

■4 群（電子情報通信基礎） - 1 編（無線通信基礎）**12 章 送受信機の性能試験**

(執筆者：内野政治) [2009年3月受領]

■概要■

送受信機の性能試験について、章を三分し、送信機関連、受信機関連、技術適合証明の内容で解説を行う。

送受信機は公共の有限の資源である電波を利用する装置であるため、電波法をはじめとする関連法規によって、種々の規格が定められている。個々の規格については、総務省や指定検査機関あるいは電波産業会などのホームページに公開されている。しかしながら、複雑・多機能化したデジタル無線機器の性能測定は、もはや人手には負えず、対応した測定ソフトによってシグナルアナライザなどの測定器で計測されるのが通例である。

このため、何ら規格・法規の知識がなくとも、簡単に一応の結果が得られる利便性がある。その一方で、測定器の誤った使い方によって、誤った結果が得られてしまう懸念もある。正しい測定のためには、送受信機の性能試験方法を正しく理解している必要がある。

本章前半では、重要な送信機特性の一覧を掲げ、主として使用される測定器や比吸収率の測定などについて概説する。特に隣接チャネル漏えい電力比（ACLR）は重要なので、独立して一節とし、測定手法・留意事項などを解説する。また個々の規定の項目について、意味・測定手法・対策などを簡略に述べる。

受信特性についてはその一覧表とともに、よく使用される受信機の一形態であるスーパーヘテロダイン方式について、構成と動作原理を概説する。また、受信系の個々の規定の項目について、意味・測定手法・対策などを簡略に述べる。

送受信機をつくって、性能を測ってみたが、規格に入らなかった。あるいは、送受信機の調子が悪い、さてどうしたものか・・・という場面に遭遇したとき、本章に目を通すことが問題解決の端緒となるよう、実務的な記述を試みるつもりである。

本章の最後に、技術適合証明について、日本と海外の両方を含め、TELEC, JATE, GCF, CE などについて概説する。

【本章の構成】

本章では送信機特性概要（12-1 節）、送信系規定の項目（12-2 節）、受信特性概要（12-3 節）、受信系規定の項目（12-4 節）、技術適合証明（12-5 節）について解説した。

■4 群 - 1 編 - 12 章

12-1 送信機特性概要

(執筆者：内野政治) [2009年3月 受領]

表 12・1 に電波法などによって、測定することを義務づけられている送信機特性の一例を掲げる。表からも読み取れるとおり、スペクトルアナライザが送信機の性能試験に欠かせない計測器であることが分かる¹⁾。

最新型のスペクトルアナライザは、電力計や周波数カウンタを内蔵している機種もある。また、シグナルアナライザと称し、スペクトルアナライザの中間周波数出力を AD 変換し、直交信号に分解した複素標本列をデジタル分析できる機種もあり、年々複雑化・高機能化しているデジタル無線通信において、送信機の特性測定には欠かせない存在になっている。

また、送信機の効率など、測定を義務づけられていないが、送信機の性能を評価するうえで欠かせないパラメータも多数ある。送信機特性の詳細については、次節以降に記述した。

表 12・1 送信機特性一覧表（法律で義務づけられている性能）

	送信機の測定項目	主に使用される測定器
1	周波数	周波数カウンタ, スペクトルアナライザ
2	占有周波数帯幅	擬似音声発生器, スペクトルアナライザ
3	スプリアス発射または不要発射の強度	スペクトルアナライザ
4	空中線電力	電力計, 電界強度測定器, スペクトルアナライザ
5	比吸収率(SAR)	比吸収率測定装置
6	周波数偏移, 変調度	低周波発振器, 直線検波器
7	プリエンファシス特性	低周波発振器, 直線検波器
8	搬送波電力	低周波発振器, スペクトルアナライザ
9	総合周波数特性	低周波発振器, 電力計
10	総合ひずみ及び雑音	低周波発振器, 直線検波器, 雑音ひずみ率計
11	送信立ち上がり時間, 立ち下がり時間	オシロスコープ, スペクトルアナライザ
12	隣接チャネル漏えい電力	低周波発振器, スペクトルアナライザ
13	送信 OFF 時電力	低周波発振器, スペクトルアナライザ
14	送信速度	低周波発振器, オシロスコープ

