

RF 受信機設計の基礎

伊東 健治 (itoh.kenji@ieee.org)

金沢工業大学

Basic Course in RF Receiver Design

Kenji ITOH (itoh.kenji@ieee.org)

Kanazawa Institute of Technology

1. まえがき

本講座では無線回路を中心に無線通信受信機の基本構成と総合性能に対する劣化要因となる雑音や非線形ひずみなどの無線回路の性能について述べる[1][2].

2. 受信機の基本構成と動作

無線通信受信機では、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とが求められている。図1に無線通信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)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抑制する。低雑音増幅器(LNA)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1に示すようにベースバンド部から無線部の制御を行う。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。

無線通信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1)の他に、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(図2)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、フリッカ雑音および2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、2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。イメージリジエ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。

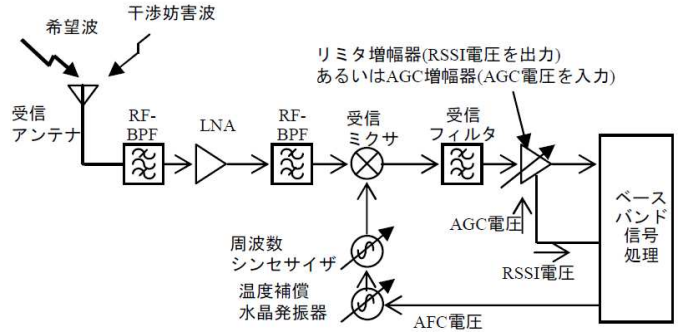


図1 無線通信受信機の基本構成 (ヘテロダイン方式)

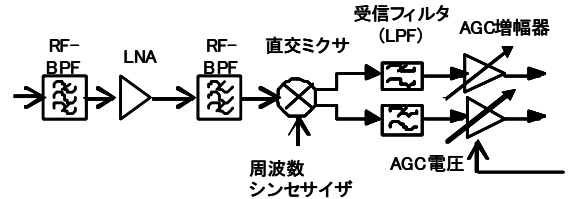


図2 ダイレクトコンバージョン受信機の構成

3. 無線回路の性能

3.1 雑音特性

無線伝送路およ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。移動通信では、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よる熱雑音や、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。

RF 回路の雑音特性は内部雑音で規定され、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 $k \cdot T \cdot (F-1) \cdot B$ (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幅)の白色雑音が、受信機入力端に重畳するとみなせる。移動通信受信機では、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。

受信機を構成する無線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、全体の雑音指数 F は

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

となる。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(1)より受信機の雑音指数 F に対して、微弱な受信波を増幅する最前段の回路、すなわち送受共用器の損失と 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

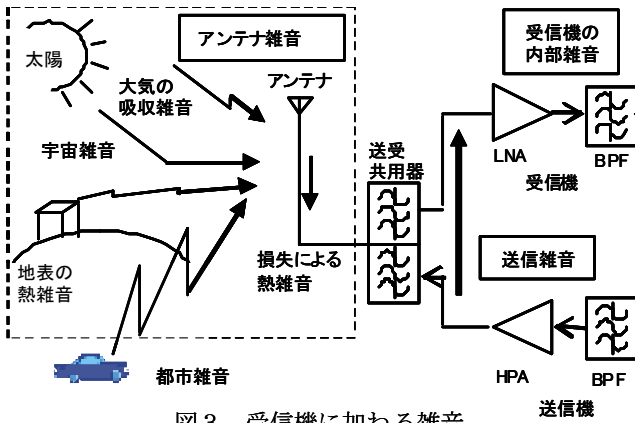


図3 受信機に加わる雑音

局部発振波 f_p および送信波 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 HALF-IF 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じ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.

3.3 非線形ひずみ特性

受信機へ過大な信号が入力されると, 無線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じると, 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, 感度の劣化を生じる. 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.

高レベルの干渉妨害波を入力したときの劣化は, 干渉妨害波が無線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)は隣接チャネルの干渉妨害波による3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3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2次相互変調ひずみによる劣化である. 図6に示すように, 等振幅の入力波と3次相互変調ひずみ波の延長線の交点を3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, 3次の非線形ひずみを定義する. 無線回路の各段の $IIP3$ 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.

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

これより, 受信回路全体の $IIP3$ に対し, 後段の回路の3次ひずみ特性が支配的であることがわかる. 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3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.

3.4 線形ひずみ特性

線形ひずみは, 無線回路に用いるフィルタが理想的なる波特性, たと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じる波形ひずみであり, 符号間干渉による感度劣化を生じる.

