

無線ネットワークを支える高周波技術

Radio-Frequency IC Technologies for Wireless Networks

堀田正生 Masao Hotta

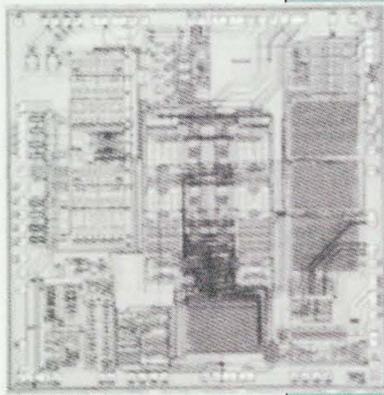
小久保 優 Masaru Kokubo

田中 聡 Satoshi Tanaka

吉田 功 Isao Yoshida

河合和彦 Kazuhiko Kawai

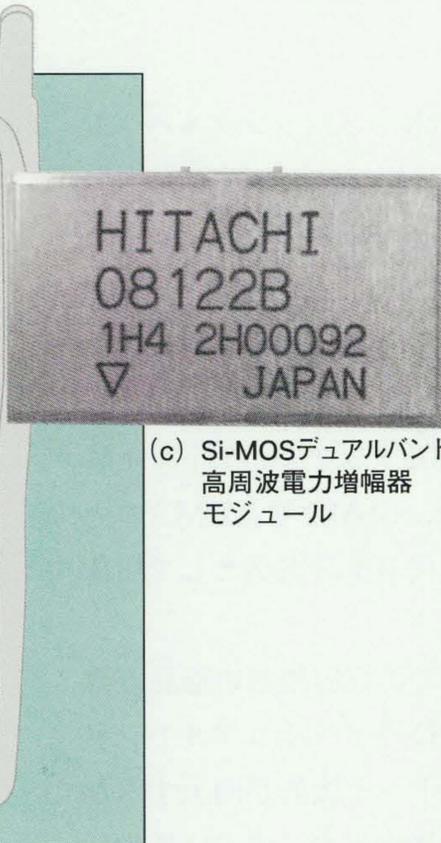
(a) ダイレクトコンバージョン方式を採用した
Bi-CMOSデュアルバンド高周波信号処理IC



(b) ブルートゥース用
高周波信号処理IC



(c) Si-MOSデュアルバンド
高周波電力増幅器
モジュール



注：略語説明

BiCMOS ((Bipolar
Complementary Metal-
Oxide Semiconductor)
GSM (Global System for
Mobile Communications)
Si-MOS (Silicon Metal-
Oxide Semiconductor)

携帯電話用の主な高周波 半導体

ダイレクトコンバージョン方式を採用したGSM用デュアルバンド高周波信号処理IC、ブルートゥース用高周波信号処理IC、およびデュアルバンド用増幅回路と整合回路などをコンパクトに集積した小型パッケージ高周波電力増幅器モジュールを開発した。

無線ネットワークの代表的システムである携帯電話の分野では、低コスト化と小型化への要求が強い。さらに、GSMとW-CDMAを同時に扱えるマルチモードや無線LANの一つであるブルートゥースも携帯電話に取り込まれるなど、高機能化が進んでいる。これらの要求にこたえるためには、機能の向上を図りつつ携帯電話の高周波部の部品点数を削減することと、将来の高集積化のためにすべてをSi技術で実現することがかぎとなる。

このため、外付け部品数が少なく済むダイレクトコンバージョン方式を採用したGSM用高周波信号処理ICや、小型化・低消費電力化のためにイメージリジェクションミキサと低中間周波数アーキテクチャを用いたブルートゥース用ICを0.35 μm BiCMOSで実現した。さらに、デュアルバンド対応の高周波パワーモジュールをSi-MOS技術を用いて実現し、耐圧と信頼性を確保しながら微細化を進め、高周波特性の改善を図っている。

1 はじめに

無線ネットワークを構成する代表的なものとして、携帯電話をはじめとする移動体通信機器があげられる。

携帯電話では、半導体集積回路の発展とともに、低コスト化と小型化が急速に進んできた。例えば、欧州を中心に規格が制定されたGSM (Global System for Mobile Communications) でも、シングルバンド対応 (900 MHz帯) から、1.8 GHzの周波数帯も同時に使えるデュアルバンド対応へと移行している。さらに、次世代通信方式であるW-CDMA (Wideband Code Division Multiple

Access) も同時に取り扱えるマルチモード対応へと高機能化が進んでいる。

一方、機器間の通信に無線を用いる無線LANが配線の煩わしさから解放されるという利点から脚光を浴びようになり、ブルートゥースやIEEE802.11などの標準化が促進され、製品化が急速に進んでいる。さらに、携帯電話にブルートゥースを取り込もうという動きがあり、高機能化への要求はますます高まってきている。

