

ブロードバンド無線通信と マイクロ波ミリ波技術

Microwave and Millimeter-Wave Circuits/Devices for Broadband Wireless Communications

荒木純道

Abstract

今後予想されるブロードバンド無線通信を実現するために必要なマイクロ波ミリ波の回路デバイス技術を概観する。特に無線通信では限られた周波数帯域で高速通信を達成しなければならないので周波数利用効率を高める必要があり、そのことがマイクロ波ミリ波無線機回路の各種要素（増幅器，発振器，周波数変換器，変調器など）の設計にどのような意味をもたらすかを考察する。

キーワード：ブロードバンド通信，周波数利用効率，電力効率，低ひずみ化，低位相雑音

1. はじめに

移动通信や固定無線を含めて無線通信の技術とシステムは現代社会において不可欠なインフラと考えられている。更に最近では RFID やセンサ・車載レーダも無線を用いた重要な応用例になりつつある。一方，大変便利なモビリティの代償として，無線通信の宿命である導波路構造を持ち得ないという事実から情報伝送の担い手である電磁波は限られた領域に閉じ込めておくことができない。一方，動作周波数が違えば異なる電磁波は全く相手の存在を意識することなく通信や計測に用いることができる。（ただし，以上の議論は電磁波が存在するすべての領域で媒質の非線形性はないものと仮定している。そのため半導体をはじめとした電子デバイスにおいては，媒質の非線形性が無視できなくなると，周波数領域における直交性が成立しない。このことは電力増幅器における混変調現象としてよく知られている。）

さて周波数領域における直交性が成立しているとする，各無線通信システムが安定に動作するためには，お互いに異なる周波数帯域を用いざるを得ない。そのため，無線通信の世界では周波数は限られた資源ということになり，しばしば「周波数は財産である」といわれることになる。

しかし近年では低マイクロ波帯を中心とした携帯電話

や無線 LAN の進展は驚異的であり，周波数帯域のひっ迫が切実な問題となってきている。その対策として考えられることは，多値変調技術や空間分割技術（MIMO）を用いて，周波数効率を高めることと，まだ通信に使用されていない未利用周波数帯を開発することである。

そのため特に準ミリ波周波数以上の未利用周波数帯域の開発が国家的な周波数配置の課題となってきている。砂漠の緑化になぞらえて，「ミリ波オアシス」計画と呼ばれているものがその一例である。

こうした背景を踏まえて，マイクロ波ミリ波技術の動向を紹介し今後の展開を探ることが本小特集のねらいである。つまり通信システムや計測システムを支えるマイクロ波帯ミリ波帯の回路デバイス技術を紹介していく。

さて本小特集では無線通信・計測を支える以下の項目に関する回路デバイス技術の紹介がなされるので，簡単に説明を加えておこう。無線機に必要な主要回路機能は，「発振」，「増幅」，「周波数変換」，「変調」，「フィルタリング」である。ここでは，フィルタリング以外の項目が紹介されている。

- ・ 発振回路の NINO/NISO (No-Input No-Output/No-Input Single-Output) モデル

局部発振器 (LO: Local Oscillator) はミキサと一緒に周波数変換機能を実現する重要な基本回路である⁽¹⁾。LO においては特に要求される性能は，位相雑音特性である。良好な位相雑音特性を実現するためにはデバイス技術だけでなく設計性の高い回路技術が要求される。そのための発振モードの安定性と位相雑音の解析

荒木純道 正員 東京工業大学工学部電気電子工学科
E-mail araki@mobile.ee.titech.ac.jp
Kiyomichi ARAKI, Member (Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8552 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.90 No.4 pp.254-258 2007年4月

計手法が展開され、発振器の Q 値概念が様々な意味で一般化されている。そして発振器の基本的な構成要素である共振器の Q 値と発振器の Q 値とは必ずしも一致しないことが指摘されている。

- ・ マイクロ波増幅器の高効率化・低ひずみ化

増幅器には、高効率化と低ひずみ化という相反する要求が常に課せられる⁽²⁾。特に近年では周波数利用効率を向上させるために多値変調レベルで多キャリアの変調信号が強くとめられている。このことは信号振幅のダイナミックレンジを必然的に拡大することになり、高効率化と低ひずみ化の課題克服がより強く求められてきている。例えば、飽和入力時における効率を最適化するだけでなく、低入力時においても効率を向上させることが求められている。しかも飽和時入力においては、有効なひずみ補償技術も当然ながら要求されている。そのため半導体デバイス技術だけでなく回路構成法や信号処理技術に関する研究が重要になってきている。

