

Bluetooth™用 CMOS-RF トランシーバLSI

横溝 幸一
藤田 研

梅谷 正人
吉田 聡

水永 直
伊東 昌章

Bluetooth™^{*1)} は近距離用無線通信の世界標準規格のひとつである。複数の電気製品、たとえば、携帯電話などの携帯型情報通信機器、パソコン、プリンタ、デジタルカメラ、オーディオなどを無線で相互接続し、音声や画像、データを双方向に送受信することができる。電波の周波数が無線免許なしで利用できる帯域（Industry Science Medical Band, 2.4-2.5GHz）であることと、通信規格が関連企業団体（Bluetooth Special Interest Group: Bluetooth SIG¹⁾）から公開されていることにより、世界規模で普及しうる無線通信システムである。今後は、家庭・オフィス・自動車内などで、機器間をケーブルで接続する代わりに、Bluetooth™が日常的に使われると予想される。

表1にBluetooth™の高周波（RF）無線通信関連の主な仕様を示す。無線通信の相互接続性を保証するために、Bluetooth SIGは独自の認証制度を定めている。2001年9月6日、弊社のRFトランシーバLSI（ML7050LA）が、公認認証者²⁾ からBluetooth™の最新規格³⁾ の正式認証を得た⁴⁾。このLSIは、Bluetooth™のRFトランシーバ機能をCMOSプロセスによりシングルチップで実現したこと、外部部品の点数を少なくしたことに特徴がある。このLSIにアンテナと2.4GHzの帯域通過フィルタ、抵抗・キャパシタを接続することで、2.4GHz帯の無線送受信が可能で

表1 Bluetooth1.1版 RF仕様³⁾

無線周波数	2.4GHz ~ 2.4835GHz
チャンネル間隔	1MHz
送信電力	0.25mW ~ 2.5mW
変調方式	周波数ホッピングスペクトラム 拡散
一次変調方式	Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)
周波数ホッピング	1600/sec
変調指数	0.28 ~ 0.35
データレート	1Mbps
受信感度	0.1 nW (-70dBm)
最大受信レベル	10 μW (-20dBm)

ある。さらに、弊社のベースバンドLSI（ML70511LA）を接続すれば、Bluetooth™の規格に準拠した近距離無線ネットワークを構成できる。

以下、本稿では、RFトランシーバLSI（ML7050LA）の概要構成、送信側・受信側の回路ブロックの構成を紹介する。

RFトランシーバLSI（ML7050LA）の概要

図1にRFトランシーバLSIの概略構成を示す。本LSI

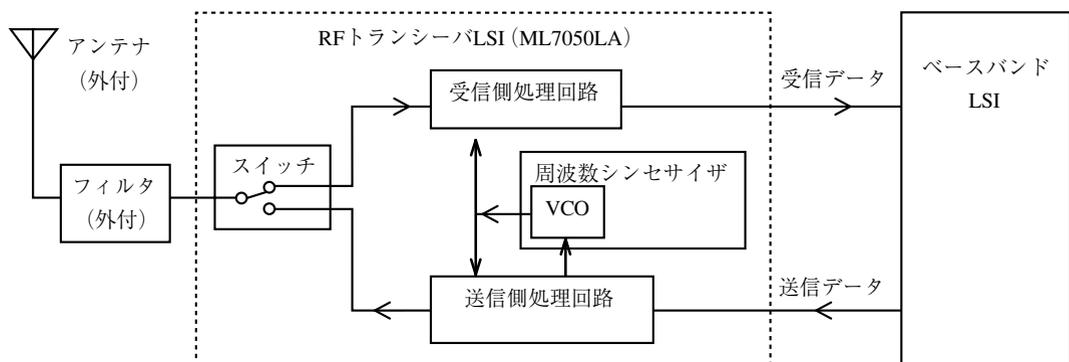


図1 RFトランシーバLSI (ML7050LA) の概要構成
(基準周波数信号、制御信号などは省略)

*1) BluetoothはBluetooth SIG, Inc. USAの商標

の機能は、(1) ベースバンドLSIから1Mbpsのデジタルデータを受け取り、データを2.4GHz帯の電波にのせ送信すること、(2) 受信した電波からデータを抽出し、デジタル信号に復元し、ベースバンドLSIに渡すことである。