このように、携帯電話や無線LANを実現するうえで重要な高周波技術でも低コスト化、小型化、高機能化が求められ、そのための技術革新が活発となってきている。

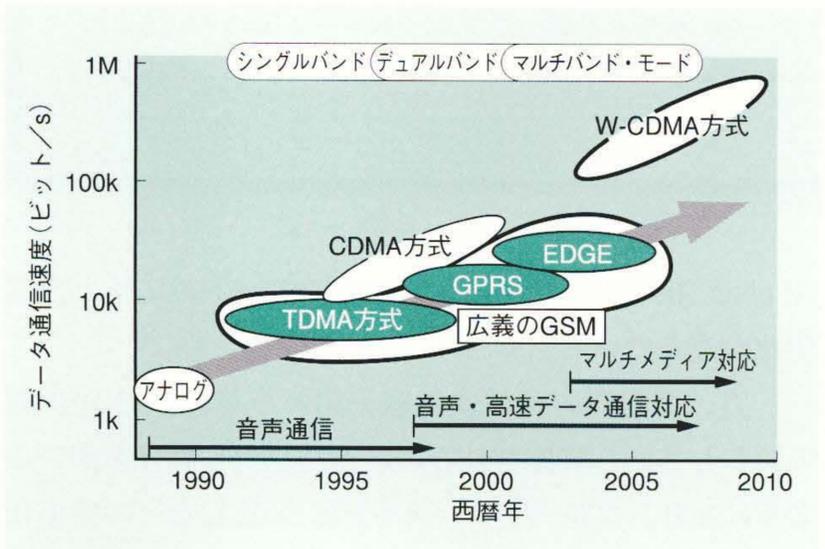
ここでは、SiデバイスとGaAsをはじめとする化合物半導体デバイスのうち、低コスト化と高機能化で大きな可能性を持つSiデバイスを中心に、携帯電話用高周波信号処理IC、ブルートゥース用高周波信号処理IC、および高周波電力増幅器について述べる。

2 携帯電話の動向

1990年代前半から音声通信主体のGSMシングルバンド対応技術が開発されて以来、音声・データ通信対応のGPRS(General Packet Radio Service)や、マルチメディアに対応した転送レートを確認できるEDGE(Enhanced Data Rate for GSM Evolution)へと発展してきた。使用周波数帯も800 MHz帯のシングルバンドから、1.8 GHz帯または1.9 GHz帯を同時に扱えるデュアルバンドやトリプルバンド対応技術が開発され、GSMとW-CDMAの両方を扱えるマルチモードも次世代の携帯電話として期待されている(図1参照)。

このように高機能化が進む中での高周波部の部品点数の推移を図2に示す。シングルバンドからデュアルバンドへ、さらにマルチバンド・モードへと機能が向上するたびに、いったんは部品点数は急増するが、すぐに減少している。これは、携帯電話のコスト低減と小型化に対する強い要求にこたえた結果である。

高周波信号処理ICでは、外付け部品を極力低減するために、従来のスーパーヘテロダイン方式にかわってダイレクトコンバージョン方式が開発された。また、高周波電



注：略語説明

- TDMA (Time Division Multiple Access)
- GPRS (General Packet Radio Service)
- EDGE (Enhanced Data Rate for GSM Evolution)

