

■4 群 (モバイル・無線) - 1 編 (無線通信基礎)

11 章 受信機 (Receivers)

(執筆者: 伊東健治) [2009 年 1 月 受領]

■ 概要 ■

ここでは高周波回路を中心としたモバイル通信用受信機の構成と動作について述べる。まず基本構成について述べ、更に本編 12 章で示す受信機の総合性能に対して劣化要因となる雑音や非線形ひずみなどの受信機特性について述べる。最後に受信機を構成する主要高周波デバイスについて解説する。本章についての仔細な説明は、文献 1, 2)を参照されたい。

■4群 - 1編 - 11章

11-1 受信機の基本構成と動作

(執筆者：伊東健治) [2009年1月 受領]

モバイル通信用受信機では、高レベルの干渉妨害波を抑制する高い選択度とともに、微弱な希望波を所定の品位で復調する高い感度が求められている。図 11・1 にモバイル通信用受信機の基本構成を示す。高周波 (RF) の帯域通過フィルタ (BPF: Band-Pass Filter) で所望帯域外からの干渉妨害波の抑制を行い、受信機のスプリアス応答や非線形ひずみを回避する。そして低雑音増幅器 (LNA: Low Noise Amplifier) で、受信信号を増幅し、受信ミキサで中間周波数 (IF) に変換する。受信ミキサの前段の BPF により、受信ミキサのイメージ応答を抑制する。IF に変換された信号から受信フィルタで希望波を取り出し、隣接チャネルからの干渉妨害波を抑制する。そして希望波をリミタ増幅器や AGC 増幅器で所定のレベルまで増幅する。受信機の機能には、受信周波数誤差を補正する AFC (Automatic Frequency Control) 機能や、受信波のレベルに応じて受信利得を補正する AGC (Automatic Gain Control) 機能などもあり、図 11・1 に示すように復調部から無線部への制御を行う。ただし、アナログ FM 方式や PDC 方式のようにリミタ増幅器で受信波のレベルを一定にする方式の場合、AGC 機能は用いられず、無線回路から復調回路へ受信レベル情報 (RSSI: Radio Signal Strength Indicator) が報告される。

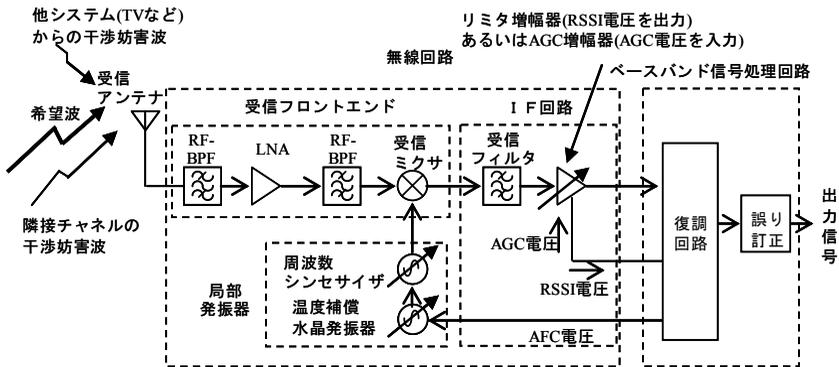


図 11・1 モバイル通信用受信機の基本構成 (スーパーヘテロダイン方式の場合)

無線通信用受信機の基本構成には、高選択度を有する IF の BPF (水晶フィルタなど) を用いるスーパーヘテロダイン方式 (図 11・1) のほかに、RF からベースバンドに直接周波数変換を行うダイレクトコンバージョン方式 (ホモダイン方式、図 11・2 参照) などがある。スーパーヘテロダイン方式は高ダイナミックレンジであり、大半の無線用受信機に用いられてきた。ダイレクトコンバージョン方式では、受信フィルタをベースバンドのフィルタで実現でき、半導体集積化に適するため携帯端末への適用が進められている。またイメージ応答が原理的に存在しない。一方、DC オフセット、フリッカ雑音及び二次ひずみなどの方式固有の感度劣化要因があり、RF との干渉抑制を目的とした局部発振器の周波数構成の検討、二次ひずみ

の改善を目的とした直交ミキサ回路の検討が行われている。そのほか、スーパーヘテロダイン方式ではあるが、IF周波数をベースバンド近傍とすることで受信フィルタを半導体集積化し、かつダイレクトコンバージョン方式の問題を解決した低IF方式も実現されている。イメージリジェクションミキサを用いてイメージ応答を抑制するため、イメージ応答周波数での受信選択度は低レベルである。