- ・ 高出力マイクロ波デバイスとしての窒化ガリウムトランジスタ

GaN トランジスタは高電流と高耐圧特性を併せ持ち電力密度の高いトランジスタとして近年高出力増幅器への期待が高まっているが、それらの現状性能と将来の技術動向が議論されている。特に移動体基地局や多値変調に対応する準ミリ波帯への応用が紹介される。

- ・ 高周波数シリコン送受信システムチップ

基本的にベースバンド (BB: Base Band) における回路はデジタル信号処理で行われるので BB のデジタル回路と無線周波数 (RF: Radio Frequency) 回路を同じシリコン集積回路で実現することができれば、無線機というシステムが 1 チップに収まり小形化、低価格化が達成できると期待される。そうした SOC (System On Chip) 技術の動向が紹介される。

- ・ ミリ波超高速伝送通信における三次元 SiP 実装技術

未利用周波数帯を開発していくためにはミリ波帯の無線通信システムへの期待が大きい。もちろん、無線通信システムは送受信機の性能だけで決定されるわけではなく、それぞれの動作周波数における電波伝搬特性にも大きく影響され、ミリ波帯の電波伝搬特性の特徴を生かした無線通信システムの構築が必要である。またミリ波においては実装技術の重要性が強く意識されている。ここでは実際にミリ波超高速伝送通信システムを構築するに必要な諸技術が紹介される。

- ・ 次世代携帯端末向け RF MEMS 可変容量

最後に RF MEMS (Micro ElectroMechanical System) 技術を紹介する⁽³⁾。MEMS 技術はシリコン微細化技術を応用することによって発展してきた。従来の半導体デバイスにおけるキャリアを制御するというアプローチとは異なり、回路構造を制御していくことで必要な可変回路機能を実現しようとするものである。スイッチングをはじめとした機能に優れた MEMS デバイスの製造技術及び制御技術の進展が紹介される。

2. 無線通信に要求されるマイクロ波ミリ波回路デバイス技術

無線送信機は基本的に、変調器、周波数変換器、電力増幅器から構成される。一方、受信機は低雑音増幅器、周波数変換器、復調器からなる。これらの構成要素以外に、アンテナと送受スイッチ、分波合波器、RF フィルタ、アイソレータ、通倍器などがある。

2.1 ヘテロダイン方式とホモダイン方式

また周波数変換という観点からいうと、

- ・ ヘテロダイン方式: IF 回路 (中間周波数回路) が必要

- ・ ホモダイン方式: IF 回路が不要に分類される⁽⁴⁾。

受信感度からいえばヘテロダイン方式の方が有利であるが、部品点数を削減できる、マルチバンド化が容易、SOC 化が容易などの理由から近年ホモダイン方式 (ダイレクトコンバージョン方式) が活発に研究され、また実用にも供せられている。

2.2 直交変調とポーラ変調

また変調方式も I, Q 直交変調以外にも極座標系変調 (ポーラ変調) の方式も検討されている。ポーラ変調は振幅変調と位相変調との組合せで実現するものであるが、増幅器の直接制御で振幅変調を行い、発振器の周波数変調機能を時間積分することで位相変調を実現することが試みられている。これらの回路アーキテクチャは RF 回路のデジタル化との親和性が高く、また電力効率に優れた増幅器を実現できる可能性があり、着目を集めている。

2.3 発振器

通信サービスによっても大きく異なるが、発振器の発振周波数を可変 (掃引) にする必要がある場合と固定しても構わない場合がある。一般に発振器の雑音には、AM (Amplitude Modulation) 雑音と PM (Phase Modulation) 雑音があるが支配的なものは位相雑音である PM 雑音である。これは発振器が自律系システムであることに起因している⁽⁵⁾。なお、発振器の周波数変調に関して

も、近年デジタル的な制御方法（DCO：Digital Control Oscillator）が盛んに行われてきている⁽⁶⁾。

2.4 増幅器

増幅器には出力レベル、非線形性、雑音指数、帯域幅、DC-RF 電力効率という重要なパラメータがある。近年では Doherty 増幅器や LINC (Linear Amplification using Nonlinear Components) 増幅器など 1930 年代ごろ考案された構成方式が見直されている。これは無線通信の信号レベルのダイナミックレンジが拡大していることが、電力増幅器の効率追求を加速している。また、ひずみ補償技術に関する取組みも盛んである。そして変調帯域の増加に伴って、ひずみ補償技術も入力複素包絡線の瞬時値だけでなく、その履歴も影響するようなメモリ効果を取り込んだ形の構成も検討されるようになってきている。ひずみ補償技術は通信帯域内のひずみを抑圧するだけでなく隣接した周波数帯域への漏えい電力の削減につながるのだから結果的には無線通信システムの周波数利用効率の向上につながることになる。

