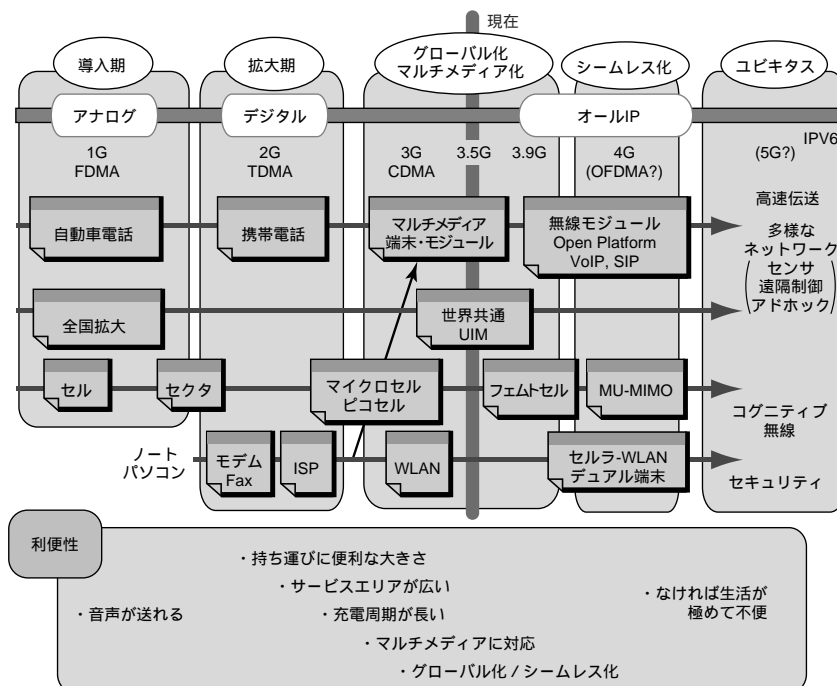
周波数利用効率は、以下の観点から検討されてきた³⁾。

スペクトル利用効率, η_f [bit/s/Hz]

一定の帯域と送信電力のもとで、なるべく多くのビット情報を伝送できる高能率変調技術の指標

場所的利用効率, η_s [1/km²]