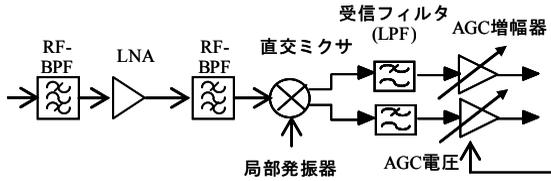


図 11・2 ダイレクトコンバージョン方式の構成

■4群-1編-11章

11-2 受信機の特性

(執筆著：伊東健治) [2009年1月 受領]

11-2-1 雑音特性

無線伝送路及び受信機内部において、希望波に加法的白色雑音が重畳し、受信機の感度劣化の主たる要因となる。加法的白色雑音には、図 11・3 に示すように (a) アンテナ雑音、(b) 受信機の内部雑音、(c) 送信雑音がある。アンテナ雑音はアンテナ覆域内に存在する自然雑音（宇宙雑音、大気の吸収雑音、地表の熱雑音など）とアンテナ内部の損失に起因する熱雑音であり、雑音温度で表される。モバイル通信では、アンテナの覆域内に人体、地表、建物が見えるため、アンテナ雑音温度は室温（ $T_0=290\text{k}$ ）で近似できる。受信機の内部雑音は、フィルタなどの受動部品の損失に起因する熱雑音や、能動回路の半導体から発生するショット雑音に起因する。送信雑音は送受共用器を介した送信機からの干渉であり、受信と同時に送信を行うシステムでは考慮する必要がある。

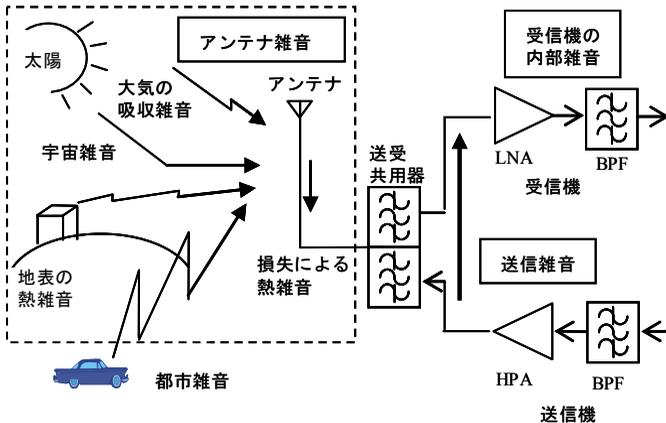


図 11・3 受信時に希望波に加わる加法的白色雑音

受信機の雑音特性は内部雑音で規定され、受信機への入力信号の SN 比（ SN_{in} ）と出力信号の SN 比（ SN_{out} ）より与えられる雑音指数 $F=(SN_{out}/SN_{in})$ で表される。雑音指数 F の受信機では $k \cdot T(F-1) \cdot B(W)$ （ k ：ボルツマン定数： $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 、 T ：絶対温度、通常は室温 T_0 、 B ：受信機の等価雑音帯域幅）の白色雑音が、受信機入力端に重畳するとみなせる。モバイル通信用受信機では、受信機の内部雑音とアンテナ雑音をあわせた $k \cdot T_0 \cdot F \cdot B$ [W/Hz] が受信波に重畳するとみなし感度計算を行う。

受信機を構成する回路の各段の雑音指数を $F_i(i=1,2,\dots,n)$ 、電力利得を $G_i(i=1,2,\dots,n)$ とすると、受信機全体の雑音指数 F は次式で与えられる。

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot \dots \cdot G_{n-1}} \quad (11 \cdot 1)$$

ここで最前段の送受共用機のような受動回路は、損失 L と同じ雑音指数 L となる。式(11・1)より、受信機の雑音指数 F に対して、最も微弱な受信波を増幅する前段の回路、すなわち送受共用機の損失と LNA の雑音指数と利得が支配的である。そのため基地局などの通信設備において、サービスエリアを広げるために超伝導フィルタや冷却 LNA を適用した超低雑音受信機を用いる場合がある。その場合、自然雑音に由来するアンテナ雑音 $k \cdot T_0 \cdot B$ まで受信機入力端での雑音を抑制できる。