図1 携帯電話のアプリケーション動向

携帯電話では、音声通信主体から音声・データ通信対応のためのデータ転送速度の向上と複数の周波数帯に対応可能な高機能化が進んでいる。

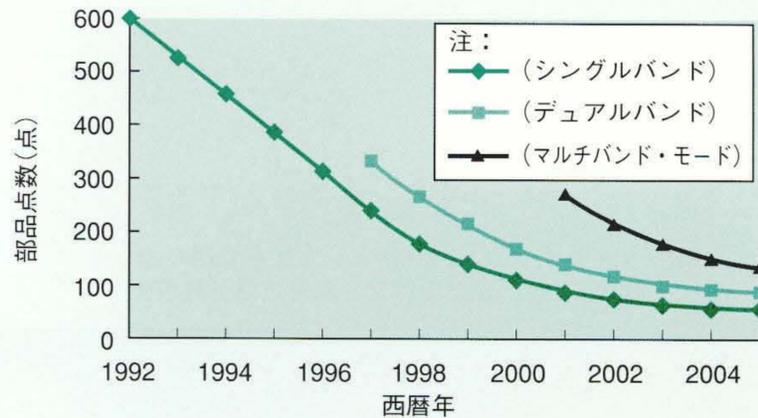


図2 GSM携帯電話の高周波部の部品点数推移

シングルバンドからデュアルバンド、さらにマルチバンド・モードへと機能向上のたびに部品点数はいったんは増加するが、すぐに減少している。

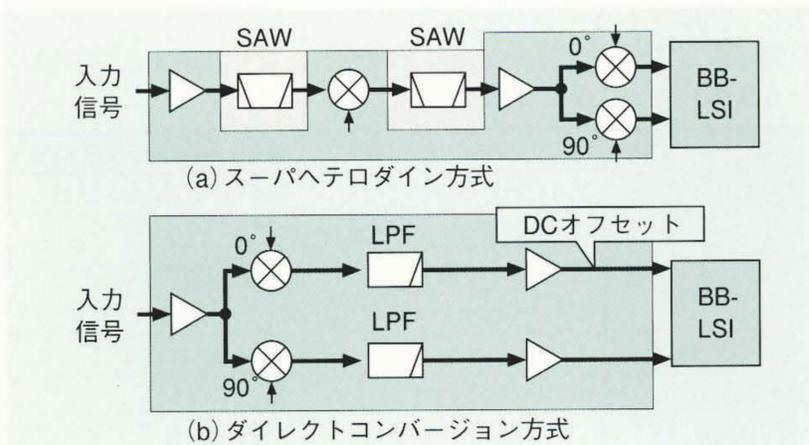
力増幅器でも整合回路などを取り込んだデュアルバンド対応モジュールが開発され、部品点数の削減に寄与している。

3 ダイレクトコンバージョン方式高周波IC

3.1 ダイレクトコンバージョン方式

従来、受信回路として広く適用されてきたスーパーヘテロダイン方式とダイレクトコンバージョン方式の比較を図3に示す。スーパーヘテロダイン方式では、ミキサでRF(高周波信号)をいったんIF(中間周波数)と呼ばれる低い周波数に変換する。その後、90度位相差を持つIF局部発振信号を復調器で混合することで、BB(Baseband)信号を得る。この方式の課題は、ミキサにおけるイメージ信号の影響である。IFの周波数は、RFの周波数と局部発振周波数の差によって決定される。このため、局部発振周波数に対して、周波数の高い信号と低い信号が同時に、同じIFの周波数に変換される。ここで、所望の周波数とは別の周波数に不要な信号があれば同じIF信号として変換されてしまうために、所望波と不要波が分離できない。そのため、この不要波(イメージ信号と呼ばれる)をミキサに入力する前に、十分抑圧しておくことが必要となり、SAW(Surface Acoustic Wave)フィルタなど急峻(しゅん)な周波数特性を持ったイメージ抑圧フィルタが欠かせない。さらに、IF信号をBB信号に変換する復調器の前にも、チャンネル選択のためのSAWフィルタ(IFフィルタと呼ばれる。)を設ける必要がある。これらのSAWフィルタはオンチップ化が困難なことから、外付けにせざるをえない。

IFを用いずに、RF信号を直接BB信号に変換する方法がダイレクトコンバージョン方式(DC方式)である。この方式は、復調器をRF信号に適用することでRF信号を直



注：略語説明 SAW(Surface Acoustic Wave)
BB(Baseband), LPF(Low-Pass Filter)

図3 スーパーヘテロダイン方式とダイレクトコンバージョン方式の比較

ダイレクトコンバージョン方式ではチャンネル選択フィルタを低域通過フィルタで構成するので、チャンネル選択フィルタの集積化が可能となる。

接BB信号に変換するものである。ここではIF信号が存在しないため、イメージ抑圧フィルタは不要となる。また、チャンネル選択はBB信号に対して行うことから、チャンネルフィルタは集積回路上で実現できる。これによるフィルタの削減個数はシングルバンドでは2個であるが、デュアル、トリプルバンドと機能が複雑になるほど増え、削減の効果が大きくなる。

ダイレクトコンバージョン方式は部品数削減という面では効果があるが、DC(直流)オフセットの発生という本質的な課題が残る。DCオフセットの発生要因を図4に示す。DCオフセット発生の多くの要因のうち、局部発振信号の漏れに着目する。復調器を構成するミキサに加えられる局部発振信号が受信系の経路に漏れ、再度入力するセルフミキシング現象によって直流成分に変換される。この結果として、DCオフセットが発生する。チャンネルフィルタは帯域外の妨害信号を除去することができるが、帯域内のDC成分を取り除くことはできない。発生したDCオフセットはそのまま増幅され、BB-LSIの入力レンジを圧迫する。このDCオフセット対策には専用の校正回路を追加し、BB-LSIの入力レンジを確保する必要がある。

