

■S4 群(宇宙・環境・社会)- 1 編(電波環境)

1 章 電波環境の実態

(執筆者：松本 泰) [2010年12月 受領]

■概要■

電波環境の実態の把握は、無線通信システム導入の際の基本検討としての周囲雑音や干渉波による通信性能への影響の評価、医療用機器等の電子機器の電波による誤動作防止や人体への健康影響の防止のための電波強度分布の測定、電波利用状況の基礎資料としての実態把握など、多くの観点から重要である。

図1・0に電波環境を生成する電波を区分した例を示す。ここでは所望信号(通信信号)以外の不要信号を、無線通信業務によって生ずる干渉波(隣接チャンネル干渉, 同一チャンネル干渉)、無線通信業務以外によって生ずる不要信号(電子機器等からの非意図的放射などの人工雑音及び自然雑音のうち非ガウス性の雑音成分)、及び白色ガウス雑音に分類している。この様な分類の定義はITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector: 国際電気通信連合 無線通信部門)において議論されており¹⁾、電波を通信目的で利用する観点から、受信機に入力される電波を所望信号とそれ以外の不要信号に区分したものである。

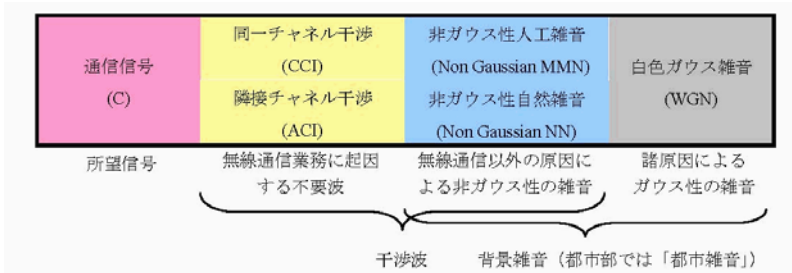


図1・0 電波環境に用いる干渉波と雑音の区分

(C: Carrier, CCI: Co-Channel Interference, ACI: Adjacent Channel Interference, MN: Man Made Noise, NN: Natural Noise, WGN: White Gaussian Noise)

■本章の構成■

本章では電波環境の実態について、不特定多数の波源からの放射の寄与としての背景雑音と、特定の電波利用システムにより生ずる電波環境の二つに大別して記載する。

1-1 節では背景雑音について述べる。背景雑音は不特定多数の非意図的放射の寄与による人工雑音と、自然雑音を含む。これらの雑音の特性が無線通信システムの通信品質に大きく影響するため、無線システム導入に際して最も基本的な情報となる。また上記図1・0では背景雑音を、その確率分布によりガウス雑音と非ガウス性の雑音に分類している。これはガウス雑音が否かによって測定法や通信システムへの影響の評価方法がかなり異なるためである。ガウス雑音成分の測定は、ITU-Rにおいて無線通信システム設計時の基礎資料として長年続けられており²⁾、測定法³⁾や解析手法も詳細に検討されている⁴⁾。ITU-Rではガウス背景雑音

のレベルを、無損失かつ受信機入力に整合したアンテナを設置した際のアンテナ温度の常温からの上昇分(雑音指数)として定義している。一方、非ガウス性背景雑音は確率分布が様々であり取扱いも単純ではない。例えば非ガウス性雑音では白色ガウス雑音のように振幅統計量を測定周波数帯域幅によって規格化することができない。このため ITU-R においても非ガウス性背景雑音に対する評価方法の検討が続けられている。また雑音のモデル化や通信品質への影響を評価する手法も一般にはガウス雑音に比較して複雑である(第2章を参照のこと)。なお、実測された非ガウス性雑音には、測定に使用した受信系の熱雑音(加法性のガウス雑音)も含まれることに注意が必要である。

次に 1-3 節では、代表的な電波利用システムの運用によって生ずる電波環境の概要を紹介する。1-3-1~1-3-5 節において各種の通信・放送用の設備の周囲において形成される電波環境について述べる。これらは通信目的に利用される電波であり、図1の分類では所望波に分類される。また、1-2-6 節では ISM (Industrial, Scientific, and Medical: 産業・科学・医療用) 高周波利用機器の周囲の電波環境について述べる。ISM 高周波利用機器は通信以外の目的(加熱, 加工, 医療, エネルギー伝送など)に高周波を利用する機器の総称である。ISM 機器の放射する電波は図1の分類では干渉波であり、人工雑音のひとつの構成要素となる。

通信・非通信目的のいずれの場合も電波利用機器の近傍では電磁界強度が高くなるので、人体への健康影響や植え込み型医療機器をはじめとする周囲の電子機器の誤動作の防止が課題となる。このため電波利用機器周辺の電磁界強度把握を目的とした実験的検討、数値計算による検討などが行われる。また ISM 高周波利用機器からの電波は、割当てられている ISM 周波数帯における放射が支配的である。しかし近年、無線 LAN や無線 BAN (Body Area Network) など ISM 周波数帯を利用する無線通信システムが増加しており、これらの通信システムでは ISM 機器からの放射電波による干渉対策も課題となる。

■参考文献

- 1) Document R03-WP1C-C-170-E, "CONTRIBUTION TO THE STUDY OF TECHNIQUES FOR THE MEASUREMENT OF RADIO NOISE IN RADIO APPLICATIONS", ITU-R, June 2007.
- 2) Recommendation P. 372-9, "Radio noise," ITU-R, 1951~2007.
- 3) Recommendation SM. 1753, "Method for measurements of radio noise," ITU-R, 2006.
- 4) Report P. 2089, "The analysis of radio noise data," ITU-R, 2006.

■S4 群- 1 編 - 1 章

1-1 背景雑音に関する ITU-R 勧告の概要

(執筆著者：服部光男) [2016 年 7 月 受領]

ITU-R では背景雑音（電波雑音）に関して長い研究の歴史があり、その成果は勧告やレポートとして発行されている。勧告は無線システムの設計に使用する電波雑音レベルの標準や測定方法の規定であり、レポートは勧告を補完する文書で勧告の理解を容易にするための詳細な説明や付加情報、測定例等が含まれている。電波雑音に関する文書として以下の勧告及びレポートが現時点で有効となっている。

〈電波雑音に関する勧告〉

Recommendation ITU-R P.372 - “Radio noise”（無線雑音）

Recommendation ITU-R SM.1753 - “Methods for measurements of radio noise”（無線雑音の測定方法）

〈電波雑音に関するレポート〉

Report ITU-R P.2089 - “The analysis of radio noise data”（無線雑音データの分析）

Report ITU-R SM.2055 - “Radio noise measurements”（無線雑音測定）

Report ITU-R SM.2155 - “Man-made noise measurements in the HF range”（HF 帯の人工雑音測定法）

以下にこれらの文書の概要を示す。

1-1-1 勧告 P.372（無線雑音）について

この勧告は 100 GHz 以下の電波雑音特性について取りまとめられたものである。この勧告に示された電波雑音の標準的な特性は、無線通信システムの送信電力の設定やサービスエリアの設定、無線システムと人工雑音源との共存設計などに利用することが推奨されている。

この勧告では以下の電波雑音の特性が示されている。

- 雷放電による電波放射（雷による大気雑音 [atmospheric noise]）
- 電子・電気機器や送電線等や自動車エンジン等からの妨害波が重畳した人口雑音 [man-made noise]（近傍の発生源からの電波雑音は除外する）
- 大気の大気や水象からの放射
- アンテナビーム内の大地やその他の構造物からの放射
- 天体電波源からの放射