11-2-2 受信スプリアス応答特性

受信スプリアス応答は、干渉妨害波に対する受信機の応答であり、受信機のブロッキング性能の主たる劣化要因である。受信ミキサ前段に配置したフィルタでの減衰特性が不十分な場合、干渉妨害波により受信ミキサで発生する混合積が中間周波数（周波数： f_{if} ）に変換され感度を劣化させる場合がある。 f_{if} 、局部発振波 f_p 及び送信波 f_{tx} 、（送受信を同時に行う場合）により、受信スプリアスの応答周波数は $i, j, k = f_{if} \pm j \cdot f_p \pm k \cdot f_{tx} / i$ （ i, j, k ：整数）で与えられる。 i, j, k は混合積を与える次数であり、 i は干渉妨害波、 j は局部発振波、 k は送信波に対応する。図 11・4 に代表的な受信スプリアス応答の例を示す。同図(a)はイメージ応答 ($i=1, j=1, k=0$) である。 $f_p + f_{if}$ と $f_p - f_{if}$ は f_p を挟んだイメージの関係となり、一方を信号周波数とすると、他方はイメージ周波数と呼ばれ、受信スプリアス応答を呈する。同図(b)は $f_{if}/2$ に対する受信スプリアス応答 ($i=2, j=2, k=0$)、同図(c)は送信波により励振された受信ミキサにより生ずる擬似局発スプリアス応答 ($i=1, j=0, k=1$) である。これらのスプリアス応答周波数はスーパーヘテロダイン方式固有のものであり、ダイレクトコンバージョン方式では $f_{if} = 0$ となるため緩和される。

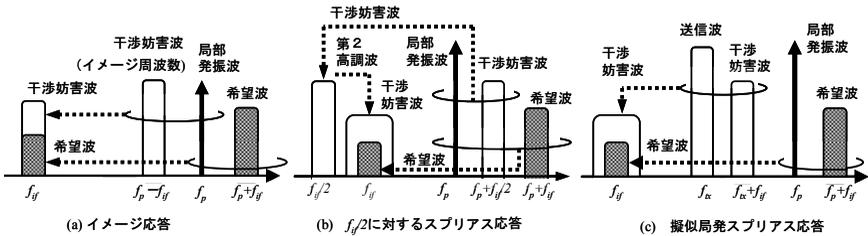


図 11・4 受信スプリアス応答の例(横軸：周波数、破線の矢印：周波数混合)

11-2-3 非線形ひずみ特性

受信機へ過大な信号が入力されると、受信機を構成する回路の非線形性により非線形ひずみを生じ、受信機の感度が劣化する場合がある。非線形ひずみによる感度劣化には、高レベルの希望波入力時の劣化と、高レベルの干渉妨害波入力時の劣化とがある。高レベルの希望波入力時に非線形性による伝送波形のひずみを生ずると、振幅情報を含む QAM 系の変調方式や、CDMA のように非線形性により符号間直交性が損なわれるシステム、OFDM のようなマルチキャリア伝送では、感度の劣化を生ずる。これらのシステムでは、高レベルの希望波が入力したときに受信フロントエンドを低利得とするよう AGC を動作させ、感度劣化を回避する。

次に高レベルの干渉妨害波を入力したときの劣化は、干渉妨害波が受信回路の非線形性により周波数変換され、希望波に干渉することによる感度劣化である。図 11・5 に非線形ひずみによる感度劣化の様子を示す。同図(a)は隣接チャンネルの干渉妨害波による三次ひずみでの感度劣化である。同図(b)(c)は2波の干渉妨害波による相互変調ひずみでの感度劣化であり、(b)は等周波数間隔に配列された波の間の干渉である三次相互変調ひずみによる劣化、(c)はダイレクトコンバージョン受信機固有の問題である二次相互変調ひずみによる劣化である。

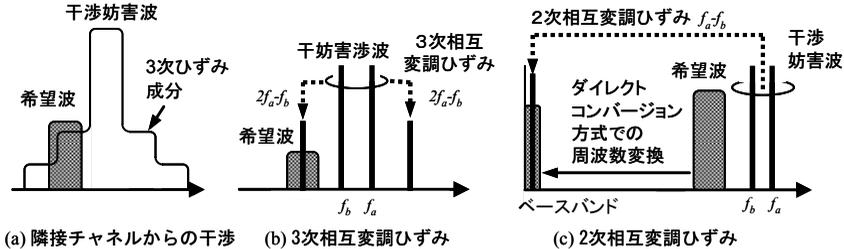


図 11・5 非線形ひずみの例 (横軸：周波数、破線の矢印：非線形ひずみ)