3.2 ダイレクトコンバージョン方式の適用例

GSM900/GSM1800デュアルバンド対応ダイレクトコンバージョンICのブロック図を図5に示す。送信系には従来適用しているオフセットPLL(Phase-Locked Loop)方式¹⁾を、受信回路にはダイレクトコンバージョン方式をそれぞれ採用した。直交復調器に必要な、正確に90度の位相を持つ局部発振信号には、3.6 G~3.8 GHz帯のVCO(Voltage-Controlled Oscillator)の発振信号を、

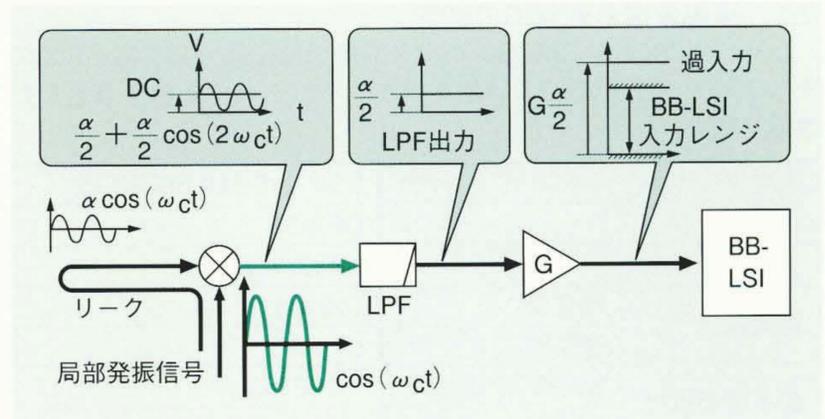
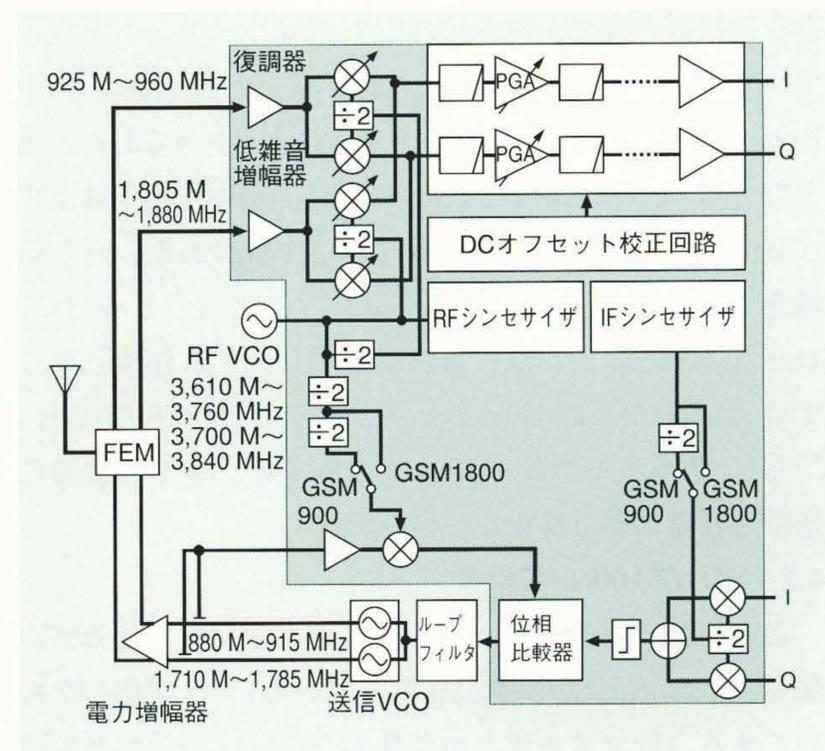


図4 DCオフセットの発生機構

DCオフセットは、ミキサで局部発振信号が受信パスに漏れ、再度ミキサに入力することで発生するため、後段の回路で対策が必要となる。

GSM900には4分周、GSM1800には2分周してそれぞれ生成した。低雑音増幅器と復調器は、GSM900とGSM1800それぞれ専用の回路により、最適化した。ベースバンド回路を共用し、先に述べたDCオフセットを校正する専用回路を設けた。

高周波信号処理ICの特性を表1に示す。パッケージには従来のスーパーヘテロダイン方式と同様にQFP-56を適用し、プロセスは0.35 μm SOI(Silicon on Insulator)Bi-CMOS(Bipolar Complementary Metal-Oxide Semiconductor)を用いた。最小受信感度とAM(Amplitude



注：略語説明 PGA(Programmable Gain Amplifier)
FEM(Front-End Module)