比吸収率 (Specific Absorption Rate) とは、単位質量の組織に単位時間に吸収される電力を意味し、単位は W/kg である。人体に許容される電磁波の尺度として全身平均 SAR と、局所 SAR の二つの基準値があり、携帯電話などでは後者が採用されている。局所 SAR は、人体が電磁波にさらされることによって、任意の 10 g 当たりの組織に 6 分間に吸収される電力の平均値をいう。

人体と同じ外形、同じ電気的定数をもったファントムと、測定対象となる携帯電話などを把持するスタンド、SAR 電界プローブから構成される SAR 測定システムを使用し、携帯電話を最大出力状態として SAR 値を計測する。人体側頭部の付近で使用される携帯電話の場合、局所 SAR の許容値は 2 W/kg となっている。

■参考文献

- 1) 森屋徹昌, 関 和雄, “高周波計測,” 東京電機大学出版局, 1998.

■4 群 - 1 編 - 12 章

12-2 送信系規定の項目

(執筆者：内野政治) [2009年3月 受領]

送信系規定の代表的な項目として、周波数安定度、占有帯域幅、隣接チャンネル漏えい電力比、送信機雑音、送信電力偏差、送信相互変調、スプリアス放射、変調精度があり、本節において、個別に概説する。詳細については、個別規格や参考文献 2) を参照されたい。

12-2-1 周波数安定度

周波数安定度は、局部発振周波数や送信周波数の周波数偏差であり、法律で厳格に定められている。無線機器の周波数安定度は、内蔵されている基準の水晶発振器の性能で決まる。高安定を要求する場合は、温度補償型水晶発振器 (TCXO)、デジタル制御型の温度補償水晶発振器 (DTCXO)、恒温槽制御型水晶発振器 (OCXO)、原子発振器などを使用する²⁾。この順番で安定度が高く、消費電力が大きく、価格が高くなるとされている。最近では GPS と同期し、ほとんど誤差のない基準周波数を供給する発振器もある。

12-2-2 占有帯域幅

占有帯域幅は、送信電力の所定割合の電力が入る帯域幅であり、前節の ACLR と類似の手法で測定される。狭帯域・高周波数ほど、スペクトルアナライザの位相雑音特性の影響を受けやすくなる。また送信電力が低いほど、あるいは帯域幅が広がるほど測定が困難になる。

12-2-3 ACLR

隣接チャンネル漏えい電力比 (ACLR) とは、送信を許されているチャンネル内の送信電力を基準にとし、そこに隣接する左または右のチャンネルに漏れ込む電力の比である。通常の無線送信機の場合は送信電力はあらかじめ定められているので、隣接する左または右のチャンネルに漏れ込む電力を隣接チャンネル漏えい電力と定め、その許容値が指定される。

隣接チャンネル漏えい電力の主因は、発振器の位相雑音³⁾と送信機終段のひずみ⁴⁾である。また、受動相互変調と呼ばれるフィルタやコネクタなどの受動素子に原因する場合もある。通常は左右のチャンネルに漏えいする電力は相等しいが、送信フィルタや直交変調器の影響で左右非対称になる場合もある。

特に注意する必要があるのは、スペクトルアナライザの過負荷である。スペクトルアナライザの入力には通常は低域通過フィルタが挿入されているだけなので、被測定信号の全電力が印加される。一方、スペクトルアナライザの画面には分解能帯域幅を通過した電力のみが表示される。例えば、分解能帯域幅 1 kHz で、チャンネル幅 1 MHz に様に広がる 10 dBm の被測定信号を測定した場合、画面には縦軸 -20 dBm、横軸 1 MHz 幅の矩形のスペクトルが表示される。-10 dBm の基準レベル (ATT 0 dB) だと、最大入力レベルを超えることになり、ACLR は大きく劣化することとなる。