電波雑音の大きさは雑音指数（Noise Factor）によって示される。電波雑音は周囲から均等に到来すると考えられるもので、無指向性のアンテナで測定することが基本となっており、損失の無いアンテナでの受信電力で表現される。一般にアンテナの指向性を増すとアンテナ利得が増えるが、全方向から到来する電波雑音の一部しか受信しないため、全受信電力は変化しない。このため、背景雑音はアンテナの利得に依存しない量とされている。しかし、現実には到来方向によって無線雑音の強度が異なる場合があり、測定方法や測定データの取扱いは注意が必要である。

(1) 周波数特性

0.1 Hz～10 kHz の周波数での電波雑音は、季節的变化、日変化、地理的变化は小さい。100 Hz～10 kHz では電離層の導波管効果のカットオフ周波数の変動に起因して比較的変動が大きい。

10 kHz～100 MHz では、大気雑音、人工雑音、銀河雑音の周波数特性が示されている。大気雑音については季節的变化、日変化、地理的变化を考慮して累積発生確率 0.5%と 99.5%のレベルが示されている。

100 MHz～100 GHz においては、人工雑音、銀河雑音、太陽雑音、水蒸気・酸素による上空雑音の雑音指数が示されている。

(2) 人工雑音

人工雑音レベルは、測定場所を四つの地域区分 (city, residential, rural, quiet rural) に分類して、それぞれの地域区分の雑音電力 (中央値や変化量) が示されている。それぞれの地域区分での雑音電力は、両対数グラフで周波数に対して直線的に変化する。

(3) 雷による大気雑音

雷放電によって発生する大気雑音について、地球上の分布が、季節、時間帯毎に世界地図上に雑音レベルがマッピングされている。また、大気雑音は WGN ではないので APD で表すことが適切であるが、その近似値の求め方も示されている。

本勧告では、ある種類の雑音が突出しているのではなく、いくつかの種類の雑音が重畳して影響を与える可能性のある場合の全体の雑音レベルの計算方法も示されている。

1-1-2 勧告 SM. 1753 (無線雑音の測定方法) について

この勧告は、一定の条件で雑音データを収集することを目的に雑音の測定方法を規定している。雑音の種類としては、雷による大気雑音、宇宙雑音、人工雑音、大気中の気体からの雑音に分類されている。

無線雑音の成分としては、白色ガウス雑音 (WGN: White Gaussian Noise)、インパルス性雑音 (IN: Impulsive Noise)、単一キャリア雑音 (SCN: Single Carrier Noise) の分類が示されているが、この勧告ではそのうち WGN と IN の測定方法が示されている。それぞれの成分の特徴は表 1・1 に示される。

SCN は測定場所付近に単一の発生源があるような場合にのみ観測されるので、勧告 P.372 の定義「様々な雑音源から集められた意図しない放射」からは外れているため、この勧告でも測定の対象とされていない。

(1) 測定方法の分類

測定方法としては以下の A～C の方法が示されている。

A: 空き周波数において実効値 (RMS) レベルのみを測定する方法で、RMS 法と生データサンプリングの両方が適用できる。

B: 高速サンプリングデータから、電波雑音の重要な成分である IN と WGN の特性を抽出する。

C: HF 帯で重要な空電雑音と人工雑音の IN 成分を分離するための方法である。それぞれの場所の測定システムは B と同じであるが、測定は二つの異なる場所で装置の時刻を同期して行う。

(2) 受信機と前置増幅器

低レベルの背景雑音を、測定周波数に隣接する使用波が存在する環境で適切に測定するため、受信機や前置増幅器等の要求性能を規定している。

表 1・1 各電波雑音成分の特徴

雑音成分	特徴	雑音源の例
白色ガウス雑音 (WGN)	相関のない電磁界ベクトルで受信機帯域幅以上の帯域幅をもち、スペクトル電力レベルは帯域幅に比例する	コンピュータ, 電力線, 通信ネットワーク, 有線 IP ネットワーク, 宇宙雑音
インパルス性雑音 (IN)	相関性のある電磁界ベクトルで、受信機帯域幅以上の帯域幅をもち、スペクトル電力レベルは帯域幅の自乗に比例する	点火プラグの放電, 雷, ガスランプスタータ, コンピュータ, ウルトラワイドバンド機器
単一キャリア雑音 (SCN)	単一または複数の明確な線スペクトルで、帯域幅は受信機帯域幅より狭く、スペクトル電力レベルは帯域幅に依存しない	有線コンピュータネットワーク, コンピュータ, スイッチング電源

(3) アンテナ

電波雑音測定においてアンテナの選定は重要である。電波雑音は水平方向に均等に広がっている雑音源から均一に到来することと考えられている。このため、水平方向に指向性がなく、損失がないアンテナを使用する。

この条件のアンテナとして、30 MHz 以上では、垂直ダイポールアンテナやスリーブアンテナが推奨される。また、30 MHz 以下では、完全基準大地上の短縮垂直モノポールアンテナで高さが波長の 1/10 未満のものが推奨される。短縮垂直モノポールアンテナではマッチングや校正方法に注意が必要である。また、ほかの電波の影響を排除するために指向性アンテナを使用する場合でも、雑音の測定領域を絞ることで受信電力が削減されことと利得の増加が相反するため、測定値に対して利得を考慮しない。これは、一方向から到来する使用波の電波測定と大きく異なる点である。

(4) 測定場所の分類

ITU-R での勧告改訂などに利用するためのデータ取得を各国で行うために、屋外、屋内での測定場所選定のための基準が示されている。屋外での選定基準を表 1・2 に示す。

(5) 測定データの分析方法

雑音測定は使用波が無い周波数を選定して測定を行うのが理想的であるが、この条件に合うのは電波天文用の非常に限られた周波数しかない。そのため、使用波が常時放射されない周波数を選択して、使用波の空き時間を利用して測定することによって、測定周波数帯を増やすことが必要である。この場合、測定中に使用波が混入することや、近くの電子機器からの放射妨害波がデータに混入することもあるため、これらの影響を除去する必要がある。

さらに、タイプ B やタイプ C の測定では、生データサンプリングの時系列データを、後処理によって WGN, IN のデータに変換することが必要である。

また、最近の広帯域変調信号波は、APD 特性からは WGN と分離することができない。このため I/Q サンプリングデータがガウシアンノイズかどうかを検定する方法も示されている。

表 1・2 屋外測定場所の選定基準

分類	定義
Remote Rural	目立った近代的設備がない，建物がない，交通がない，5km 以内に電気設備がない
Rural	開けた農業地帯，建物密度は<1/ha，幹線道路がない，鉄道がない
Residential	村や純粋な住居エリアで商業，工業活動がない地域．鉄道や幹線道路がなく，1km 以内に架空高電圧送電線や関連施設がない
Urban	小規模な商業，工業活動地域と店舗を含む密集した住宅建築物．鉄道や幹線道路がなく，500 m 以内に架空高電圧送電線や関連施設がない
City	商業，工業建築物やオフィスで密集した地域．幹線道路や鉄道が付近にあって良いが，支配的ではない場所
Industrial Area	密集した工場敷地と重工業がある地域
Railway	主要な電気鉄道が支配的である場所
Road	道路交通が支配的である場所 例：高速道路

これらの分析方法を使って，WGN，IN について以下の電波雑音パラメータを得ることとなっている。

- ・ WGN :
 - － RMS レベルの一日における，1 時間ごとの値の中央値，または単一値
- ・ IN :
 - － 分布表示でのピークレベル
 - － 分布表示でのインパルス／バースト長さ
 - － 分布表示でのインパルス／バースト期間

1-1-3 ITU-R レポートについて

ITU-R レポートは，ITU-R 勧告の理解を進めるために，規定以外のより詳しい情報や実施例，データなどを提供するための文書である。

電波雑音に関しては P.2089，SM.2055，SM.2155 の 3 件が発行されている。

レポート P.2089 では，生データサンプリングの時系列データを振幅確率密度（APD：Amplitude Probability Density）によって表したときに，WGN 及び IN は以下の特性を示すことが記されている。