図5 ダイレクトコンバージョン方式高周波信号処理ICのブロック図

受信回路、送信回路、シンセサイザを集積化した。受信回路にはDCオフセット校正回路を内蔵することで、ダイレクトコンバージョン方式を実現した。

表1 高周波信号処理ICの特性

0.35 μm SOI Bi-CMOSプロセスを用いたGSM900/GSM1800のデュアルバンド対応ICの特性を示す。それぞれの仕様を満足した性能を得た。

適用プロセス	0.35 μm SOI Bi-CMOS	
パッケージ	QFP-56	
チップサイズ	3.4x3.4(mm)	
消費電流	受信時	112 mA
	送信時	61 mA
最小受信感度	GSM900(<-102 dBm)	-108 dBm
	GSM1800(<-102 dBm)	-107 dBm
AM 抑圧特性	GSM900(>-31 dBm)	-19.5 dBm
	GSM1800(>-31 dBm)	-28.5 dBm
I信号・Q信号出力DCオフセットレベル	I: 21 mV, Q: 39 mV	

注：略語説明 SOI(Silicon on Insulator)
Bi-CMOS(Bipolar Complementary Metal-Oxide Semiconductor)
AM(Amplitude Modulation)

Modulation)抑圧特性などに関しては、仕様に対して十分なマージンを確保し、出力DCオフセットレベルも40 mV以下と小さな値を実現している。

4 ブルートゥース用高周波信号処理IC

4.1 ブルートゥースの概要

ブルートゥースの概要を表2に掲げる。周波数帯には免許不要の2.4 GHz帯ISM(Industrial, Scientific, Medical)バンドを使用する。通信方式は周波数ホッピングスペクトラム拡散方式で、毎秒1,600回の高速ホッピングを行っている。一次変調にはGFSK(Gaussian Frequency Shift Keying)を用い、ビットレートは1 Mビット/sである。出力電力は1 mW(Class 2:到達距離10 m以内)と100 mW(Class 1:到達距離100 m以内)の2種類がある。同じ帯域を用いるIEEE802.11 b規格のものに比べると小型で、ローコスト、ローパワーを意識したシステム仕様となっている。また、暗号などセキュリティ機能を強化し、「パーソナル&モバイル」をキーワードに、多くの機器に搭載されることを目指している。

4.2 HD157100NPの概要

このICは、ブルートゥース用のトランシーバとモデム部分を0.35 μm SOI BiCMOSを用いて1チップ化したものである。低コスト化と小型化のために、送受信ともに極力外付け部品を少なくし、低消費電力化に主眼を置いた構成としている(図6参照)。

まず、受信部ではイメージリジェクションミキサと、中間周波に低周波を用いるLow-IFとから成るアーキテクチャによってフィルタのオンチップ化を実現し、部品点

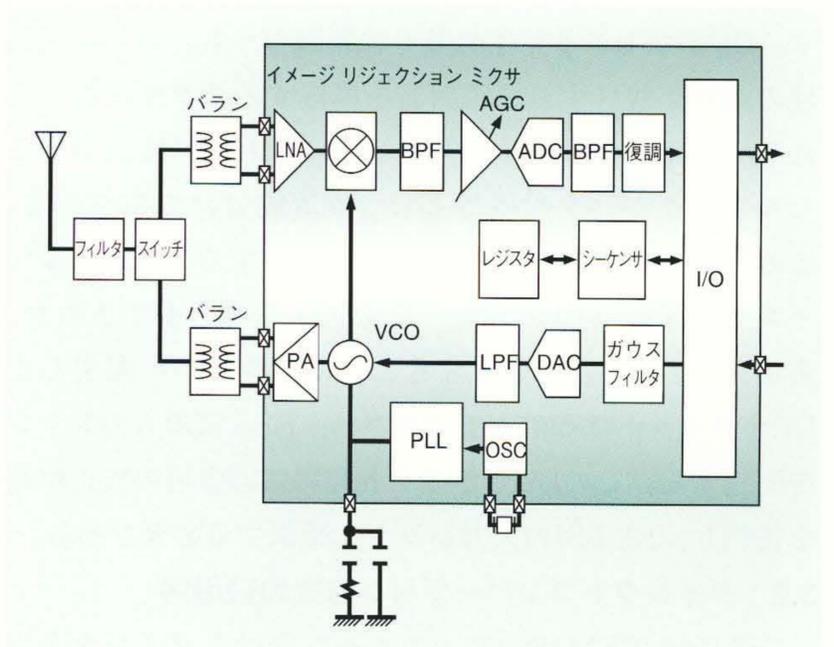
表2 ブルートゥースの概要

暗号などのセキュリティ機能を強化し、ローコスト、ローパワーを意識したシステム仕様となっている。

項目	ブルートゥース	無線LAN(IEEE802.11 b)
使用周波数帯	2.4 GHz ISMバンド	2.4 GHz ISMバンド
変調方式	周波数ホッピングスペクトラム拡散方式(毎秒1,600ホッピング)	直接拡散方式
データ転送速度	1 Mビット/s	11Mビット/s
出力電力	1 mW/100 mW	最大1 W
受信感度	-70 dBm	-76 dBm
伝送距離	10 m/100 m	30~100 m
セキュリティ	暗号と認証方式	オプション
アクセス制御	なし(専用接続)	CSMA/CA
音声対応	あり	なし