大電力の場合は外部に減衰器を取り付けたり、振幅変動の大きい場合は、スペクトルアナライザの過負荷アラームに常に気を配り、アラームが表示されたデータは採用しないなど、注意をすべきである。アラームも万全ではなく、クリティカルな測定の場合はオシロスコー

で波形を直接観測するなど、ピークレベルの確認をすることが必要である。

ACLR がスペクトルアナライザの性能を上回る場合は、帯域除去フィルタを使用し、中央のチャンネルの電力のみを低減したり、帯域通過フィルタを使用し、特定のチャンネルの電力を抜き出したりする手法がある。隣接チャンネル漏えい電力の測定窓が矩形でなくなるので、フィルタの周波数特性の補正が必要となる。

隣接チャンネル漏えい電力が多いと、隣接するチャンネルで行われている無線通信に妨害を与えるので、各通信方式に応じ適切な許容値が定められている。電池で動作する無線機器においては、電源電圧の低下とともに ACLR が劣化する場合もあり、少なくとも電源電圧の最大と最小の 2 点で測定する必要がある。

チャンネル内の電力測定は、スペクトルアナライザの分解能帯域幅を指定の帯域幅に設定し、測定対象となるチャンネルの下端から上端までを掃引し、チャンネル内の全電力を積分により求める。通常、分解能帯域幅はチャンネル幅の 1 % 程度に選ばれる場合が多く、チャンネル間隔が狭い場合、掃引に多大な時間を要する。

振幅変動の大きい信号では、隣接チャンネル漏えい電力が大きく変動するため、スペクトラムアナライザを用いて ACLR を測定する際に、測定結果を安定させるために平均化をする手法が一般的である。スペクトラムアナライザは平均する回数分だけ掃引を繰り返すので、測定に多大な時間を要する。シグナルアナライザを使用すると、帯域内のデータを一気に取り込むため、同じ回数の平均を高速に行える。

12-2-4 送信機雑音

送信機雑音は、送信機から発せられる通信波以外の雑音で、通信に有害なものである。送信機と受信機が空中線共用器によって結ばれている場合、特に問題となる。送信機側と受信機側の分離度が高くない場合、受信帯域やスプリアス帯域内に送信機雑音が入り込むと受信機の感度劣化の原因となる。

送信周波数に近い周波数帯の送信機雑音の原因は、局部発振器の位相雑音であることが多い。送信周波数と無関係な場合は、プロセッサやスイッチング電源あるいはクロック信号など多々あり、一般にはイントラ EMC と呼ばれている。

12-2-5 送信電力偏差

最大送信電力の偏差は、通常関連法令に定められており、上限と共に下限も定められてる。

12-2-6 送信相互変調

送信相互変調は、携帯電話の基地局など、一つのアンテナを複数の送信機で共用する際に問題となる。例えば、隣接する二つのチャンネルで同時に送信すると、ほかの送信電力が送信終段に影響を与え、三次の相互変調により、隣接する 2 チャンネルに接するチャンネルに妨害波が発生し、このチャンネルでの受信に妨害を与える。

12-2-7 スプリアス放射

スプリアス放射は、スプリアス領域における不要な放射のことである。その許容値は法令により厳格に規定されている。通常はアンテナ端子において測定する場合が多い。測定はス

ベクトルアナライザを所定の分解能帯域幅とし、定められた範囲をピーク検波・最大値ホールドで複数回掃引し、その最大値を求め、これが許容値を超える場合に精測を行う。精測は前述の測定で最大値を与える周波数において、0 スパンで時間掃引し平均電力や尖頭電力を求め、規格と照合する。