3. 無線通信の動向

3.1 周波数帯と用途

図 1 に無線通信に使われる周波数帯と、主な用途を示しておく。一般に電磁波は障害物に当たったときの、回折係数が周波数の平方根に反比例することが知られている。そのために準ミリ波帯以上の高周波数帯では影領域での通信は難しくなり、通信の形態は基本的に見通し通

信にならざるを得ない。ただし、周波数が高いということは指向性の鋭いアンテナが作りやすいということ、帯域幅が確保できるという利点もある。なおこの分類には入っていないが、UWB (Ultra Wideband) という通信形態も近距離通信に特化した形で検討されている⁽⁷⁾。周波数効率を極端に低下させると、結果的に所要送信電力は周波数利用効率の低下に対して指数関数的に削減することができ、超小電力通信の可能性があり、センサネットワークへの応用も期待されている。ただし、既存の無線通信システムとの共存を図る必要があり、与干渉、被干渉問題に対する検討が必要である。

3.2 セル半径と伝送速度

一方、図 2 はセルラ系無線通信におけるセル半径と伝送速度の関係を示したものである。一つの傾向としてセルサイズの小型化と伝送速度の大容量化が見取れる。今後、ホットスポットのような無線サービスが脚光を浴びると考えられる⁽⁸⁾。

3.3 周波数利用効率の推移

固定マイクロ通信、無線 LAN、そしてセルラ系通信いずれにおいても周波数利用効率の向上が図 3 から見て取れる。

周波数利用効率に寄与する技術は多値変調技術、そして空間多重化技術である。こうした周波数利用効率を高める方式はマイクロ波ミリ波回路デバイスに何を要求しているのだろうか。