数の削減を図っている。さらに、オンチップアナログフィルタのばらつきを許容しつつ、十分な妨害波除去比を確保するために、デジタルフィルタを併用している。同じようにフィルタオンチップ化に有利な方式として、ダイレクトコンバージョン方式があげられる。それと比較した場合、Low-IFアーキテクチャはI/Q(I信号, Q信号)の2系統に信号処理を分ける必要がなく、回路構成が簡単で、その分消費電力も少なくなるという利点がある。

一方、送信部の構成はGFSK変調であることから、回路構成が簡単かつ消費電力的にも有利なPLLオープンループ方式を採用することにした。また、PLLシンセサイ



注：略語説明 LNA(Low Noise Amplifier)
BPF(Band-Pass Filter), AGC(Automatic Gain Controller)
ADC(Analog-to-Digital Converter), PA(Power Amplifier)
DAC(Digital-to-Analog Converter), OSC(Oscillator)
I/O(Input and Output)

図6 “HD157100NP”のブロックダイアグラム

外付け部品、消費電力の低減を図るため、受信系にはLow-IFを、送信系にはPLLオープンループ変調のアーキテクチャをそれぞれ採用した構成としている。

表3 試作IC“HD157100NP”の測定結果

受信感度、イメージ妨害比、送信アイ開口度いずれもブルートウースの仕様を十分満足する結果を得ている。

項目	測定結果
消費電流	35 mA(送信), 45 mA(受信)
受信感度	-82 dBm
CI比(イメージ妨害)	-13 dB
アイ開口度	81%
初期周波数変動	3.0 kHz
送信出力レベル	1.2 dBm
位相雑音	126 dBC/Hz (@3 MHz)

ザ部ではタンク回路にスパイラルインダクタを用いることにより、VCOも含めて集積化している。

この構成によって試作したICの評価結果をまとめたものを表3に示す。最小受信感度-82 dBm[@BER(Bit-Error Rate)=0.1%], イメージ妨害に対するCI(Carrier to Interference)比-13 dB, 送信部出力のアイ開口度(波形の重なり具合を示し, 送信FSK変調波の品質を表す。)81%, 出力レベル1.2 dBmを確認した。

5 RF SiパワーMOSFET技術

5.1 RF SiパワーMOSFETの高性能化技術

日立製作所が開発したRF SiパワーMOSFET(MOS Field-Effect Transistor)と従来品の構造の比較を図7に示す。従来品では、高耐圧化のためのオフセットゲート、およびソースワイヤが省略できる基板ソース構造に加えて、ゲート抵抗の低減による遮断周波数向上のためのAl短絡シリサイドゲート電極構造を採用していた。今回の開発では、ドレイン耐圧を10 V以上に維持したままで、ゲート長を0.3 μm にまで縮小した。ゲート電極端部での電界集中の緩和、およびゲートとドレイン間の帰還容量の低減のために「ゲート バーズ ピーク構造」を採用し、その最適化を図った。

試作したデバイスの遮断周波数(f_T)とドレイン耐圧(BV_{ds})のゲート長依存性を図8に示す。従来は、ゲート長が0.45 μm で、遮断周波数が約10 GHz、ドレイン耐圧が17 Vであったのに対し、この開発では、ゲート長を0.3 μm にして構造を最適化しており、遮断周波数18 GHz、ドレイン耐圧14 Vを得ている²⁾。

さらに、オン抵抗は従来の0.21 Ω に対して0.15 Ω へと、相互コンダクタンスは0.6 Sから4 Sへとそれぞれ大幅に改善した。GSM900対応のデバイスとして、ゲート幅28 mm、GSM1800対応には12 mmを用いた。電源電圧が3.6 V、ゲート電圧が1 Vで、効率重視でインピーダン