図 11・6 に示すように、等振幅の入力波と三次相互変調ひずみ波の延長線の交点を三次相互変調ひずみのインターセプト点 $IP3(W)$ 、入力端での換算値を $IIP3(W)$ と呼び、三次の非線形ひずみを定義する。受信機を構成する回路の各段の $IIP3$ を $(IIP3)_i (i=1,2,\dots,n)$ とすると、全体の $IIP3$ は次式で近似できる。

$$\frac{1}{IIP3} \approx \frac{1}{(IIP3)_1} + \frac{G_1}{(IIP3)_2} + \frac{G_1 \cdot G_2}{(IIP3)_3} + \dots + \frac{G_1 \cdot \dots \cdot G_{n-1}}{(IIP3)_n} \quad (11 \cdot 2)$$

これより、受信回路全体の $IIP3$ に対し、後段の回路の三次ひずみ特性が支配的であることが分かる。隣接周波数の干渉妨害波を抑制する手段がない受信フロントエンドでは、受信ミキサが最後段であり、その三次相互変調ひずみが受信機全体の $IP3$ に対し支配的となる。

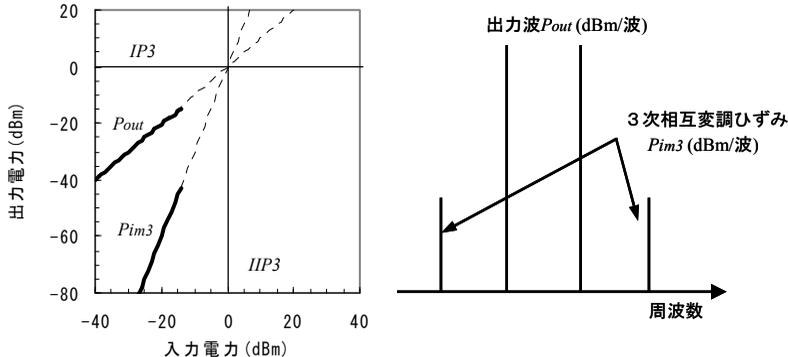


図 11・6 三次相互変調ひずみのインターセプト点 ($IP3$) の説明図 (破線は三次相互変調ひずみ波の延長線)

11-2-4 線形ひずみ特性

線形ひずみは、送受信回路に用いるフィルタが理想的なる波特性、例えばナイキストロールオフ特性から外れることにより生ずる波形ひずみであり、符号間干渉による感度劣化を生ずる。近年、送信フィルタについてはデジタルフィルタによるルートナイキストロールオフ特性の実現が行われ、ほぼ理想特性が実現されている。受信フィルタについては、IF 帯域のセラミックフィルタ、あるいはベースバンド帯域のアクティブフィルタなどが用いられる。その振幅特性は受信フィルタの等価雑音帯域幅が伝送帯域と同等となり、かつ帯域外の干渉妨害波を抑制し、所定の選択度が得られるよう設計される。また、位相特性は1符号長より十分短い時間の群遅延偏差となるよう設計される。

11-2-5 直交ミキサのベクトル誤差特性

直交ミキサを用い希望波の直交複素検波を行う受信機では、そのベクトル誤差が受信感度に影響を与える。ベクトル誤差は DC オフセット、振幅誤差、そして位相誤差により定義される。直交検波出力の DC オフセットは、搬送波成分が検波されて直流成分になったものと考え、送信側での搬送波成分の漏えいと同じ性質を有する。これらの誤差要因により伝送符号の信号空間ダイアグラムがオフセット (DC オフセット)、あるいは楕円に変形 (振幅誤差、位相誤差) し、感度劣化要因となる。

■4群 - 1編 - 11章

11-3 受信用デバイス

(執筆著：伊東健治) [2009年1月 受領]