通常スプリアス発射の許容値は全周波数で一定ではなく、周波数帯ごとに異なる場合が多く階段状のスペクトルマスクで定められ、これをスペクトルエミッションマスク (SEM) と呼ぶ。最近のスペクトルアナライザには、種々の通信方式の SEM があらかじめ内蔵されていることが多い。

12-2-8 変調精度

変調精度 (EVM) はデジタル変調波の品質を示す尺度の一つであり、各シンボルを構成する IQ 平面上の点 (これをコンステレーションと呼ぶ) が、理想の点からずれている度合いである。理想点と実測点間の距離を自乗し、これを全点で平均したものを平均電力で除した値とする場合が多いが、各通信方式の規格で特別に定めていることも多く、専用のソフトを搭載したシグナルアナライザで測定するのが通常である。

■参考文献

- 1) 斉藤忠夫, 立川敬二, “新版 移動通信ハンドブック,” オーム社, 2000.
- 2) 吉村和幸, 大浦宣徳, 古賀保喜, “周波数と時間—原子時計の基礎原子時のしくみ,” 信学会, 1995.
- 3) K. Feher, “Telecommunications measurements, analysis, and instrumentation,” Prentice-Hall Inc., 1987.
- 4) 斉藤洋一, “デジタル無線通信の変復調,” 信学会, 1996.

■4 群 - 1 編 - 12 章

12-3 受信機特性概要

(執筆著：内野政治) [2009年3月 受領]

受信機特性の項目の一例を表 12・2 に示す。現在使用されている無線通信用受信機のほとんどは、スーパーヘテロダイン方式を採用している。受信したい高周波 (RF) 信号を含む一定の帯域幅を、帯域通過特性をもった受信フィルタでろ波し、低雑音増幅器 (LNA) で増幅した後、ミキサに導く。

ミキサは局部発振 (LO) 信号と高周波信号の積をとり、中間周波数 (IF) フィルタに送出する。IF フィルタは固定中心周波数の狭帯域フィルタで、バンド内の任意の特定チャネルのみを抽出する。抽出すべきチャネルは LO 周波数で定める。IF フィルタ出力は IF 増幅器で増幅され、目的に応じた検波方式で検波されベースバンド信号となり、復調器で復調される。

通常、LO 発振器は位相固定ループ (PLL) を使った周波数シンセサイザで実現され、TCXO などの基準発振器の有理数倍の周波数の正弦波を出力する。チャネル間隔の整数倍の周波数が LO 周波数となり、受信したい RF 周波数と LO 周波数の差が IF 周波数となる。この結果、スーパーヘテロダイン方式では、LO 発振器の周波数を指定するだけで、バンド内で任意のチャネルの任意帯域幅の信号を取得できる。

副次発射は、受信中に副次的に発射される LO 信号などの漏えいが主因であり、ミキサや LNA のアイソレーション、受信フィルタの周波数特性に依存する。また、クロックやスイッチング電源のリプルなどに起因する場合もあり、これらが受信周波数に重なると、感度劣化を引き起こす場合がある。

表 12・2 受信特性一覧表

	受信機の測定項目	主に使用される測定器
1	副次的に発する電波などの限度	電界強度測定器、スペクトルアナライザ
2	感度	標準信号発生器、雑音ひずみ率計
3	通過帯域幅	標準信号発生器、周波数計、レベル計
4	減衰量	標準信号発生器、周波数計、レベル計
5	スプリアス・レスポンス	標準信号発生器、レベル計、雑音ひずみ率計
6	隣接チャネル選択度	低周波発振器、標準信号発生器、レベル計またはオシロスコープ
7	感度抑圧効果	標準信号発生器、レベル計
8	相互変調特性	標準信号発生器、雑音ひずみ率計
9	局部発振器の周波数変動	周波数カウンタ
10	ディエンファシス特性	低周波発振器、直線検波器
11	総合ひずみ及び雑音	標準信号発生器、雑音ひずみ率計

■4 群 - 1 編 - 12 章

12-4 受信系規定の項目

(執筆著：内野政治) [2009年3月 受領]