- ・ レイリー目盛りの APD グラフで WGN 成分は-10 の傾きの直線で表される。
- ・ WGN の雑音指数は APD の 37%値から読み取ることができる。
- ・ IN の成分は APD グラフで WGN を示す直線からの上に乗った部分として表わされる。

レポート SM.2055 は電波雑音の測定方法に関して，勧告 ITU-R SM.1753 の内容を詳細に説明する資料である。測定に使用する受信機の条件，アンテナの校正方法，特性例やフィルタ特性の補正方法，測定場所・測定周波数の選定方法や測定器の設定パラメータなど，測定を実施するための注意点が詳しく記載されている。

レポート SM.2155 は HF 帯での人工雑音の測定方法に関する文書である。

主要な HF 帯の電波雑音としては、銀河雑音、雷による大気雑音、人工雑音がある。これらの 30 MHz 以下の電波雑音測定での問題点は、適切な無損失アンテナが無いこと、使用波のない空き周波数がほとんどないこと、非常に大きな強度の放送波に近接した周波数で低レベルの電波雑音を測定する必要があることが示されている。このレポートでは特に一時的に使用波のない周波数を選択して電波雑音を測定する方法や IN の評価方法、人工雑音と大気雑音を分離する方法について詳しい情報を提供している。

■S4 群- 1 編 - 1 章

1-2 背景雑音測定法の研究開発動向

(執筆著者：服部光男) [2016年7月 受領]

1-2-1 近年の勧告制改定の概要

電波雑音測定法に関する ITU-R 勧告などは 2005 年前後から検討が開始された。これは、この時期に、広帯域電力線伝送から放射される電磁波の無線システムに与える影響が検討されはじめ、電波雑音の統一的な測定方法が必要となったためである。まず、レポート SM.2055 が 2005 年に発行され、勧告 SM.1753 が 2006 年に発行されている。

その後、2009 年にレポート SM.2155 とともに勧告 SM.1753 の大幅な改訂が行われた。

日本では、2009 年度からガードバンドや使用周波数において屋外の電波雑音を測定する方法の検討を行い、2010 年から開発した測定方法を ITU-R WP1C に提案して、2012 年に SM1753 の改定第 2 版に反映させることができた。

2013 年からは屋内の電波環境を定量化するために、測定方法の検討を行い、開発した屋内環境での測定方法を ITU-R WP1C に提案した。当初は勧告 SM1753 の改訂案として提案したが、屋内では近傍の機器から発生する電波が電波環境の主体となるため、従来の電波雑音の定義とは一致しないことが指摘された。このため屋内電波環境の測定方法のみを独立した勧告とすることとし、新勧告草案 SM. [INDOOR RADIO ENVIRONMENT] を作成し、2016 年 6 月の ITU-R SG1 会合で新勧告承認手続きを開始することが合意された。現在、承認手続き中である。

1-2-2 勧告 SM1753 の改訂内容（屋外電波雑音の測定法について）

SM.1753 の改訂第 2 版の (SM1753-2) での追加内容は以下のとおりである。

① 電波雑音測定に適したアンテナ種別、

従来、モノポールアンテナとダイポールアンテナが測定アンテナとして推奨されていたが、水平面内の指向性の均一性（等方向性）が優れ、接続同軸ケーブルや支柱の影響も少ない、グラウンドプレーンアンテナを追加・推奨する。

② 電波雑音測定時に短時間混入した使用波の影響を除去する手法、

断続的、短時間に無線サービスに利用される周波数においても電波雑音を測定できるようにするため、使用波が短時間混入したときのデータから使用波の影響を除去する方法を追加した。

図 1・1 のように、サンプルデータ列を一定の時間ごとに区切り、その区間のサンプルデータの中央値をそれぞれの区間の代表値とし、この代表値が一定のスレッショルドレベルを超える区間及びその前後の 2 区間のデータを信号波の影響が含まれるデータとして取り除くことによって、信号波のデータを分離する手法である。この方法により IN データを残して信号波データを除去できる。

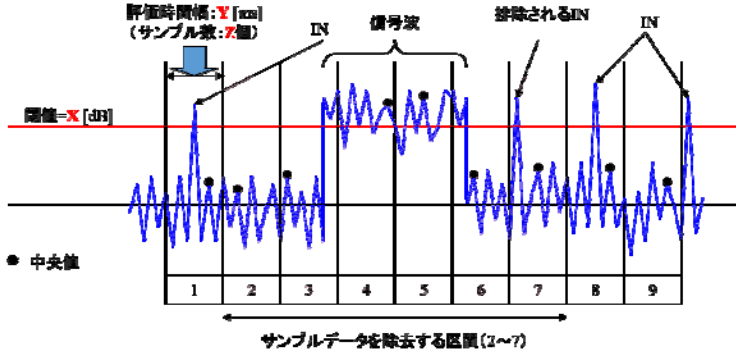


図 1-1 電波雑音測定時に短時間混入した使用波の影響を除去する手法

③ 複数周波数、分解能帯域幅 (RBW) での測定による使用波の影響除去方法

複数周波数、複数分解能帯域幅 (RBW) で同時に測定したデータから、それぞれの WGN のレベルを抽出し、それらの最小値を選択する方法である。これによって、②で除去できない長時間の使用波混入の影響を除去することができる。

1-2-3 屋内の電波環境の測定方法に関する新勧告草案 (SM. [INDOOR RADIO ENVIRONMENT])

屋内環境においては、無線電波に影響を及ぼす不要電波としては、近傍の電気・電子機器からの妨害波がほかの電波雑音に比較して大きいことが屋外の電波雑音と異なる。屋内の近距離での無線利用が盛んになるにしたがって、近傍の電波発生源を含めた電波環境を定量化することが重要となっている。このことを考慮して、近傍の特定の機器からの電波も含めた電波環境の測定方法を勧告化した。勧告の特徴は以下のとおりである。

① 室内の電波強度の分布測定

室内の特定の発生源から電波が放射されるため、室内の測定点によって電波環境が大きく異なる。

このため、室内の電波環境の分布を反映したデータを収集する方法を規定する必要がある。

この勧告では、測定する施設の測定エリアで最低 50 ポイント程度を選定して電波雑音を測定し、それを累積分布図またはボックスプロットにして表す方法を示している。

測定ポイントは図 1-2 のように、測定範囲を正方形のメッシュに区切って、それぞれのメッシュの中で無作為に選んだ測定点で測定を行う。これらの測定点で取得した WGN のデータを、強度と累積面積率の関係として表す。

図 1-3 は、WGN の測定値をその測定エリアの電波雑音レベル分布として表現したものである。この図より、縦軸を超える雑音レベルの発生する面積比がわかり、どの程度の面積割合で正常に無線通信が可能か等の評価が可能となる。

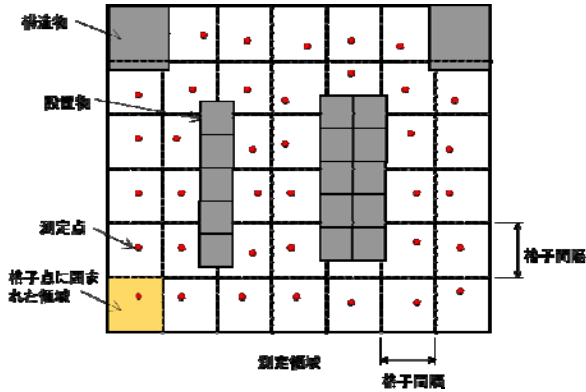


図 1・2 屋内環境での測定ポイントの選定方法

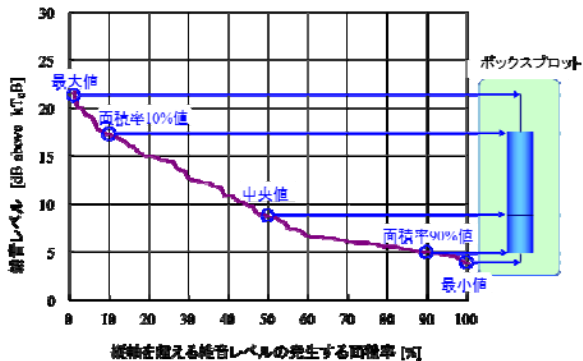


図 1・3 縦軸を超える雑音レベルの発生する面積比を表すグラフとそのボックスプロット

② I/Q データサンプリングによる測定方法と分析

I/Q データサンプリングによって測定したデータから SCN レベル, WGN レベル, IN の各種パラメータを算出する手順を追加した. 具体的には以下の手順によってデータ処理を行う.