11-3-1 高周波フィルタ

モバイル通信用受信機の高周波フィルタの機能には、(a) 送受信機のアイソレーションを確保するための送受共用機能、(b) 複数の通信周波数帯域を共用するための帯域共用機能、(c) 受信周波数帯域外からの干渉妨害波やミキサの受信スプリアス応答を抑制するための帯域外減衰機能がある。高周波フィルタの構成には、(a) 高誘電率材料による共振器を用いた誘電体フィルタ、(b) 印刷配線パターンを回路素子として用い、多層化することで集積化を行った低温焼成セラミック (LTCC: Low Temperature Co-fired Ceramic) フィルタ、(c) 圧電基板の表面を伝搬する超音波を用いた弾性表面波 (SAW: Surface Acoustic Wave) フィルタなどがある。表 11・1 にこれらの高周波フィルタの特徴と適用例、図 11・7 に外観をまとめる。いずれのフィルタも、回路構成、材料、実装、製造の工夫により小型化が進展し、携帯端末の小型化を支えている。

表 11・1 高周波フィルタの特徴と適用例

項目	誘電体フィルタ	LTCCフィルタ	SAWフィルタ
共振子	λ/4波長のTEMモード共振器	集中定数のLC共振器	圧電材料表面のくし形電極
材料・構造	誘電率40~100の誘電体材料に銀や銅による内導体/外導体を構成した同軸構造	誘電率6~10の多層セラミック基板に銀や銅でパターンを形成した集中定数素子 (L, C)	LiTaO ₃ やLiNbO ₃ などの表面にアルミニウムなどの金属で電極を構成
特性	低帯域内損失, 高帯域外減衰量, 高耐電力	高帯域内損失, 低帯域外減衰量 高耐電力	中程度の帯域内損失, 高帯域外減衰量, 低耐電力
大きさ	大形	中間	小形
主な用途	送受共用器	スイッチ機能付帯域共用器 無線モジュール	イメージ抑制用フィルタ 送受共用器

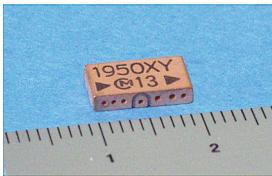
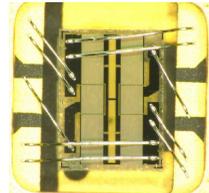
(a) 誘電体フィルタ
(寸法: 10mm×5.3mm×2mm)(b) LTCCフィルタ
(寸法: 3.2mm×2.5mm×1.75mm)(c) SAWフィルタ
(パッケージ内が圧電体チップ)

図 11・7 各種高周波フィルタの外観

誘電体フィルタは、誘電体の中を伝搬する電磁波の波長短縮の効果により、高誘電体材料（比誘電率：20～100程度）を用いて共振器を小型化したものである。誘電体フィルタには、円筒型の誘電体を共振器として励振する構造の導波管モードの共振器を用いたものや、中心導体と外導体からなる同軸構造の TEM モードの共振器を用いたものなどがある。基地局装置用誘電体フィルタには、高帯域外減衰量の観点から導波管モードの共振器が、携帯端末用誘電体フィルタには、小型化の観点から TEM モードの共振器が用いられる。

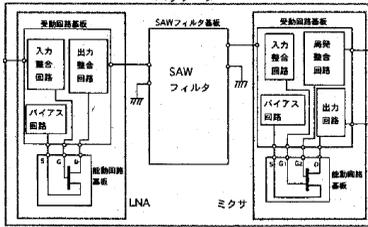
LTCC フィルタは、圧延し薄型化した誘電体基板（ガラス系材料：比誘電率 6～7、あるいはアルミナセラミック系材料：比誘電率 9～10）を多層化し、各層に銀系あるいは銅系の金属パターンを印刷により形成したフィルタである。これは積層キャパシタと同様の多層基板構造であり、量産性に優れる。基本的には集中定数のインダクタ、キャパシタ及びストリップ線路を用いたフィルタである。導体損失により Q は数十程度と比較的低い。そのため、急峻な減衰特性が求められる用途には適さない。一方、基板上に半導体素子、IC を実装することは容易であり、pin ダイオードスイッチと組み合わせた帯域共用器などの高周波モジュールへ適用されている。

SAW フィルタは、圧電体を伝搬する音波の速度が電磁波の速度（光速）より著しく低速であることを利用して、小型なフィルタを実現している。圧電材料の表面にアルミニウムなどによるくし形電極を設け、この電極での電気・機械結合により、弾性表面波を励振している。くし形電極のピッチは弾性表面波の波長から決まり、2 GHz 動作の電極で $0.5\mu\text{m}$ 程度の電極幅・間隔となる。SAW フィルタには、進行波を用いたタップ付きフィルタであるトランスバースル型フィルタ、くし形電極の両側に反射器を設け低損失化を図った共振器型フィルタなどがある。SAW フィルタは主には小信号用途であるが、アルミニウムの電極に銅を添加することで電力印加時の信頼性を高めることができ、携帯端末用送受共用器への適用を実現している。そのほか、薄膜技術の進展により結晶薄膜の厚み方向に伝搬する音波を用いたバルク超音波（BAW: Bulk Acoustic Wave）フィルタが実用化されている。動作周波数が結晶薄膜の厚みで決まるため、電極ピッチで決まる SAW フィルタより動作周波数を高めることができる。