受信系規定の代表的な項目として、受信感度、感度抑圧、受信相互変調、隣接チャネル選択度、ブロッキング特性があり、本節において、個別に概説する。詳細については、個別規格や参考文献 1, 2) を参照されたい。

12-4-1 受信感度

受信感度は、復調器の E_b/N_0 特性と、LNA の雑音指数 (NF) と受信フィルタの挿入損失 (IL) によって定まるが、受信機内部の電子回路から発生する妨害波によって劣化する場合もある。最近のデジタル化された受信機では、 E_b/N_0 特性は理論限界に近い性能が実現されているので、NF, IL, 内部雑音の 3 要因で感度を支配しているといつて過言でない。NF は半導体技術、IL は共振器などの受動素子技術によって、理論限界に近いところまで進歩してきているため、内部雑音の抑制技術が今後の最大の課題と考えられる。

12-4-2 感度抑圧

感度抑圧は、LO 信号の位相雑音や内部雑音あるいは送信機雑音などによって発生する。LO 信号の位相雑音はほぼ VCO の性能によって定まり、それを左右するのは発振器を構成するトランジスタなどの能動素子、共振器やバラクタの Q である。一般に周波数の可変範囲を広げるほど、あるいは発振周波数を高くするほど、位相雑音は増加する傾向にある。

12-4-3 受信相互変調

受信相互変調は、隣接チャネルと次隣接チャネルに同電力かつ高レベルの干渉波を加え、感度の劣化度合いを数値化する。LNA の相互変調 (IM) 特性及び、干渉信号源や LO 信号の位相雑音が主因である。LNA の IM 特性は同電力で周波数 f_1, f_2 の 2 波正弦波を被測定 LNA に入力し、三次の IM 成分である $2f_2 - f_1$ や $2f_1 - f_2$ の相対値をスペクトルアナライザで測定する。

12-4-4 隣接チャネル選択度

隣接チャネル選択度は、隣接チャネルの高レベルの干渉波を加えたときの、感度劣化量の規定である。デジタルフィルタやアナログフィルタを問わず、現実のフィルタは周波数特性が階段状にはならず、ある傾斜をもっており、スロープを急峻にすればするほど遅延時間が増加する。フィルタのスロープが隣接チャネルに入り込むことを、あらかじめ加味して受信機は設計されているので、隣接チャネル選択度にそれが反映されることになる。加えて、LNA・ミキサ・IF 増幅器・直交検波器の IM 特性あるいは、LO 発振器の位相雑音などの影響も受ける。

12-4-5 ブロッキング特性

ブロッキング特性は、受信チャネル以外の周波数帯に強い干渉波が存在すると、それが受信フィルタを通過し LNA やミキサにひずみや飽和をもたらす。特に、受信周波数から LO 周

波数を挟んで反対側にあるイメージ周波数の帯域に干渉波がくる場合、最も顕著に影響が現れる。一般に IF 周波数は受信周波数よりも十分小さく、したがって、イメージ周波数も受信周波数の近くになる場合が多い。このため受信フィルタによって、この周波数の干渉波に十分な減衰が与えられず、感度劣化などの受信障害を引き起こす。IF 周波数をより高くとりうるダブルスーパーヘテロダイン方式などを採用したり、イメージ周波数を中心周波数とする帯域除去フィルタを挿入したり、ミキサ 2 個と直交分配器を使ってイメージ除去ミキサを構成するなどの対策が知られている。

ミキサを理想の乗算器とみて、LO 信号に高調波などのスプリアスが含まれている場合、受信フィルタの遮断特性が不十分であれば、それらのスプリアス周波数に IF 波数を加算あるいは減算した周波数においても、アンテナ端子から IF フィルタ出力まで電力が伝送されることになる。この結果、感度は十分でないものの、受信チャネル以外の周波数でも受信可能となり、これをスプリアス受信と呼ぶ。スプリアス受信を生ずる周波数に強い干渉波が存在すると、前述のブロッキングの原因となり、受信障害をもたらす。

■参考文献

- 1) 伊藤健治, “移動通信受信機設計の基礎,” MWE2007, TL05-01
(<http://www.apmc-mwe.org/mwe2007/pdf/TL05-01.pdf>)
- 2) 斉藤忠夫, 立川敬二, “新版 移動通信ハンドブック,” オーム社, 2000.