(1) SCN のレベルの算出

- 1) I/Q データに離散フーリエ変換 (DFT) を適用してスペクトログラムに変換する.
- 2) 高いレベルが連続する周波数を SCN の周波数とし, そのレベルを SCN レベルとする.

(2) WGN レベルの算出

- 1) SCN レベルを求めるのに使用したスペクトログラムから, デジタルフィルタの中心周波数を SCN の影響のない周波数に選定する.
- 2) 上記で求めた中心周波数のデジタルガウスフィルタを I/Q データに適用し, フィルタ出力の包絡線を振幅データとして得る.
- 3) 得られた振幅データから APD グラフを作成する.
- 4) APD グラフから WGN レベルを求める.

(3) IN のパラメータの算出

- 1) 上記の WGN レベル+13dB 以上の包絡線振幅データを、IN サンプルとして抽出する。
- 2) 抽出した IN サンプルからパラメータ（レベル、継続時間、繰返し周波数、全発生時間）を得る。

1-2-4 今後の課題

背景雑音の測定方法として、WGN や SCN の基本的な測定方法は、ほぼ完成しつつある。しかし、IN については、測定器の分解能帯域幅（RBW）の設定など、測定条件がまだ標準化されていない。また、IN のデータを汎用的に利用する方法も確立していない。例えば、測定器の分解能帯域幅（RBW）の設定によってパルスの波高値やパルス幅が変化するため、検討を行う対象の無線システムの受信帯域幅に対応した RBW で IN を測定しないと、測定データを直接無線システム的设计などに適用することができない。

これらの状況の中で、今後の課題として以下の事項について検討が必要となっている。

WGN、SCN については、現在普及が著しい広帯域無線システムの使用波が使用される周波数帯で測定を行う場合、使用波と背景雑音をさらに効率的に分離する方法が必要である。

また、IN については測定器の設定パラメータを含めた、測定条件の標準化と、測定データを無線システム設計に利用する汎用的・標準的な方法を明確化することが必要である。

■S4 群- 1 編 - 1 章

1-3 電波利用設備による電波環境

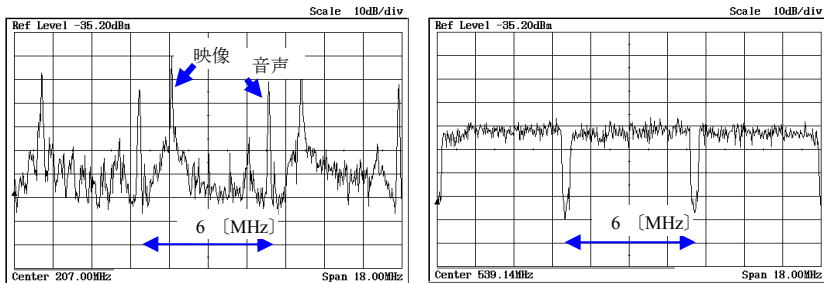
1-3-1 放送システムによる電波環境

(執筆者：太田弘毅) [2010年12月受領]

ラジオ放送やテレビジョン放送の長い歴史において、その公共性に鑑み、放送用に一定の周波数帯域を使用してきた。割当帯域は、FM 放送は 76 ～90 MHz、地上波テレビ放送（テレビ放送）は VHF（1～3 ch）90～108 MHz、VHF（4～12 ch）170～222 MHz、UHF（13～62 ch）470～770 MHz など、テレビ放送は 1 チャンネル 6 MHz の帯域幅であったが、広帯域を使用するテレビ放送は放送品質やサービスの向上、周波数の有効利用等のためアナログ方式（アナログ放送）からデジタル方式（デジタル放送）へ 2011 年 7 月に移行し、使用帯域も再編された。これにより、放送用帯域が UHF 帯に集約され、VHF 帯はすべてほかの用途へ開放され、UHF 帯も一部（53～62 ch）がほかの用途に供されている。

他方、VHF 帯では新たな放送として移動体向けのマルチメディア放送が 2012 年に開始された。これは、全国エリア向け（207.5～222 MHz）、地方ブロック・コミュニティ向け（90～108 MHz）などの視聴区域別の利用を含む放送サービスを展開するもので、有料のサービスも実施されている。

デジタル放送は、周波数利用効率が高い OFDM 方式を採用して誤り訂正や等化技術により、東京タワーからの送信で比較した場合、アナログ放送 1 チャンネルあたりの空中線電力 50 kW/12 kW（映像/音声）と同一サービスエリアを形成するためのデジタル放送は空中線電力 10 kW である。アナログ放送とデジタル放送の周波数スペクトルの例をそれぞれ図 1・4(a), (b) に示す。デジタル放送は、ガードインターバルを 126 μ s（有効シンボル長の 1/8）に設定してマルチパスにも高い耐性をもたせている。



(a) アナログ放送のスペクトル例

(b) デジタル放送のスペクトル例

図 1・4

放送システムの電波環境に関しては、人体防護の観点から防護指針や法令等（平成 11 年 10 月 1 日施行の電波法施行規則第 21 条の 3、別表第 2 号の 2 の 2 及び平成 11 年郵政省告示 301 号（平成 11 年 10 月 1 日施行））に規定されており、その基準値（電界強度）は 30～300 MHz

で 27.5 V/m (149 dB μ V/m), 300~1500 MHz は $1.585\sqrt{f}$ V/m (f は MHz 単位の周波数) である。

放送局の送信塔近傍における電界強度値の一例として東京タワー周辺の状況 (H19.11 時点) を示す。送信点から 600 m, 測定地点高 165 m (海拔) の見通しでの全放送チャンネル (アナログ放送, デジタル放送, FM 放送) の測定結果は, 30~300 MHz は 1.88~5.66 V/m (125~134 dB μ V/m), 300~1500 MHz は, 1.09~5.35 V/m (121~135 dB μ V/m) の範囲であった。この測定点は電波法の基準値以内と判断されるが, 適合性判定方法の詳細については「4-2 電波防護指針適合性評価方法」を参照されたい。なお, 広域アナログ放送 (7 局) の平均値 (各チャンネルの電界強度の二乗和をチャンネル数で除算して平方根で計算) は 7.12 V/m, 広域デジタル放送 (7 局) の平均値は 3.68 V/m であり, デジタル化 (空中線電力の低減) により送信所近傍において電波環境が改善できることを示唆している。

デジタル放送は, マルチパスにも強い方式であることから SFN (Single Frequency Network 単一周波数ネットワーク) が構築できる。これは, 同一チャンネルのサービスエリアを接続しての広域のエリア形成が可能で, 周波数資源を有効に活用できる技術である。新たに制度整備がなされた受信障害対策用の SFN-GF (Single Frequency Network - Gap Filler) 中継器 (空中線電力は 50 mW/ch 以下) の利用も可能となり, 遮へいビルの屋上などに設置できる¹⁾²⁾。