同じ周波数をなるべく近距離で再利用できる耐干渉技



第1図 移動通信システムの発展の概略

術の指標

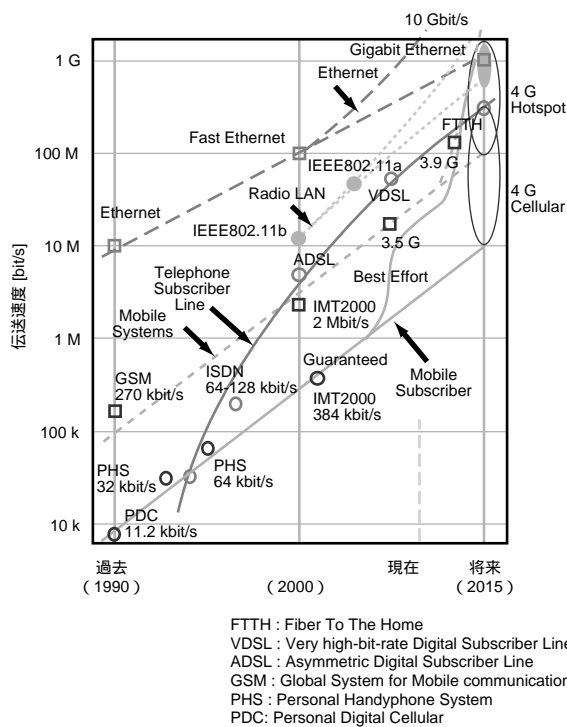
時間的利用効率, η_t

多くのチャンネルを多くのユーザーが時間的に効率よく共用する多元接続技術の指標

これらの効率は独立ではなく、トレードオフの関係にあり、総合的にはシステム全体の利用効率 $\eta = f_s \eta_t$ により評価される。

2.3 情報伝送速度

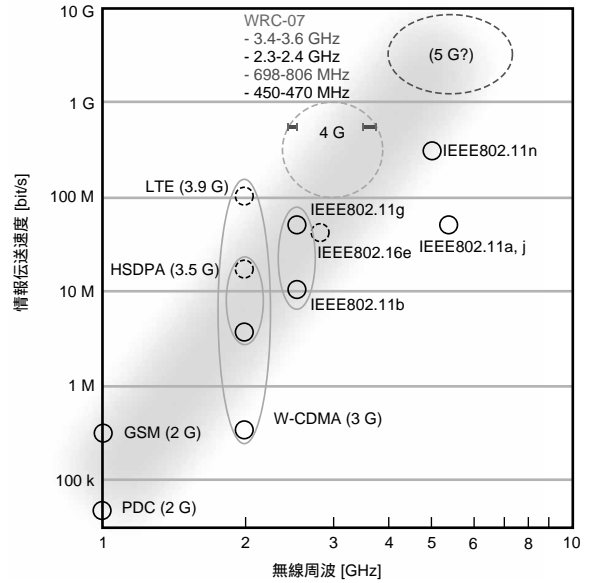
周波数利用効率 η_f は、そのシステムの質を評価するために重要である。この η_f とシステムの無線周波数帯域幅 W_s との積 $\eta_f W_s$ が、システムのユーザー数または情報伝送速度を直接規定する。情報伝送速度の推移を、第2図に示す。EthernetTM(注1)の高速化に伴って、無線LAN、セルラーも高速化している。すでに実験レベルでは、単一セルのセルラー伝搬環境において5 Gbit/sが実現されている^{4), 5)}。



第2図 移動無線システムの高ビットレート化

2.4 無線周波数

帯域幅 W_s を広げるために、移動通信用無線周波数の高周波化が進められてきた。従来のシステムのビットレートと無線周波数との関係を、第3図に示す。この図が示唆



第3図 無線周波数とビットレート

するように、将来の数Gbit/sを実現するシステムは4 GHz以上であろう。

端末機器周辺の無線接続に用いられるローカルコネクトでは、数Gbit/sから10 Gbit/sの60 GHz帯ミリ波システムが検討されている⁶⁾。2015年頃にSi-CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) の f_T (遮断周波数) が600 GHzに達すると見積もられており、ここでの課題は、60 GHz RF (Radio Frequency) 回路と、最大10 Gbit/sのベースバンド回路とを一体化したICチップの設計法を確立し、実現することである。ICの低電圧化に伴う、ミリ波回路雑音による伝送特性劣化を低減する技術が必要である。

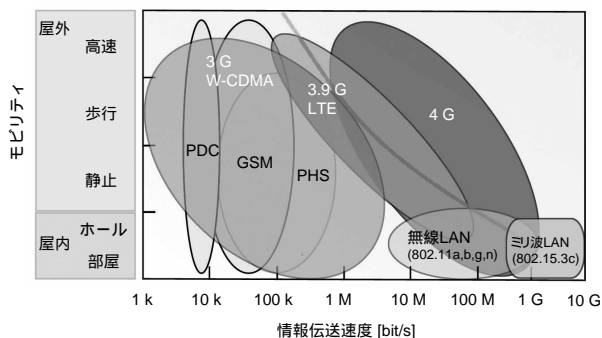
なお、送信電力は同じ到達距離ならば高速化に伴い一般的には増加する。広帯域線形送信電力増幅器については、CMOS-IC化とは別に、引き続き高い電力効率を追求する必要がある。

2.5 将来のセルラー方式

第4世代 (4G) セルラーシステムへの周波数割り当てがITU (International Telecommunication Union) の世界無線通信会議 (WRC: World Radio communication Conference) で2007年に採択されて以来、4Gに向けた議論が盛んである^{7), 8)}。4Gは、ITU-R (International Telecommunication Union-Radio communication sector) ではIMT-Advanced とよばれている。

情報伝送品質は移動速度に大きく依存する。移動速度に関するパラメータは、モビリティとよばれている。第4図は、モビリティと情報伝送速度との関係を示す。サボ

(注) 米国Xerox社の登録商標



第4図 モビリティと情報伝送速度

ート領域が世代ごとに右方向へシフトしている。将来、屋内とホットスポットでは無線LANと4Gが競合することもあり得る。

3GPP (Third Generation Partnership Project) は、W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access), HSPA (High Speed Packet Access) から LTE (Long Term Evolution) へ、更にLTE-Advancedへとセルラーの高度化に向けてシステム仕様の標準化を進めている。そのロードマップを、第5図に示す。