まず多値化は正確な線形変調機能を要求する。つまり

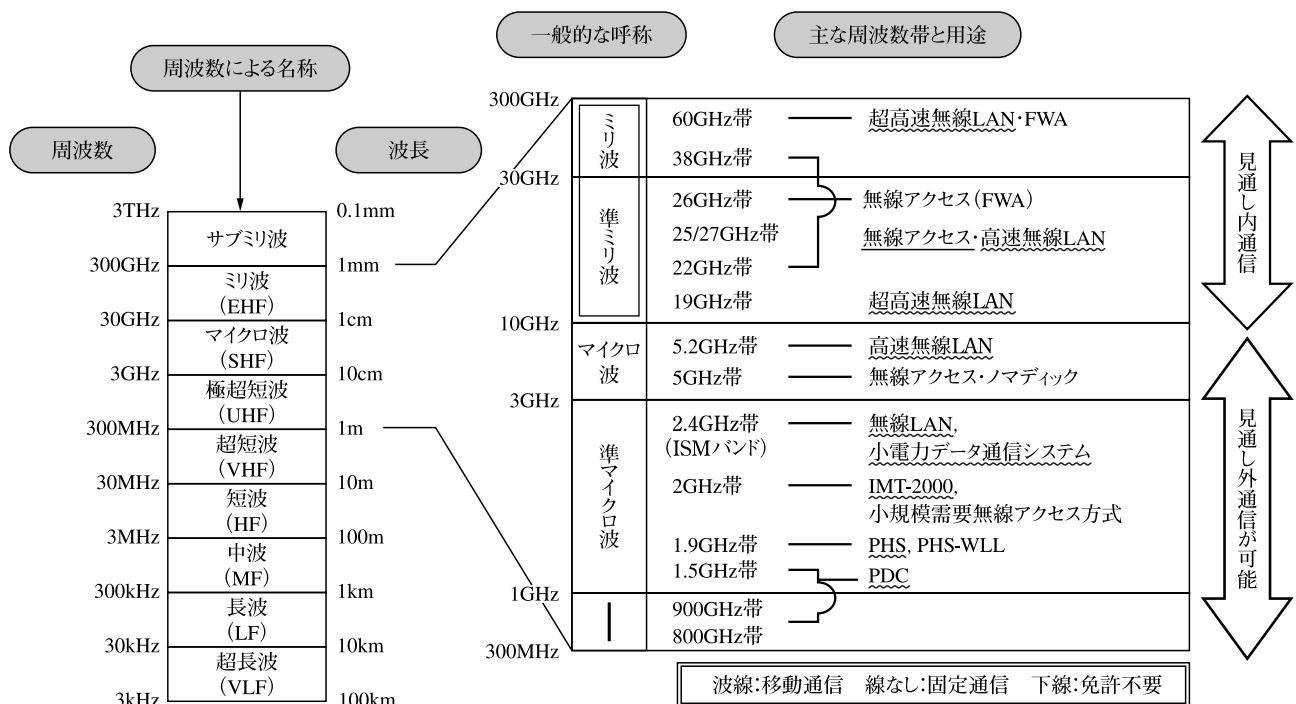


図 1 無線通信の周波数帯と用途

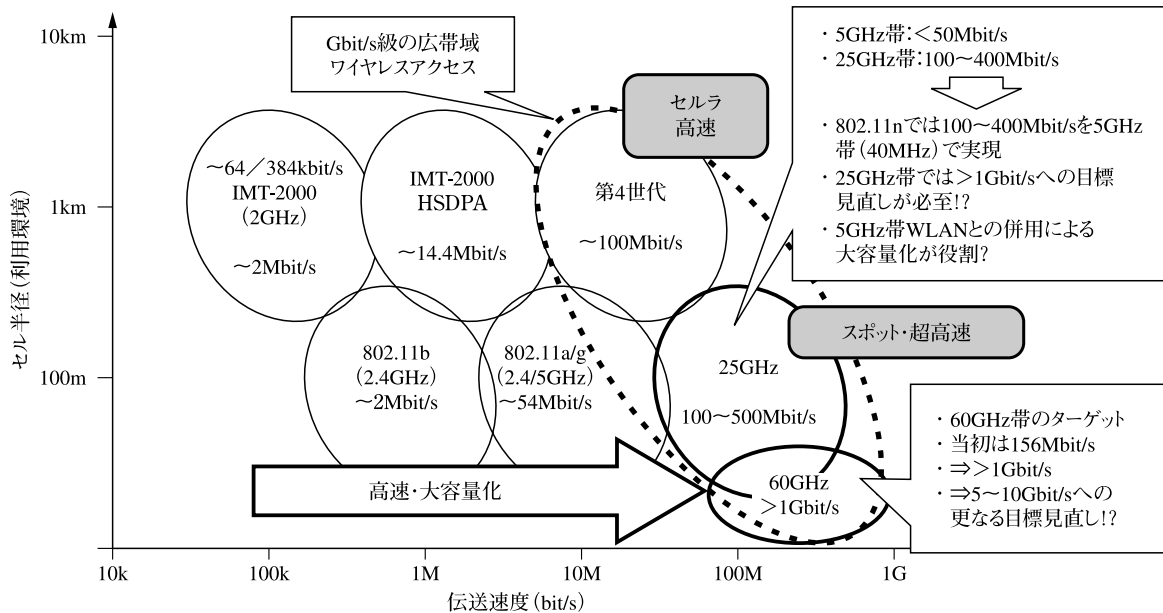


図2 セル半径と伝送速度

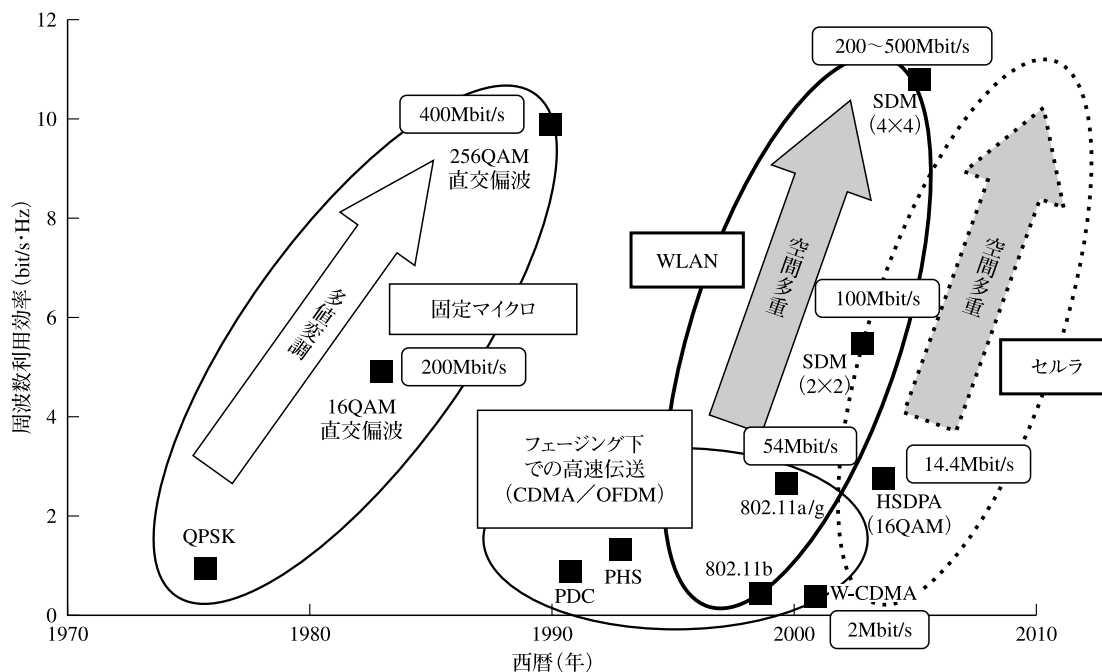


図3 周波数利用効率の推移

増幅器の線形性が強く要求されることになる。一方、空間多重化技術は伝搬環境に手を触れずに、多数の送信受信アンテナを用意し適切な信号処理を施すことによって仮想的に伝搬環境を変えていく技術ととらえることができる。しかし、送受信アンテナを複数用意するのだけでももちろん駄目であり、アンテナの個数分の無線送信機、受信機が必要になる。このことは当然 RF 回路の負担を増加させることになる。もちろん、LOのように共用化できる回路要素もあるが増幅器、ミキサなどは送受信アンテナ個数用意しなければならないであろう。もし1チップ化しようとする IC 内部での干渉問題も回路設

計の項目に上がってくる。

無線通信が単一キャリア→マルチキャリア⁽⁹⁾、SISO (Single-Input Single-Output) 通信 → MIMO (Multi-Input Multi-Output) 通信と進展してきているが、実際に MIMO-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 伝送実験を行った結果からすると、RF 回路を含めたハードウェアに対する要求はより厳しいものになっていることが分かる。例えば、直交変復調器の許容誤差は SISO-SC (Single Carrier) よりも数倍厳しい。こうした RF ハードウェアの不完全性を補償するための制御技術が今後強く求められてくるであろう。いずれにし

ろ MIMO-OFDM 通信のための RF 回路構成に関しては、今後十分研究していかなければならない。

4. ま と め

無線通信システムの研究を進めていく上での背景を概観した。RF 回路デバイス技術は今後のユビキタス社会実現の基盤技術であり、更なる高性能化（小形化，低消費電力化，高周波数化，低価格化など）が強く求められている。

文 献