SFN-GF は, 高層のビル屋上など居住区域の直近に設置されることから, 送信アンテナ近傍の放射電界による電磁環境レベルの把握が重要となる。16 素子リングアンテナ (10 dBd) を利用した模擬中継局の放射電界を測定した例によると, 空中線電力 (ケーブル損含む) 50 mW/ch で 1 波を送信する場合は, 3 m の距離で 2 V/m 程度であるが, 3 波以上を中継すればアンテナ近傍では放射電界強度が 3 V/m を越える数値になることもある。したがって, ビルの管理者など放送事業者以外による無線局設備の設置・運用が想定されている受信障害対策用中継局については, 回線設計とは別に空中線の指向方向やその周囲に対する放射電界が電子機器に及ぼす電磁環境レベルを超える場合, 周囲環境や運用条件の検討を行う必要がある。

近年, ホワイトスペースの概念も投入して放送用帯域の高度利用も検討されてきているため, ほかの通信システム等による空間, 時間の高度利用に関して新たな信号計測・妨害波計測の技術を開発していく必要がある。

■参考文献

- 1) 電波法 第 5 条第 5 号 等
- 2) “地上デジタルテレビジョン放送用ギャップフィラーシステムとその機器,” JCTEA-STD019, 日本 CATV 技術協会, 2010.

1-3-2 携帯電話システムにおける電波環境

(執筆: 垂澤芳明) [2010 年 12 月 受領]

携帯電話を安心・安全に日常的に利用するために, 電磁環境両立性の課題を解決することが重要である。ここでは, 携帯電話システムにおける電波環境を, 携帯端末と移動無線基地

局に分けて概説する。

携帯端末は、通常、身体の外に利用される。また、人の生活とともに様々な場所に移動し、他の電気・電子機器の外に置かれる状況が日常的に発生する。携帯端末における電波環境は、図 1・5 に示すようにまとめることができる¹⁾。携帯端末から発射される電波のエネルギーの一部は人体に吸収される。ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) は、電波の人へのばく露量として SAR (Specific Absorption Rate) を定義し、人体に健康悪影響を及ぼさないように SAR の基準値を示している²⁾。また、我が国の電波法でも、ICNIRP と調和した許容値が規定されている³⁾。したがって、携帯端末から発射される電波の強度は、この許容値以下となるように設計される。また、この電波は、ほかの電子機器との干渉の原因となり、特に植込み型医療機器との干渉を避けることは、重要である。携帯端末が植込み型心臓ペースメーカに与える干渉について、これまで多くの実験調査が行われ、この干渉を防ぐためのペースメーカと携帯端末の離隔距離が明らかにされている^{4,5)}。

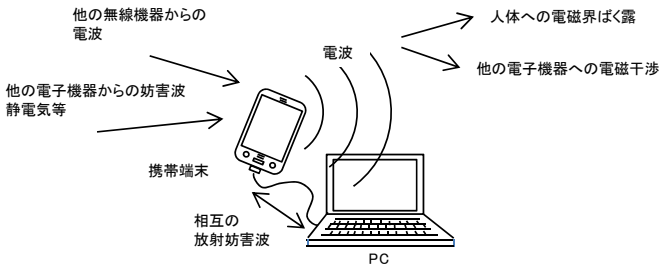


図 1・5 携帯端末における電波環境

携帯端末は、多くのデジタル回路を搭載している。このため、一般的な情報技術装置と同様に、その放射妨害波のレベルは、ほかの無線機器へ影響を及ぼさないように制限する必要がある。一方、ほかの電気・電子機器の放射妨害波が携帯端末の無線受信周波数と一致すると、その通信品質が劣化する。携帯電話システムがほかの無線システムと共存するため、またはこれを保護するために、環境の放射妨害波の低減が必要である。また、図 1・5 に示すように携帯端末をパーソナルコンピュータ (PC) の外部通信機器として利用する場合、PC は、携帯端末の外に置かれるので、その妨害波レベルを十分に小さく抑えなければならない。携帯端末が無線モジュールとして PC に組み込まれるような状況では、この問題が特に顕著となる。さらに、携帯端末がほかの無線機器と近接した位置となる場合、携帯端末は、ほかの無線機器からの電波に対する、高周波電磁界イミュニティ特性が必要となる。

移動無線基地局についても、図 1・6 に示すように携帯端末と同様の電波環境がある。アンテナ周辺において、一般に人の出入りが想定される場合、電波の電磁界強度が、ICNIRP や電波法が規定している電力密度基準値以下となるようにする必要がある。また、植込み型医療機器への干渉の可能性もあるので、その干渉を防ぐようにアンテナ設計を行う必要がある⁶⁾。基地局の無線装置は、通信線や電源線をもつので、伝導妨害波、雷サージ、電源変動に対する十分なイミュニティ特性を備えていることも重要となる。

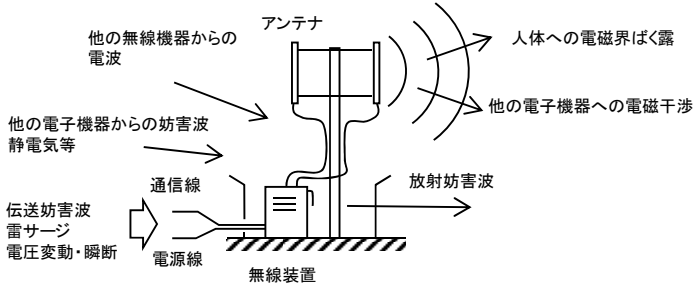


図 1-6 移動無線基地局における電波環境

今後より豊富なサービスを充実するため、携帯電話システムは、情報伝送速度の高速化、より高い無線周波数の利用、無線機器の小型化を進めることになり、ここで述べた電磁環境両立性の総合的な課題を継続的に解決することが要求される。

■参考文献

- 1) 野島俊雄, 垂澤芳明, “移動通信における EMC の新たな展開,” 電子情報通信学会誌, Vol.84, No.12, pp.873-874, 2001 年.
- 2) GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC, AND ELECTROMAGNETIC FIELDS, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guideline, 2004.
- 3) 電波防護規則「電波法施行第二十一条の三」.
- 4) 豊島 健, 野島俊雄, “心臓ペースメーカーと携帯電話との EMC (Electromagnetic Compatibility),” 電子情報通信学会誌, Vol.84, No.12, pp.895-897, 2001 年.
- 5) 例えば、電波の医療機器等への影響に関する調査報告書, 総務省, 携帯電話端末による心臓ペースメーカー等の植込み型医療機器への影響に関する調査, 平成 22 年.
- 6) Yoshiaki Tarusawa, Kohjiroh Ohshita, Yasunori Suzuki, Toshio Nojima, and Takeshi Toyoshima, “Experimental Estimation of EMI from Cellular Base-Station Antennas on Implantable Cardiac Pacemakers,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.47, No.4, pp.938-950, 2005.