3 伝送技術

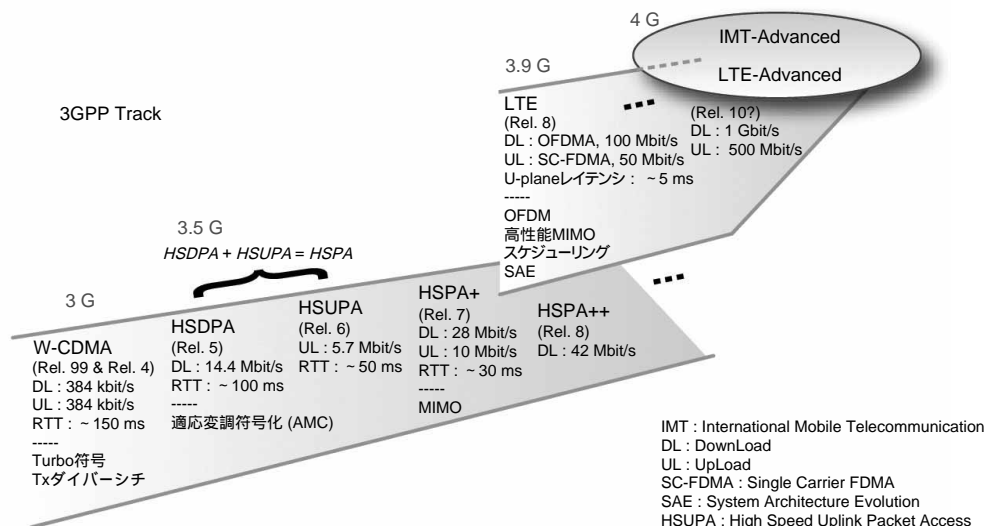
3.1 変復調技術

スペクトル利用効率を上げるために、移動通信の高性能デジタル変調技術が研究・実用化されてきた。TDMA (Time Division Multiple Access) ではGMSK (Gaussian filtered Minimum Shift Keying), $\pi/4$ シフト QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), CDMAではOQPSK

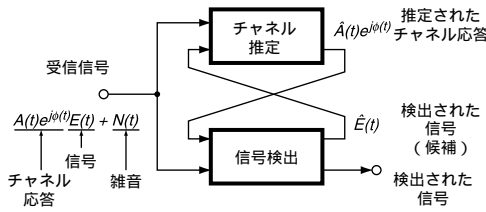
(Offset QPSK), HPSK (Hybrid Phase Shift Keying) が使われている。HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) では適応変調符号化 (AMC: Adaptive Modulation and Coding) が採用され16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) も用いられる。さらに、LTEではOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が採用され、サブキャリア変調に64QAMも用いられる。このような時間・周波数領域の変復調技術により、初期の1 bit/s/Hzから6 bit/s/Hzに向上している。LTEでは送受信機にそれぞれ複数のアンテナを配置し、空間多重を行うMIMO (Multiple Input Multiple Output) が採用されている。屋外実験レベルでは12×12 MIMOにより、50 bit/s/Hzを超えることも可能である⁵⁾。

フェージングによる振幅、位相変動が激しい移動通信環境において、高性能変復調における誤り率を低減するために、空間・時間・周波数ダイバーシチ技術が駆使されてきた。具体的には、アンテナ・ダイバーシチ受信、適応等化、RAKE、誤り訂正、ハイブリッドARQ (Automatic Repeat reQuest) などがある。最近では、インターネットにおけるQoS (Quality of Service) を確保するために遅延に関するRTT (Round Trip Time) の短縮も検討されている。

フェージング変動条件でMIMOを含む高性能変調方式の伝送特性を確保するため、信号を復調する際にチャンネルの正確な測定を適応的に行う。第6図に、そのための基本構成を示す。パケットの最初のトレーニング信号区間において無線チャンネル推定を行い、その結果を用いて続くデータ区間で送信された信号を検出する。変動の激しい条件では、検出された信号で無線チャンネル推定をアップデートしなければならない。この繰り返しにより高速モ



第5図 3GPPにおけるロードマップ



第6図 チャンネル推定と信号検出との基本的な関係

ビリティを確保するが、実際には処理量をにらみながら伝送系に合わせた最適化が必要である。

3.2 周波数リユースと干渉制御技術

高能率変復調方式の性能を引き出すためには、同一周波数を利用する他セルからの同一チャンネル干渉が十分抑制されている必要がある。以下では、3つの観点から考察する。

【1】セルサイズの低減

周波数リユースは、第1図に示したようにセルのクラスタ単位のものから始まり、セルを扇形に分割するセクタ方式、セルサイズを縮小したマイクロセル、ピコセルが利用されている。最近ではフェムトセルも検討されている⁹⁾。このようにエリアを小さくするとき、基地局アンテナは低い位置に設定されるので、ビルなどの遮蔽(しゃへい)により電波伝搬が複雑になるとともに、電波の強弱の差が大きくなる。今後、フェムトセルが屋内へ導入されれば、この傾向はますます強まる。そのため、基地局数を増やせば、希望波レベルが高く、干渉波レベルが低い場所を容易に形成でき、高能率変調が有効になる。また、限られた範囲だけ電波が届くように送信電力制御をすれば、基地局周辺は干渉を受けにくくなる。これは、セルをリング状に分割するリユース・パーティションと同等であり、高い周波数利用効率が得られる。

MIMOでは、無線チャンネルの固有モードに基づく更にきめ細かな周波数リユースが可能である。そのため、MIMOの大きなキャパシティを複数のユーザーでシェアするMU-MIMO (MultiUser-MIMO) の検討は非常に重要である。