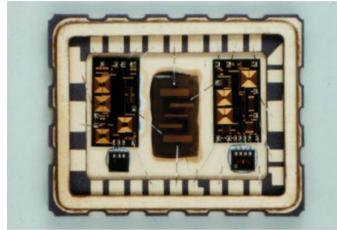
11-3-2 低雑音増幅器（LNA）及び受信ミキサ

(1) 半導体素子

LNA や受信ミキサは、受信機の特性を決定する主要部であり、その低雑音化、低ひずみ化、低消費電流化が進められている。特に低電流動作が求められる端末用回路では消費電流と非線形ひずみのトレードオフが重要な設計問題である。半導体素子としては、GaAs MESFET（Metal Semiconductor Field Effect Transistor）あるいは Si 系の BJT（Bipolar Junction Transistor）や MOS（Metal Oxide Semiconductor）FET が用いられる。材料としての GaAs は、Si より高い電子の移動度を有する。そのため GaAs MESFET は Si BJT や MOS FET と比較し、高周波動作や電流密度で優れる。図 11・8 に示す GaAs 受信フロントエンドでは、2.5 mA の低消費電流で、雑音指数 3.5 dB、IIP3-21dBm を実現し、待ち受け時間の伸延に寄与している。



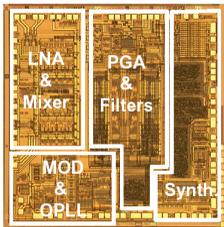
(a) 構成



(b) モジュール外観 (8.2mm x 6.4mm)

図 11・8 GaAs 受信モジュール

近年、半導体プロセスの高度化に伴い、無線回路の集積化の観点で有利な Si 系素子の高性能化が進められている。ヘテロ接合による高移動度を実現した SiGe HBT (SiGe Hetero-junction Bipolar Transistor) や、微細化による素子の高周波化を実現した RF-CMOS などがある。Si 系半導体素子の性能向上に伴い、受信フロントエンドでは、2000 年頃より GaAs MESFET から Si 系半導体素子への置換が進められている。また、半導体素子の微細化に伴い受信フロントエンドは、図 11・9 に示す RF-IC では、受信フロントエンドに加え、PLL、VCO、フィルタ、送信回路 (HPA を除く) が RF-IC に集積されている。



- LNA & Mixer : 受信フロントエンド
(LNA, 直交ミキサ)
- PGA & Filters : 受信用アナログベースバンド回路
(受信フィルタ, 可変利得増幅器)
- Synth : 周波数シンセサイザ
- MOD & QPLL : 送信回路
(直交変調器, 送信用PLL)

図 11・9 GSM 方式携帯電話用 RF-IC の外観 (ダイレクトコンバージョン方式受信機)

(2) LNA

本章 11-2-1 節で述べたように、LNA 特性は受信機の雑音特性の主要因である。図 11・10 に LNA の回路例を示す。5 GHz 以下の周波数領域においては、一般にソース接地 (あるいはエミッタ接地) された LNA 用半導体素子は高入力インピーダンスであり、絶対安定条件を満たさない。そのため、リアクタンス素子のみによる整合は困難であり、負荷条件により発振の可能性がある。そのため (a) 付加抵抗, (b) 並列帰還抵抗, (c) 直列帰還インダクタなどを付加し、入力整合を容易にするとともに、安定化を図る手法がとられる。また (d) カスコード接続 FET も、入出力端子間のアイソレーションを高める効果により安定化を図る。次に LNA の整合条件について述べる。一般に高利得条件と低雑音条件で、半導体素子の整合条件が異なる。そのため、利得と雑音をトレードオフし、整合回路を決定する。図 11・10(c) の直列帰還インダクタの付加は、雑音と利得に対する整合条件の違いを緩和するために有効である。