1-3-3 レーダシステムによる電磁環境

(執筆者：宮澤義幸) [2012 年 7 月 受領]

ここではレーダシステムのうち、船舶用レーダについて述べる。航空路監視レーダについては文献 1) を参照されたい。

(1) 船舶用レーダシステムの概要

周波数帯は S バンド : 2.92~3.1 GHz, C バンド : 5.46~5.65 GHz, X バンド : 9.32~9.5 GHz が割り当てられており、ピーク電力は最大で 60 kW (S バンド) ~50 kW (X バンド) となっている。また、構造はアンテナ部, 送受信機, 及びディスプレイ部からなる。アンテナ部は、一般にスロットアンテナであり、最大サイズは長さ 4.2 m で、幅・厚みは 0.3 m 程度である (図 1-7 参照)。回転数は対風速 100 ノット下でも 20 rpm が維持できること、アンテナゲインは 25~30 dB で、水平の半値幅が 1°に対して垂直は±10°以上と規定されている。送受信機はアンテナ部に入っているもの (2 ユニットタイプ) とそれ以外 (3 ユニットタイプ) に区別

できる。ディスプレイ部には、電源やインタフェースコントロールも含まれている。



図 1・7 S バンドレーダの 4.2m アンテナ

また、レーダはターゲットを見る能力を規定していることから、使用する距離レンジに併せて選択受信を行い、受信感度は -90 dBm 程度が一般的である。船舶用レーダは船の高いマストに設置されているが、船の上にはさらに高い煙突などもあって、近距離の電波反射が想定される場合がある。レーダシステムについては、前述のとおり選択増幅で高い感度を確保しているため、強い反射は受信回路を破壊することとなる。そのため、近距離反射が見込まれる部分には電波を発射しない「セクターブランク」を設定する。図 1・8 の右下 1/4 にはレーダ映像は出ていないが、 Δ の AIS シンボル（VHF を用いた船舶識別システム）のデータが重畳されている。

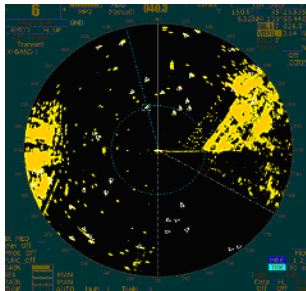


図 1・8 実際のレーダ画像：東京湾

(2) レーダシステムのスペクトラム、波形の一例²⁾

図 1・9 は、船舶用レーダの実際のスペクトラムを導波管接続にて計測した例である。スプリアス基準値は基本波から 60 dB 以上低いことであり、帯域内輻射については白線で表される抑制マスク（送信パルスの立ち上がり／立ち下がり時間及びパルス幅で算出される尖頭値から 40 dB 低下点 B_{-40} から -20 dB/decade（現行）の傾きで -60 dB まで）を超えてはならない。

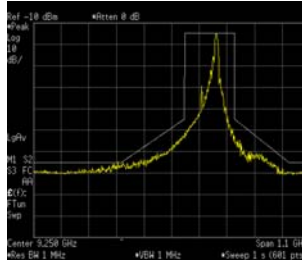


図 1・9 スペクトラムの例

レーダの特性を表すのにレーダ方程式が用いられ、以下のように表される。

$$P_r = \frac{P_t \times G^2 \times \lambda^2 \times \sigma}{(4\pi)^3 \times R^4} \quad (1 \cdot 1)$$

P_r : 受信電力, P_t : 送信電力, G : アンテナ利得, λ : 波長, σ : 反射面積, R : 目標距離

この式はレーダシステムの特徴である自らの送信した電波による反射を受信することを表しており、前述した最低受信感度が算出された受信電力よりも低ければ、対象物体を映像として映し出すことができることを表している。実際には船舶の積荷等で反射面積が変わるなど複雑となっている。

次に上記の式から距離 R における電力密度 S は以下のように表される。

$$S = \frac{P_t \times G}{4\pi \times R^2} \quad (1 \cdot 2)$$

上記は連続的に電力を送出することを前提としているが、船舶用レーダでは無変調パルスを用いていることから、実際に放射しているパルス幅とその繰り返しの比（デューティサイクル）を乗ずる必要がある。

パルス幅 T_p [s], 繰り返し周期 T_r [s] とするとデューティサイクルは T_p / T_r となる。

図 1・10 は実際のデューティサイクルの例を示している。



図 1・10 レーダ波の送信間隔の例

送信パルス幅: $0.1 \mu\text{s}$, 反射待ち受け時間 $55 \mu\text{s}$, インターバル: $445 \mu\text{s}$

さらに、レーダは全周にわたって電波を発射することから、任意の点における放射はアンテナの回転率とアンテナパターンを考慮する必要がある。アンテナの回転数は前述から最低回転数が 20 rpm と決まっていることから、1 周に要する最長時間は 3 秒であり、 1° 当たりの

通過時間に換算すると $3/360=0.0083$ s となる。また、アンテナパターンの影響を考慮する必要があることから、半値幅約 $1^\circ\sim 1.5^\circ$ を乗ずる必要がある。

(3) レーダシステム近傍の電磁環境推定法³⁾

レーダシステムから放射される電波の平均電力 P_{av} [W] は、レーダ設備のピーク出力 (電力) P_p [W] が分かれば、パルス波の周期 T [s] とパルス幅 Δt [s] の比 (デューティーサイクル) から、次式で求められる。

$$P_{av} = P_p \times (\Delta t / T) \quad [\text{W}]$$

次に、この P_{av} とアンテナ利得 G 、送信波の波長 λ [m] から、アンテナからの距離 R [m] の点における平均電力密度 S [W/m^2] の推定値を算出する。

推定式は距離 R の地点が、近傍界領域、過渡領域、遠方界領域のいずれにあるかにより異なる。

- ・近傍界領域の平均電力密度 S_{nf} $R \leq 5.07 \times 10^{-2} G \lambda$ [m]

$$S_{nf} = 12.6 P_{av} / G \lambda^2 \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

- ・過渡領域の平均電力密度 S_{if} $5.07 \times 10^{-2} G \lambda \leq R \leq 1.22 \times 10^{-1} G \lambda$ [m]

$$S_{if} = S_{nf} (R / R_{nf})^{-1} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

- ・遠方界領域の平均電力密度 S_{fr} $R \geq 1.22 \times 10^{-1} G \lambda$

$$S_{fr} = P_{av} G / 4\pi R^2 \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

さらにレーダの場合、アンテナが回転していることを考慮するため、下記の補正係数を使用する。

$$\text{近傍界領域, 過渡領域の場合: } f_{nf} = L / (R f \theta_m)$$

$$\text{遠方界領域の場合: } f_{fr} = \theta_{\text{half}} / \theta_m$$

ただし、 L [m] はアンテナ実長、 θ_m [rad] は単位時間当たりの走査角度及び θ_{half} はアンテナ半値幅である。

これらの式を使った場合の算出例を以下に示す。

(a) S-バンドレーダ (60 kW) の場合

送信尖頭電力: 60 kW, パルス幅: 1 μs , 繰り返し周期: 154 ms, アンテナ利得: 439 倍, アンテナ長: 3.6 m, 波長: 0.098 m の仕様においてアンテナから 5 m の距離 (近傍界領域) での平均電力密度 S_{nf} は $S_{nf} = 0.58 \text{ W}/\text{m}^2 = 0.058 \text{ mW}/\text{cm}^2$ となる。

(b) X-バンドレーダ (50 kW) の場合

送信尖頭電力: 50 kW, パルス幅: 1 μs , 繰り返し周期: 154 ms, アンテナ利得: 1563 倍, アンテナ長: 2.7 m, 波長: 0.032 m の仕様においてアンテナから 5 m の距離 (近傍界領域) での平均電力密度 S_{nf} は $S_{nf} = 0.96 \text{ W}/\text{m}^2 = 0.096 \text{ mW}/\text{cm}^2$ となる。

■参考文献

- 1) 徳重・山中, “航空路監視レーダ局周辺の電磁環境の測定と推定,” 電子情報通信学会・論文誌 B-II, Vol.75, No.2, 1992.
- 2) 社団法人電子通信学会, “レーダ技術,” 2016.
- 3) 平成 11 年郵政省告示第 300 号, “無線設備から発射される電波の強度の算出方法及び測定方法”

1-3-4 RFID システムによる電波環境

(執筆著者：立石俊三) [2010年10月 受領]