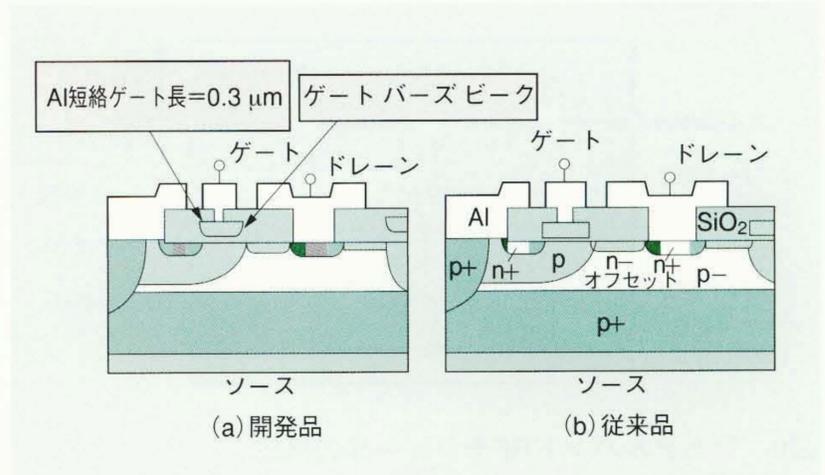


図7 従来品とRF SiパワーMOSFETの断面構造

開発品では、ゲート長の微細化とゲート バーズ ピーク構造の採用によって電界緩和と帰還容量低減を図り、周波数特性の改善を達成した。

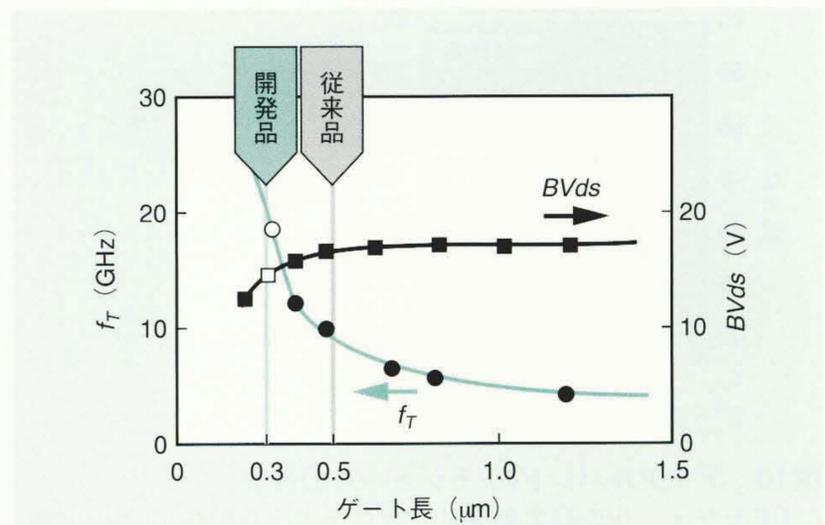


図8 遮断周波数と耐圧のゲート長依存性

ゲート構造の微細化と最適化により、遮断周波数18 GHz、ドレイン耐圧14 Vを得ている。

ス整合して測定した結果、900 MHzでは、出力電力2 Wで付加効率65%, リニア電力利得17 dBを、1,750 MHzでは、出力電力1 Wで付加効率58%, リニア電力利得13 dBという結果をそれぞれ得ている。

5.2 携帯用高周波パワーモジュール

今回開発したチップを用いた携帯電話用RFモジュールについて以下に述べる。

GSM900/GSM1800対応のデュアルバンドRFモジュールの構成を図9に示す。多層セラミック基板の上に、GSM900用とGSM1800用の2ラインを集積し、おのおのドライバ2段と出力段の3段構成としている。出力段には、GSM900用としてゲート幅28 mm、GSM1800用として12 mmのパワーMOSFETを用いた。マイクロストリップラインとコンデンサとでインピーダンス整合を図った並列接続のDD-CIMA(Divided Devices and Collectively Impedance Matched Amplifier)技術を用いることにより、高性能を達成している。そのデュアルバンドモジュ

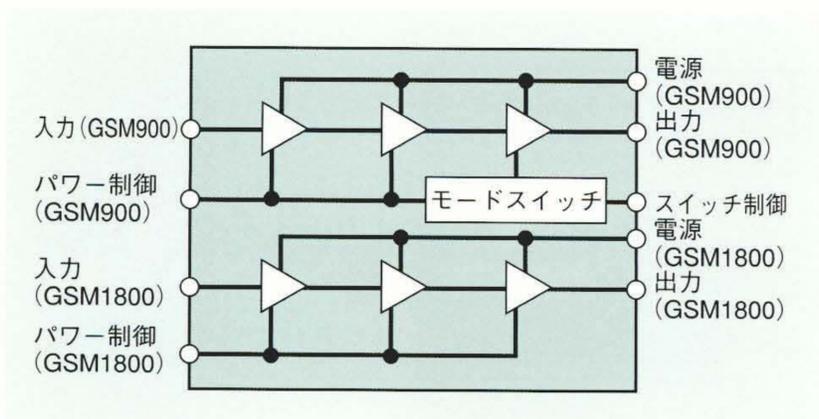


図9 デュアルバンドRFモジュールの構成
 新開発のデュアルバンドRFモジュールでは、GSM900用とGSM1800用の2ラインを集積し、それぞれドライバ2段と出力段の3段構造としている。