まず、送信処理回路の動作を簡単に説明する。Bluetooth™のチャンネル周波数は、2402から2480MHzまで、1MHz間隔で、全部で79チャンネルある。一般に、Bluetooth™は一对の送受信器が互いに接続すると、625μsecごとに送信・受信を交代し、そのたびに、送受信周波数も別のチャンネルにホッピングする。これは、2.4GHz帯にさまざまな用途の電波が飛び交うので、もし、あるチャンネルで混信がおきてもほかのチャンネルで接続を確保するためと、通信の機密性を高めるためである。送信周波数は周波数シンセサイザの発振周波数でできる。周波数シンセサイザは、周波数ホッピングのたびにベースバンドLSIから発振周波数の指定を受け、所定のチャンネル周波数で発振を開始する。送信側処理回路は、ベースバンドLSIから受け取ったデジタルデータを、周波数シンセサイザが発生した送信波に周波数変調方式でのせ、アンテナから電波として発信する。

受信処理回路は、アンテナに達したさまざまな周波数の電波の中から、フィルタを通して2.4GHz帯の信号を受け取る。2.4GHz帯内には、他のBluetooth™機器からの電波やBluetooth™以外の電波も存在する。受信回路は希望のチャンネル周波数の電波をスーパーヘテロダイン方式（希望受信波を特定の間周波数（Intermediate Frequency: IF）に周波数変換する方式）により選択し、受信波にのっているデータを抽出する。本LSIの間周波数は2MHzである。

Bluetooth™では一台の無線機が親機（master）となり、最大7台の無線機を子機（slave）として従えること

表2 送信回路ブロックの諸元

波形整形フィルタ	
回路方式	Gm-C方式ローパスフィルタ
周波数シンセサイザ(送信・受信共用)	
外部入力クロック	11, 12, 13MHz
位相比較周波数	1 MHz
周波数引き込み時間	80μsec
電力増幅器	
回路方式	AB級
出力電力	1.6 mW (2 dBm)

ができる。親機と複数の子機との間の通信も、送信・受信の繰り返し基本である。つまり、それぞれ無線機は送信・受信を同時に行うことがない。そのため、周波数シンセサイザは、図1に示したように、RFトランシーバLSIに一つあれば充分である。このことが、回路構成の簡略化、LSIの低価格化につながり、広範囲の普及を可能にしている。以下、送信・受信系回路の内部ブロックを説明する。

送信・受信回路のブロック構成

図2に本LSIの送信側処理回路のブロック構成を示す⁵⁾。送信系回路は大別すると、波形整形フィルタと周波数シンセサイザ、電力増幅器からなる。表2には、送信系回路の諸元をまとめる。

波形整形フィルタは、ベースバンドLSIから受け取った送信データ信号（1Mbps、デジタル）から、デジタル波形の高調波成分を除去する。フィルタ通過後のデータ信号は1MHz以下の成分からなり、波形はアナログ信号である。