(1) RFID 機器の規格

RFID 機器は、国際電気通信連合が規定している ISM (Industrial, Scientific, and Medical) の周波数の使用を前提に ISO/IEC にて国際標準 (ISO/IEC 18000 シリーズ) が制定されているが、各国の事情により ISM 周波数の使用できない地域・国もある。また、ISM 周波数が使用できても RFID 機器の空中線電力・不要発射の強度の許容値・共用化条件など技術的条件が各国の電波法の規制を受けることになる。RFID 機器は、一般の無線機器と同様に EMC 規制のもとに設計・製作して、各国の認定機関の許認可を得る必要がある。日本では総務省が制定した電波法と電波産業会が制定した民間規格である ARIB 規格があり、米国には FCC (連邦通信委員会) が制定した規格があり、欧州には R&TTE 指令や ERC/REC 70-03 のもとに欧州各国の電波法が制定されている。

(2) RFID 方式と特徴

国内では、135 kHz 未満、13.56 MHz の周波数を利用した電磁誘導方式と 950 MHz 帯 (UHF 帯)、2.45 GHz (マイクロ波) の周波数を利用した電波方式が主に採用されている。電磁誘導方式は、一般的に水分の影響を受けにくい、RF タグとの交信距離が短い、他システムの干渉を受けにくいといえる。もう一方の電波方式は、一般的に交信距離が長く、使用周波数が高いので交信速度も速く、水分の影響を受けやすく、電波の干渉・反射の性質があるがため、他システム間との干渉の影響を受けやすい特徴がある。このように、RFID 方式の特徴に一長一短があるので、各業界においてアプリケーションに最適な RFID 方式が選択されて課題解決のツールとして使用されている。

(3) RFID 機器の人体防護と医療機器への影響

総務省では、電波の人体への影響を与える可能性があることから、「電波法施行規則第二十一条の三」において「電波の強度に関する安全施設」(1999年10月施行)を定めている。RFID 機器の出力が 20 mW 以下の特定小電力無線局は、この指針から除外されている。

次に、RFID 機器の植込み型医療機器への影響を与える可能性があることから、「各種電波利用機器の電波が植込み型医療機器へ及ぼす影響を防止するための指針」(2007年4月)を発行した。その指針で、据え置きタイプの UHF 帯高出力 RFID 機器は心臓ペースメーカ (以下 PM と称す) のページング機能への影響を生じる場合があり、半径 1 m 以内には PM 装着者が近づかないことを報告している。

そこで、PM 装着者の安心・安全な生活環境の確保のために、PM への影響を及ぼす電磁干渉問題の緩和に向けて、北海道大学と(社)日本自動認識システム協会と共同で検討されている干渉緩和技術¹⁾の一例を紹介する。PM への電磁干渉の発生メカニズムは、RFID 機器からの高い周波数の信号から、PM 内部回路の非線形応答 (ダイオードやオペアンプの包絡線検波) によって、PM の感知周波数範囲の雑音を検出されることによる。この包絡線が変動する高周波信号において、非線形特性に起因する RFID 機器のキャリア信号が停止している時間に、その時間的な隙間を埋めることで電磁干渉の発生阻止、緩和が可能となり、PM への電磁干渉距離を低く抑える効果があることから期待されている。

■参考文献

- 1) Kawamura Y., Futatsumori S., Hikage T., Nojima T., Koike B., Fujimoto H., and Toyoshima T., "A Novel Method of Mitigating EMI on Implantable Medical Devices: Experimental Validation for UHF RFID Reader/Writers, in Proc. IEEE EMC 2009 Symposium," pp.197-202, August, 2009.

1-3-5 UWB システムによる電波環境

(執筆著：石上 忍) [2010年12月 受領]

Ultra Wide Band (UWB) 無線システムは、数GHzにわたる帯域をもつ、電力スペクトル密度の低い信号を用いて数百Mbps程度の容量の通信を行う無線システムの総称である。米国 FCC¹ は、2002年に高周波機器及び免許不要局としての無線周波数機器の放射レベルの規制を規定するFCC 47CFR Part 15を改定し、民間において一定条件付で認可した¹⁾。またITU-R²においても、UWBの定義やほかの無線業務との共用、測定法などについて2006年に勧告が発行された²⁾。利用イメージとしてはワイヤレスUSBや自動車の衝突防止レーダなどであるが、現時点では、UWB機器はそれほど一般に普及している状況とはいえない。

UWB機器における帯域幅の要件は、比帯域幅0.2以上または-10 dB帯域幅500 MHz以上となっており、その帯域は極めて広い。一方UWB送信機においてスペクトルマスク（許容最大出力電力）は、EIRP³にて1 MHz当たり-41.3 dBm（平均電力）となっている。UWB無線システムの専用帯域はなく、既存無線業務の帯域に重畳して使用する。ゆえに帯域当たりの送信電力は低いとはいえ、既存無線業務との共用が問題となる。既存業務の周波数割当ては各国で異なるため、米国FCCが認可したUWBの周波数帯は、3.1~10.6 GHz及び22~29GHzであるが、欧州及び日本では、各国の周波数割当てなどの事情で、本帯域内であっても送信できない周波数帯がある。-41.3 dBm/MHzという電力は、3 mの距離の電界に換算すると54 dB μ V/m/MHzに相当し、これはCISPR 22³⁾の3 GHz以上における測定距離3 mでのクラスB情報技術装置（コンピュータなど）の放射妨害波許容値（平均値）と等しい。すなわち、情報技術装置からの電磁雑音が既存無線業務に妨害を与えず、これらの中で共用が可能とすれば、UWB無線システムも同様に既存無線業務に対し妨害を与えないのではないかと考えることができる。ただし、情報技術装置からの電磁雑音とUWB無線システムからの送信信号の性質は無論異なり、UWBの変調方式は主にOFDMやスペクトラム拡散が用いられている。OFDM方式UWB信号のスペクトラムアナライザによるスペクトルの測定例を図1・11に示す。またこのUWB信号に同電力のAWGN⁴を加えたときのAPD⁵を測定した結果を図1・12に示す⁴⁾。同図において、○□等はキャリア周波数から前後に周波数を変化させたときのそれぞれのAPD測定結果⁶である。一方、実線は、ガウス雑音におけるAPDの計算結果である。同図より、周波数によって多少のばらつきはあるものの、AWGN+UWB信号のAPD曲線はガウス雑音と同様の傾向を示しており、両者の性質は似ていることがわかる。さらに複数のUWB機器が使用されている状況下では、中心極限定理に従って、よりガウス性が強まると考えられ

¹ Federal Communications Commission：連邦通信委員会

² International Telecommunication Union, Radiocommunications Sector：国際電気通信連合無線通信部門

³ Equivalent Isotropically Radiated Power：等価等方放射電力

⁴ Additive White Gaussian Noise：加法性ホワイトガウスノイズ

⁵ Amplitude Probability Density：振幅確率分布

⁶ 同図は、OFDM-UWBの無線LANへの干渉実験における結果であり、これら各周波数は、無線LAN IEEE 802.11a規格のサブキャリア周波数に相当する。

る。ゆえに、UWB無線システムの送信電波を電磁雑音としてみたとき、ガウス性に近い雑音で、その電界強度はPCなどの情報技術装置並みと考えることができる。もちろん、このことが既存無線業務に全く妨害を与えない根拠というわけではなく、微弱な電磁波を扱う業務への電磁干渉は別途考える必要がある。