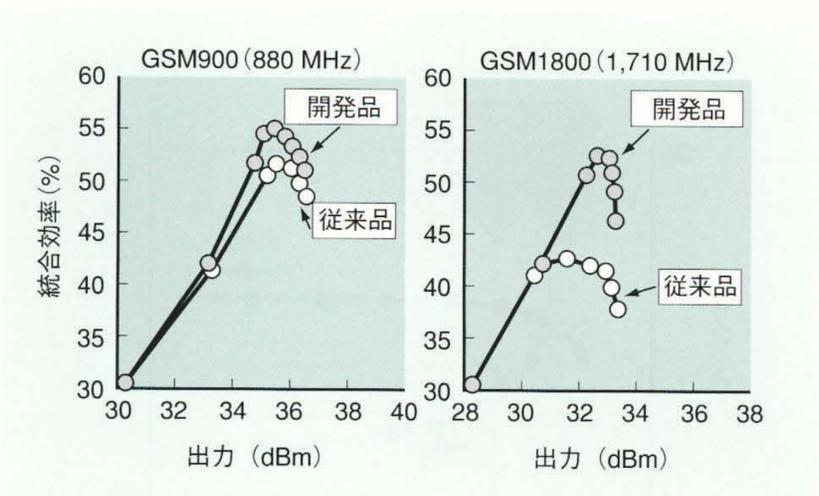


図10 デュアルバンドRFモジュールの性能
 RFモジュールの総合効率、それぞれ、GSM900用で55%、GSM1800用で53%に達している。

ールの総合効率の出力電力依存特性について、開発品と従来品とを比較した結果を図10に示す。GSM900用の場合、このモジュールの効率は、55%を超えている。またGSM1800用の場合では、その効率は53%に達し、従来品に比べて約10%向上している。これらの性能は、これまでのGaAsなどの化合物半導体を用いたモジュールの性能面においても十分に比肩しうるものと考えている。

一方、日立製作所は、高性能化に有望な素子としてGaAsやInPなどの化合物を用いたHBT(Hetero Bipolar Transistor)の開発も進めており、Siと化合物の両面からシステムに最適な高性能RFモジュールを提供していく考えである。

6 おわりに

ここでは、無線ネットワークを構成する重要なシステムである携帯電話と無線LANに関して、GSM用およびブルートゥース用のSiを用いた高周波デバイスについて述べた。高周波デバイスとしてはGaAsなどの化合物半

導体がこれまで広く使われているが、ここでは、将来の高機能化と高集積化の点で大きな可能性を持つSiデバイスに焦点を絞った。

GSM用高周波信号処理ICや高周波パワーモジュールではデュアルバンド化が進み、ブルートゥース用高周波ICも同じSiデバイス(Bi-CMOS)で実現されている。

今後、部品点数の削減がますます進み、低コスト化、高機能化、高集積化が進展する。日立製作所は、Si高周波デバイスのいっそうの改善に向けて努力していく考えである。

参考文献

- 1) 草野, 外; 携帯電話を支える高周波用半導体, 日立評論, 80, 11, 755~760(平10-11)
- 2) Y. Hoshino, et al.: High Performance Scaled down Si LDMOSFET with Thin Gate Bird's Beak Technology for RF Power Amplifiers, 1999 IEDM Technical Digest, pp.205-208

執筆者紹介



堀田 正生

1976年日立製作所入社, 半導体グループ アナログ技術本部所属
 現在, 高周波IC, 高周波パワーモジュール, ミックスドシグナルLSIの開発に従事
 IEEE会員, 電子情報通信学会会員
 E-mail: hotta-masao@sic.hitachi.co.jp



田中 聡

1985年日立製作所入社, 中央研究所 通信システム研究部所属
 現在, 携帯電話用高周波LSIの研究に従事
 IEEE会員, 電子情報通信学会会員
 E-mail: satoshi@crl.hitachi.co.jp



河合 和彦

1984年日立製作所入社, 半導体グループ ミックスドシグナルICビジネスユニット 所属
 現在, Bluetooth用RF ICの開発に従事
 電子情報通信学会会員
 E-mail: kawai-kazuhiko@sic.hitachi.co.jp



小久保 優

1981年日立製作所入社, 中央研究所 通信システム研究部所属
 現在, Bluetooth用高周波LSIとPLLの研究に従事
 IEEE会員, 電子情報通信学会会員
 E-mail: m-kokubo@crl.hitachi.co.jp



吉田 功

1965年日立製作所入社, 半導体グループ アナログ技術本部所属
 現在, 高周波Si-MOSパワーデバイス, パワーモジュールの開発に従事
 IEEE会員, 電子情報通信学会会員
 E-mail: yoshida-isao@sic.hitachi.co.jp