- (1) A. Hajimiri and T.H. Lee, The design of Low Noise Oscillators, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- (2) P.B. Kenington, High-Linearity RF Amplifier Design, Artech House Inc., 2000.
- (3) H.J.D.L. Santos, RF MEMS Circuit Design, Artech House Inc., 2002.
- (4) A. Parssinen, Direct Conversion Receivers in Wide-Band Systems, Kluwer Academic Publishers, 2001.

- (5) F.X. Kaerter, "Determination of the correlation spectrum of oscillators with low noise," IEEE Trans. MTT, vol.37, no.1, pp.90-101 1989.
- (6) R.B. Staszewski, C.M. Hung, D. Laipold, and P.T. Balsara, "A first multigigahertz digitally controlled oscillator for wireless applications," IEEE Trans. MTT, vol.51, no.11, pp.2154-2164, Nov. 2003.
- (7) I. Opperman, M. Hämäläinen, J. Linatti, UWB Theory and Applications, John Wiley & Sons, 2004.
- (8) (財)国際通信経済研究所, 未利用周波数帯を有効利用するための技術に関する調査検討報告書, 2003.
- (9) R.V. Nee and R. Prasad, OFDM For Wireless Multimedia Communications, Artech House Inc., 2000.

(平成 19 年 1 月 22 日受付 平成 19 年 1 月 29 日最終受付)



荒木 純道 (正員)

1978 東工大大学院博士課程了。1985-1995 埼玉大助教授。1995 東工大教授。現在に至る。工博。マイクロ波回路，回路網理論，ソフトウェア無線，UWB，MIMO 伝送などの研究に従事。1993, 1997 電気通信普及財団テレコム賞，2005 本会論文賞各受賞。IEEE，情報処理学会，電気学会各会員。