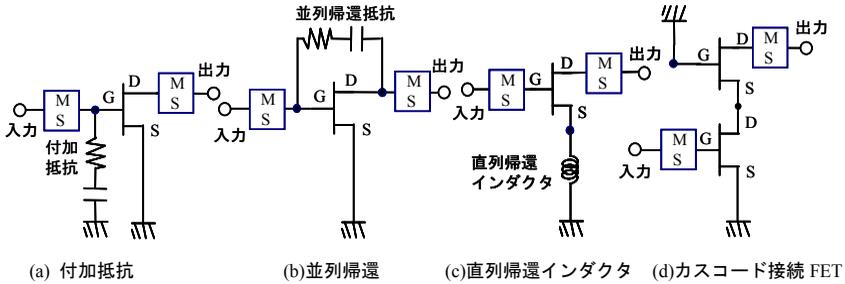


図 11・10 LNA の回路例

(図中, MS: 整合回路, G: ゲート端子, D: ドレイン端子, S: ソース端子)

(3) 受信ミキサ

本章 11-2-2 節で述べたように、受信ミキサ特性は受信機の非線形ひずみ特性の主要因である。ミキサ用半導体素子としては、ダイオードや 3 端子半導体素子が用いられるが、モバイル通信は、主に 3 端子半導体素子を用いることにより、周波数変換機能と増幅機能を実現する。図 11・11 に受信ミキサの回路例を示す。(a) はデュアルゲート FET ミキサ、(b) はギルバート形ミキサである。デュアルゲート FET ミキサは、増幅用 FET とゲートミキサ用 FET とをカスコード接続した構成と考えることができる。RF 波を第一ゲート端子 (G1) に加え、第二ゲート端子 (G2) に加えた局部発振波によりスイッチングし、周波数混合を行う。そしてドレイン端子 (F) から IF 波を取り出す。分波回路が不要であり、小型化に適するため広く用いられている。ギルバート形ミキサは半導体集積化に適した回路であり、差動動作により二重平衡形ミキサとして動作する。そのため、広く RF-IC 用受信ミキサとして用いられている。

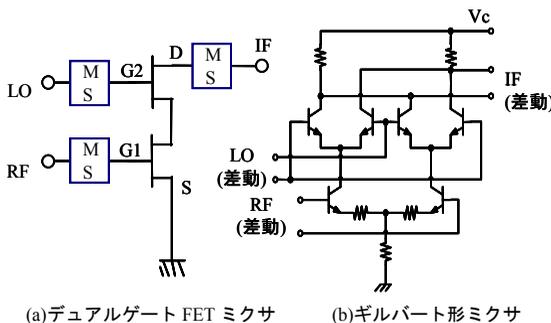


図 11・11 受信ミキサの構成

(4) 直交ミキサ

ダイレクトコンバージョン方式の受信機では、LNA の後段に直交ミキサが配置される。直交ミキサは直交検波器あるいは直交復調器とも呼ばれ、信号波と局部発振波を複素乗算し、I 成分と Q 成分のベースバンド (BB) 波を出力する。図 11・12 に直交ミキサの構成を示す。90

度分配器と二つの平衡型ミキサとから構成される。検波時のベクトル誤差を抑制するため、90度分配器には高い位相／振幅精度が要求され、平衡型ミキサには低 DC オフセットが要求される。また受信フロントエンドとして用いるため、低雑音特性、低二次ひずみ特性、低三次ひずみ特性が求められる。90度分配器には、RF-IC としての集積化に適した分周器を用いた構成やポリフェーズフィルタなどの構成が一般的である。マイクロ波以上では、MIC (Microwave Integrated Circuit) 化に適した 1/4 波長結合線路や LPF/HPF 型移相器が用いられる。平衡型ミキサには、主には図 11・11(b)に示したギルバート形ミキサが用いられるが、RF 波と局部発振波との干渉による感度劣化を抑制するために偶高調波ミキサを用いる場合もある。

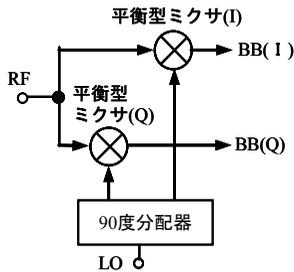


図 11・12 直交ミキサの構成

■参考文献

- 1) 奥村善久, 進士昌明, “移動通信の基礎,” 電子情報通信学会, 1986.
- 2) 野島俊雄, 山尾泰, 高野健, 伊東健治, 檜橋祥一, “モバイル通信の無線回路技術,” 電子情報通信学会, 2007.