■4 群 - 1 編 - 12 章

12-5 技術基準適合証明

(執筆者：内野政治) [2009 年 3 月 受領]

限りある周波数資源の有効利用を図るとの位置づけで、日本国内だけではなく世界各国で無線通信に関する技術基準が定められている。電波を使用する機器はその技術基準に適合している必要があり、その基準認証制度の概要を述べる。

国内においては総務省が電波法のもとに無線局機器に関する基準認証制度として、省令、告示にて特定無線設備の技術基準適合証明などに関する規則や特性試験の試験方法を定めている。いわゆる技術基準適合証明/認定(技適)というのは上記の法令による基準に適合していることを示すものである。同様に電気通信事業法のもとにネットワークへの接続性を中心に、端末機器の技術基準適合認定などに関する規則や試験方法の告示による技術基準認証が規定されている。

これらの技術基準は国による強制規格であり、各種の通信システムなどが互いに、またレーダや電波天文台などの電波利用分野間で干渉し合い、ほかに障害を与えないことを主目的に規定しているものである。したがって、主として本章 12-1 節に示す送信特性や人体に対する影響規格(SAR)を測定する。ただし、型式検定が必要となる無線機器では受信特性も測定する。

電波に関しては世界各国地域の主管庁が基準を定め、IMT2000 システムのように全世界で共通に使用される無線機器であっても、国内と EU では同じ送信特性項目でも各国の周波数利用上の制約などから基準値は異なることがあり、各国別に技術基準が定められている。

これら技術基準適合を測定し、可否を判定する方法は大きく分けて 3 通りが運用されている。

(1) 総務省への登録認証機関によるもの：

TELEC ((財)財団法人テレコムエンジニアリングセンター)、JATE ((財)電気通信端末機器審査協会) など 10 機関で技適が行われている。

(2) 自己確認によるもの：

校正基準を満たした測定器を使用して製造者が自ら判定し、総務省に登録を行うものである。欧米では普及しているが国内でも実施例が増加している。

(3) 国際相互承認協定 (MRA : Mutual Recognition Agreement) によるもの：

日本と相手国 (EU, シンガポール, 米国) 間で締結した協定に基づき、海外の認証機関が現地で日本の技適を行うことができる。むしろ、日本で EU などの技術基準 (CE マークなど) の認証も行えるものである。第 3 世代携帯電話などの国際ローミングが円滑になり、また生産の国際分業にも寄与することが期待されている。

上記の強制規格は機器の性能、動作を保証するものではない。他システム、ネットワークに障害を与えないことを担保するに止まる。しかし、IMT2000 などの通信システムでは国内はもちろん世界で共通に使用できる標準化に基づいて開発・生産されている。3GPP (3rd

Generation Partnership Project) のような国際フォーラム規格への適合性は技適とは別に, GCF (Global Certification Forum) で RF コンフォーマンステストとして送信試験, 受信試験, パフォーマンス試験を 3GPP 標準規格に基づき行う. 試験項目と測定法は 3GPP 規格として公開されている.

更に実際の携帯電話網に端末機が適合するかなどを試験するものとして IOT (Inter Operability Test) があり, 送受信特性, 接続性の試験が行われている.

広義の送信特性試験に当たるパソコンなどの非意図的放射機器から発生する妨害波の技術基準適合は, 国際無線障害特別委員会 (CISPR) の勧告に基づき, 国内では (財) VCCI 協会が自主規制として製造メーカーの自己確認を認証している. 米国では連邦通信委員会 (FCC) 規格として行われており, これも日米間での相互認証が実施されている.