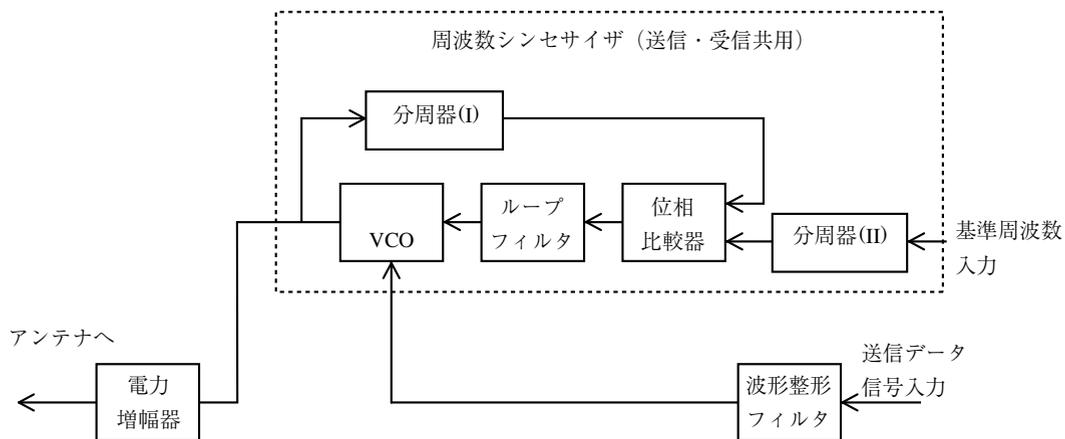


図2 送信側処理回路のブロック構成

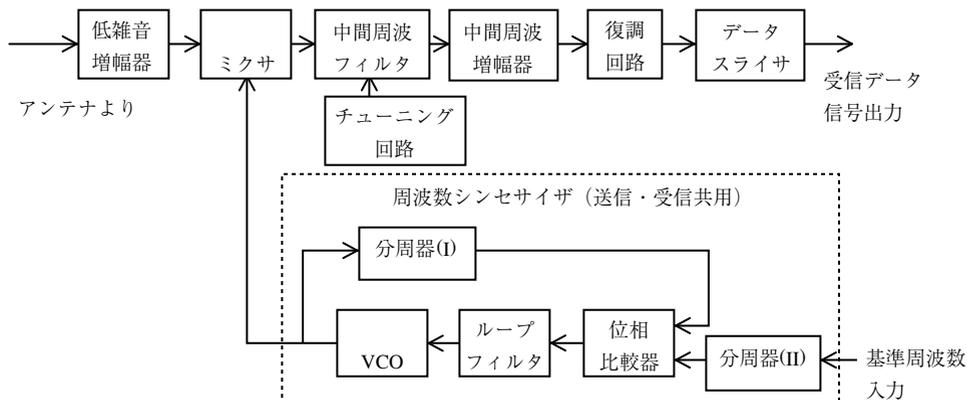


図3 受信側処理回路のブロック構成

周波数シンセサイザは、VCO (Voltage Controlled Oscillator: 電圧制御発振器) と位相同期ループ (Phase Locked Loop: PLL) からなる。本LSIでは、位相同期ループの位相比較器は1MHzで動作する。分周器 (I) の分周比は周波数ホッピングのたびにベースバンドLSIの指定した値になり、VCOの信号を1MHzに分周して位相比較器に帰還することで必要な周波数の発振出力を得る。

波形整形フィルタを通過したデータ信号は、VCOの周波数変調端子に入り、共振回路 (並列なインダクタとキャパシタからなる⁵⁾) のキャパシタンス (バラクタ) を直接に変化させる。これにより、送信波の周波数は、チャンネル周波数に対しおよそ $\pm 150\text{kHz}$ の周波数変調がかけられる。データをのせた送信信号は電力増幅器で増幅される。出力電力はLSIの出力端子で $1.0\sim 2.5\text{mW}$ ($0\sim +4\text{dBm}$) である。この電力は、外付けフィルタ (図1参照) で約40% (2dB) 減衰し、アンテナ端出で出力 $0.6\sim 1.6\text{mW}$ ($-2\sim +2\text{dBm}$) になる。

図3には、受信側処理回路のブロック構成を示す。表3に受信系回路の諸元をまとめる。受信波の電力は低雑音増幅器で25倍に増幅される。一般に、受信系の信号/雑音比は、初段増幅器の雑音指数と増幅率に大きく支配される⁶⁾。設計では、トランジスタをはじめ、LSIパッケージ、ボンディングワイヤなどの浮遊成分をシミュレーションに取り込み、2.4GHz帯における雑音指数の抑制と増幅率の最適化を図った。ミキサ (Mixer) は、増幅した受信波と周波数シンセサイザの信号を掛け合わせ、搬送周波数を2.4GHz帯から2.0MHzの中間周波数に変換する。

ミキサの出力は、目的のIF周波数 (2MHz) のほかに、隣接チャンネルの存在により $2+1, 2, \dots$ MHzなどの信号を含む。これら妨害波は、中間周波数フィルタで除去する。フィルタを構成する素子の製造ばらつき、あるいは外部

温度変化の影響を受けないようにチューニング回路により中心周波数を固定させている。IF信号は、さらに中間周波増幅器で40dB増幅され、復調器で復調される。復調信号には、直流電圧成分の上に1Mbpsのデータがアナログ波形として重畳している。

データスライサは復調波形の直流電圧成分を抽出し、直流成分より電圧値の高いアナログ信号部分をCMOSレベルのHighに、低い信号部分をLowに変換し、受信データをデジタル信号に変換する。データスライサは、

表3 受信回路ブロックの諸元

低雑音増幅器	
電力増幅率	14 dB
雑音指数	5 dB
入力換算 3 次相互変調歪	-12 dBm
ミキサ	
電圧増幅率	21 dB
雑音指数	25 dB
鏡像信号除去比	32 dB
中間周波数	2 MHz
中間周波フィルタ	
回路方式	Gm-Cバンドパスフィルタ
チューニング方式	PLLによる自動チューニング
フィルタ通過帯域	2MHz \pm 500kHz
中間周波増幅回路	
回路方式	差動リミテイングアンプ
電圧利得	40dB以上
復調回路	
回路方式	遅延検波方式