【2】ローカルなネットワークの制御

小さなエリアの代表であるIEEE802.11無線LANは、CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) によりパケット衝突を回避しているが、アクセスポイントの密度が高くなり、パケットの発生頻度も高くなるとスループットが極めて低下し、遅延も増大する。また、隠れ端末問題、さらされ端末問題がある。Gbit/sをハンドリングでき、かつアクセスポイントが増大しても、セルラーのように干渉を制御可能なシステムが必要である。

一時的に形成されるアドホックなネットワーク、小規模なフェムトセルのネットワークでは、伝搬環境は極めてローカルであり、またセル形状やセル相互の干渉条件などは比較的短期間に变化するので、中央制御で干渉制御を最適化することは難しいと考えられる。アクセス制御、パケットスケジューラ、経路制御などを考慮した干渉制御の最適化には自律分散制御による自己組織化ネットワークが不可欠であろう。このとき、周囲の状況をモニタするためにアンテナアレー技術は必須と考えられる。MIMO技術はこのような状況の最適化にも有効と考えられる。

【3】マルチホップ・リレー

干渉を増やさずにセルエッジにおける高速伝送を確保するために、マルチホップ・リレー方式の導入は必須である。受信された信号を、復号せずにそのまま中継するAF (Amplify and Forward)、復号してから中継するDF (Decode and Forward) がある。遅延と周波数有効利用の観点からネットワーク・コーディング、DPC (Dirty Paper Coding) による協力中継などが検討されている。さらに、MIMOの伝送特性を引き出すためにはマルチパスが多いことが必要であるが、その条件を満たさない環境では、リレー技術を適用して人工的にマルチパス環境を生成することも考えられる。これらの最適化のためには、確率をベースとしたファクタ・グラフによるメッセージ・パッシングの分析、ベイズ理論による最適化も必要になるであろう。

4 むすび

移動通信システムの発展について概略を述べた。周波数利用効率、無線周波数、モビリティの観点からシステムの動向を述べた。また、最後に干渉抑圧という観点から今後のシステムの技術課題について考察した。

高度な無線技術のハードウェア実現を可能にしたのは、半導体集積回路技術である。60 GHzミリ波システムに向けて研究・開発されているような十分高性能化されたSi-CMOS IC化技術は、将来の無線通信技術におけるMIMO、リレーシステムなどの高度化・小形化に大いに貢献すると考えられる。

参考文献

- 1) V. H. MacDonald : The cellular concept. Bell Syst. Tech. Jour. 58, No.1, pp.15-42 (1979).
- 2) 中嶋信生 : セル構成技術の進展 NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル 1, No.2, pp.21-29 (1993).
- 3) H. Suzuki. et al. : Spectrum efficiency of M-ary PSK land mobile radio. IEEE Trans. on Commun. COM-30, No.7, pp.1803-1805 (1982.7).
- 4) H. Taoka, et al. : Field experiments on ultimate frequency efficiency over 30 bit/second/Hz using MLD signal detection in MIMO-OFDM broadband packet radio access. IEEE VTC2007-Spring, pp.2129-2134 (2007.4).
- 5) A. Hashimoto, et al. : Roadmap of IMT- Advanced development. IEEE Microwave Mag. 9, No.4, pp.80-88 (2008.8).
- 6) ソサイエティ特別企画 : CK-2. ミリ波実用化に向けたデバイス・回路・システム技術の現状と将来 電子情報通信学会ソ大会 (2008.9) .
- 7) パネルセッション ABP-2. IMT-Advancedの要求条件および技術課題 電子情報通信学会ソ大会 (2008.9) .
- 8) 総務省電波政策懇談会資料
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/chousa/denpa_seisaku/ (参照2009.3.5).
- 9) IEEE Globecom, Topic: DD15W2 : Femtocells: Implementation challenges and solutions. (2008.12). G. Harikumar, S. K. Pemmaraju (http://www.comsoc.org/confs/globecom/2008/downloads/DD/DD15W2%20Femtocells/DD15W2_HarikumarG.pdf) (http://www.comsoc.org/confs/globecom/2008/downloads/DD/DD15W2%20Femtocells/DD15W2_Pemmaraju%20S.pdf) (参照2009.3.5).

プロフィール

鈴木 博 (すずき ひろし)

1972 東京工業大学 工学部卒業
 1974 東京工業大学 大学院 修士課程修了
 1974-1996 日本電信電話公社, (株) NTT,
 (株) NTTドコモ
 1986 東京工業大学 工学博士
 1996-現在 東京工業大学 大学院 理工学研究科
 集積システム専攻 教授
 IEICEフェロー, IEEE会員, IEICE論文賞
 (1995, 2006年)

主な著書 :

移動通信の基礎 (共著) (電子情報通信学会, 1986)
 デジタルコミュニケーション (共訳) (科学技術出版, 1999)
 適応フィルタ理論 (共訳) (科学技術出版, 2000)