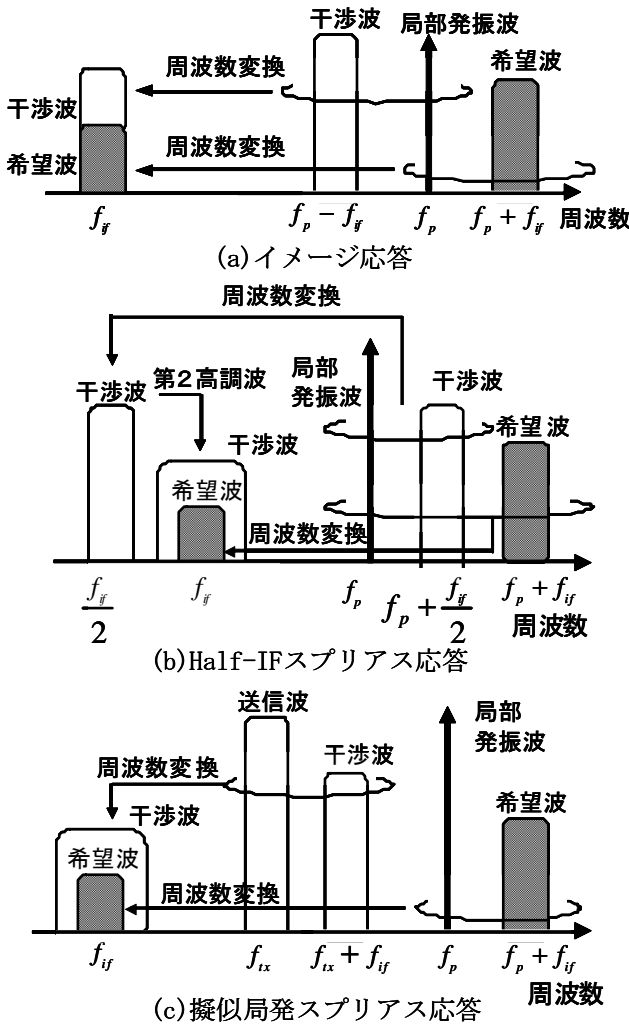


図4 受信スプリアス応答の例

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.

3.2 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無線回路の応答であり, 受信機のブロッキング性能の主たる劣化要因である. 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_{ip}) に変換され感度を劣化させる場合がある. f_{if}

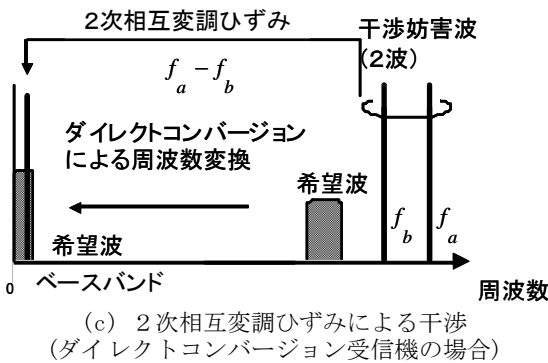
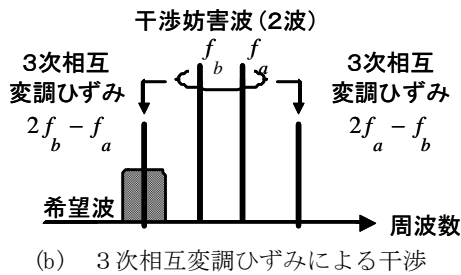
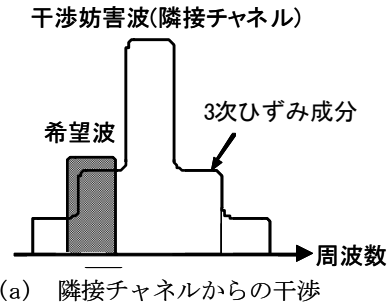


図5 非線形ひずみによる感度劣化の様子

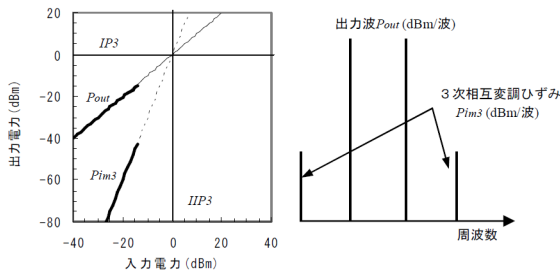


図6 3次相互変調ひずみの説明図

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。

3.5 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洩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。

3.6 無線回路の性能と受信機性能の関係

以上述べた無線回路の性能により、受信環境から要求正のが規定される受信機性能が決まる。その詳細は文献[1][2]を参考にされたし。

4. むすび

無線回路を中心に受信機の基本構成と雑音や非線形ひずみなどの無線回路の性能について述べた。

表1 主要な受信性能と関係する無線回路の性能

受信性能	関係する無線回路の性能
1.感度	(1)雑音指数 (2)送信波による雑音特性の劣化 ・受信機の飽和による雑音指数の劣化 ・送信波の受信帯雑音 ・ミキサの2次ひずみによる送信波の自己検波(DCR) (3)復調性能 (4)無線回路による復調性能の劣化 ・局部発振器の位相雑音 ・受信フロントエンドの非線形ひずみ ・受信フィルタの線形ひずみ ・直交検波時のベクトル誤差
2.隣接チャネル選択度	(1)受信フィルタの減衰量 (2)干渉波のスペクトル広がり ・局部発振器の位相雑音 ・受信フロントエンドの3次・5次ひずみ ・受信フロントエンドの混変調ひずみ (3)干渉波の自己検波(DCR) ・ミキサ、ベースバンドの2次ひずみ
3.相互変調特性	(1)受信フロントエンドの3次ひずみ (2)受信フィルタでの干渉波の減衰量
4.プロッキング	(1)干渉波周波数でのRF-BPFの減衰量 (2)干渉波周波数でのミキサのスプリアス応答 (3)受信フロントエンドの飽和特性

(DCR)はダイレクトコンバージョン受信機固有の劣化要因

文 献

- [1] 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, (2007-9).
- [2] 伊東健治, "移動通信用受信機設計の基礎," MWE2005 digest, pp.577-pp.586 (2005).