Bluetooth™の周波数ホッピングに対応するため、復調信号の直流電圧成分を短時間に検出する機能が必要である。本LSIのデータスライサは、相手の送受信機がデータ送信を開始するたびに、送信開始後数 μ secで復調信号波形から適切な直流電圧レベルを検出する。

高周波回路の開発

LSIチップの製造は0.35 μ m CMOSプロセスを使用した。高周波無線回路の設計には、インピーダンス整合などのため低損失のインダクタとキャパシタが不可欠である。前者は、従来の配線工程を利用し、インダクタのライブラリを完備した。後者は、金属/絶縁体/金属からなるキャパシタをつくり、対地キャパシタンス・電極抵抗の減少を図った。このキャパシタを実現するため、キャパシタの金属電極を形成する工程が加えられている。

高周波回路の設計では、各素子の浮遊成分の把握が不可欠である。インダクタ、キャパシタ、トランジスタをはじめ、パッド、静電破壊保護素子、ボンディングワイヤ、パッケージのSパラメータを10GHzまで測定し、それぞれ浮遊成分を含む等価回路を構築し、設計精度を上げた。

沖のBluetooth™ソリューション

図4に、本RFトランシーバLSI (ML7050LA) をベースバンドLSI (ML70511LA) とともにモジュール化した写真を示す。このモジュールは、モジュールを搭載した機器とのデータ接続のため、標準的インタフェースHCI (Host Control Interface) を採用した。携帯・オフィス機器などは、接続命令・データを本モジュールに、HCIに従って与えれば、ほかのBluetooth™モジュール搭載機器と無線通信が可能である。弊社では、HCI上位のソフトウェア開発のため、System Development Kit (SDK) を開発した。すなわち、モジュールとSDKを用意すれば、Bluetooth™による近距離無線ネットワークの構築と、そ

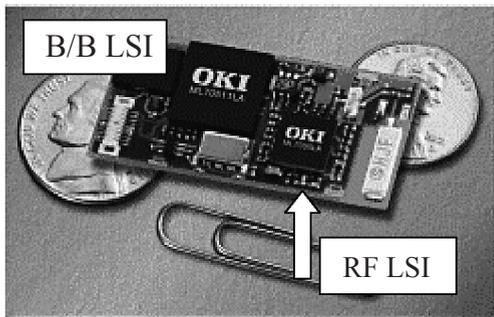


図4 モジュールに組みこんだRFトランシーバLSI (ML7050LA: 矢印)。左側のLSIはベースバンド(B/B)LSI(ML70511LA)である。

のために必要なソフトウェアの開発が可能である。

あ と が き

本LSI (ML7050LA) は、ほとんどの部分がアナログ回路である。一般に、アナログ回路は、デジタル回路に置き換えると、トランジスタの最小設計寸法の縮小とともに、消費電力が低減し、占有面積を縮小できる。次世代のRFトランシーバLSIでは、中間周波数の信号処理回路をデジタル化し、トランジスタの最小加工寸法を現在の0.35 μ mから0.18 μ mへ変更する。これにより、消費電力を低減し、占有面積を縮小する。また、ベースバンド機能の取り込みなどの機能拡充を行う予定である。



参考文献

- 1) Bluetooth SIG, <http://www.bluetooth.com>.
- 2) James Cunningham (7Layers Inc. USA).
- 3) Bluetooth Specification. Version 1.1, February 2001.
- 4) <http://qualweb.opengroup.org/Template.cfm?LinkQualified=QualifiedProducts>.
- 5) A. Ajikuttira, *et al.*, "A Fully-Integrated CMOS RFIC for Bluetooth Applications", International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, pp.198-199, 2000
- 6) Thomas H. Lee, "The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits", Cambridge University Press, pp.550-552, 1998

筆者紹介

横溝幸一: Koichi Yokomizo. シリコンソリューションカンパニー LSI事業部ワイヤレスLSI商品開発第二部 チームリーダー
 梅谷正人: Masato Umetani. シリコンソリューションカンパニー LSI事業部ワイヤレスLSI商品開発第二部 サブチームリーダー
 水永直: Sunao Mizunaga. シリコンソリューションカンパニー LSI事業部ワイヤレスLSI商品開発第二部
 藤田研: Ken Fujita. シリコンソリューションカンパニー LSI事業部ワイヤレスLSI商品開発第二部 主任研究員
 吉田聡: Akira Yoshida. ネットワークシステムカンパニー NETコンバージョン本部 デザインサービス事業推進ユニット チームリーダー
 伊東昌章: Masaaki Ito. Oki Techno Centre of Singapore, ジェネラルマネージャー