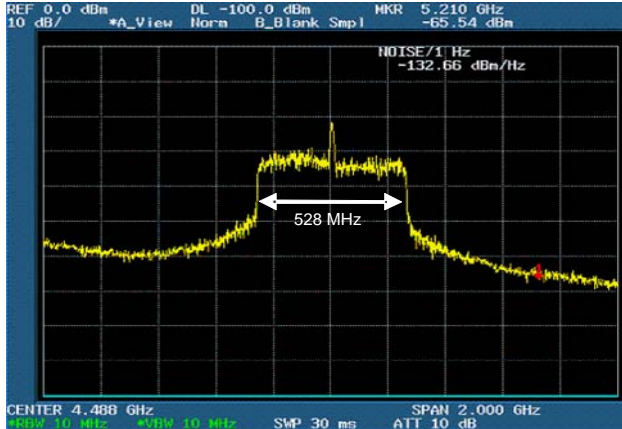


図 1・11 OFDM 方式 UWB 信号のスペクトル例

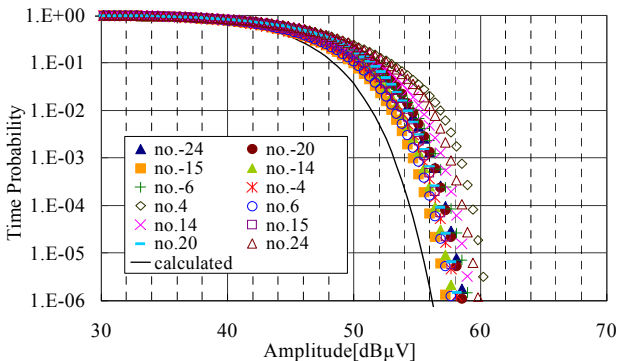


図 1・12 OFDM-UWB 信号+AWGN 信号の APD 測定結果とガウス雑音の APD (実線) の計算結果

■参考文献

- 1) FCC 47CFR, Part 15, "Radio Frequency Devices," 2003.
- 2) ITU-R Recommendation SM.1754 - SM.1757, 2006.
- 3) CISPR 22, Ed.6.0, 2008.
- 4) Haruki Kamiya, Masashi Yamada, Masamitsu Tokuda, Shinobu Ishigami, Kaoru Gotoh, and Yasushi Matsumoto, "A new method for measuring interference between UWB and wireless LAN systems," 2008 IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 03-11-02, Crete, Greece, 2008.

1-3-6 ISM 機器による電波環境

(執筆著者：松本 泰) [2010年12月 受領]

ISM (Industrial, Scientific, and Medical) 機器は、高周波電磁波を無線通信以外の目的 (例えば加熱、乾燥、洗浄、診断、電力伝送など) で産業用、家庭用、科学研究用途、医療用途などに用いる機器の総称である。ISM 機器の内部で生じた高周波電磁波の一部は機器周囲に漏洩して高周波電磁界を生ずる。特に電磁波をエネルギー源として加熱・乾燥などに使用する ISM 機器の周囲には、通常家庭用電化製品などに用いられる電気・電子回路から発生するよりも強い電磁界が生ずる場合も多い。このため ISM 機器からの漏洩電磁波による無線通信との干渉の発生を防ぐため、ITU (International Telecommunication Union : 国際電気通信連合) 及び RR (Radio Regulations : 無線通信規則) では、ISM 機器には専用の周波数帯 (ISM 周波数帯) を割り当てている。わが国では電波法上、無線通信以外の目的で高周波を用いる機器は高周波利用設備として分類される。表 1・3 にわが国における ISM 周波数帯を示す。周波数が 40 MHz までは誘電体損を利用した加熱・乾燥などの工業用途などに用いられ、周波数 900 MHz、2400 MHz 及びそれ以上では家庭用や業務用の電子レンジ、温熱医療機器、プラズマ生成などに使われる。

TU 及び RR では ISM 周波数帯における放射電界強度の上限を設けておらず、この周波数帯を用いる無線通信システムは ISM 機器による電磁干渉を受忍する必要がある。わが国の電波法 (無線設備規則) では、通信目的以外の高周波利用設備の電界強度の許容値は、医療用装置に対しては距離 30 m で 100 $\mu\text{V}/\text{m}$ 以下、工業用装置に対しては距離 100 m で 100 $\mu\text{V}/\text{m}$ 以下である¹⁾。しかし ISM 周波数においては例外規定として許容値を定めていない²⁾ (ただし 900 MHz 帯の ISM 周波数帯を用いる装置については 1) が適用される)。なお、人体に対する安全性の観点からは機器周囲の電界強度について別途配慮がなされる (本編第 4 章参照)。

表 1・3 ISM 用の周波数帯

13.553-13.567 MHz (13.56 MHz \pm 7 MHz)	2400-2450 MHz (2450 MHz \pm 50 MHz)
26.957-27.283 MHz (27.12 MHz \pm 163 kHz)	5 725-5 875 MHz (5800 MHz \pm 75 MHz)
40.66-40.70 MHz (40.68 MHz \pm 20 kHz)	24000-24250 MHz (24125 MHz \pm 125 MHz)
902-928 MHz (915 MHz \pm 13 MHz)	

ここでは具体例として、最も数の多い (わが国では世帯普及率が 90%以上と言われる) 家庭用電子レンジを取り上げる。電子レンジは内蔵したマグネトロンによって周波数 2450 MHz 周辺のマイクロ波を発生させ、そのエネルギーを調理に使用するが、一部は電子レンジ筐体の放熱用の空隙や調理庫のドアヒンジ部分などから外部に漏えいする。一般に家庭用電子レンジでは非安定化電源を用いて (商用電源を直接昇圧もしくはインバータ回路を介して昇圧して) マグネトロンを発振させる。この結果、電子レンジからのマイクロ波の放射は電源周波数に同期した間欠のパルスとなり、また電源電圧に同期した振幅変調と周波数変調を伴う (本編第 2 章 2.1 参照)。図 1・13 は電源に同期した電子レンジ雑音の瞬時周波数の変化を示している。また、調理庫内で食品の均一加熱を目的とした回転テーブルが動作する場合には、マグネトロンの負荷となる食品の位置変化によりテーブルの回転 (通常 10 秒程度) に同期し

た振幅・周波数変動も生ずる。同時に放射の指向性も周波数とともに時間変動する³⁾。

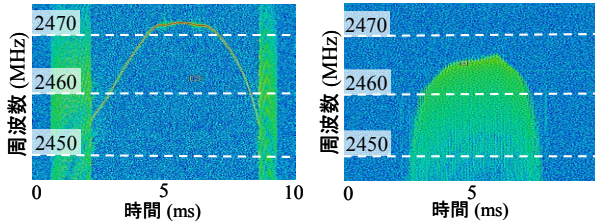


図 1・13 家庭用のトランス型電子レンジ（左）及びインバータ内蔵型電子レンジ（右）による放射雑音の瞬時周波数変化。商用電源（50Hz）の半周期分を表示。

典型的な家庭用の電子レンジでは、高周波出力が数 100 W～1 kW 程度のマグネトロンを用いており、2.4 GHz の ISM 周波数帯における電子レンジ周囲電界強度の最大値は、おおむね 120 dB μ V/m 程度（測定距離 3m）である。また、ISM 周波数帯以外における放射電界強度については、国際規格（CISPR11）に定められており、ピーク電界強度の上限は周波数にもよるが 73～110 dB μ V/m（距離 3m）である⁴⁾。なお、電子レンジによる電界強度の計測では、上述の周波数偏移のために測定器の周波数分解能帯域幅が狭すぎると減感（実際よりも小さなピーク振幅を指示する現象）を生ずるので注意が必要である。例えば 2450 MHz 帯におけるピーク電界強度を減感なく測定するには 1MHz 程度以上の分解能帯域幅が必要である⁵⁾。

図 1・14 にトランス昇圧型及びインバータ内蔵型電子レンジのスペクトルの例を示す（スペクトルの形状や最大振幅は負荷に大きく依存するため、インバータ内蔵型電子レンジの雑音強度がトランス型よりも常に大きいとは限らないことに注意）。

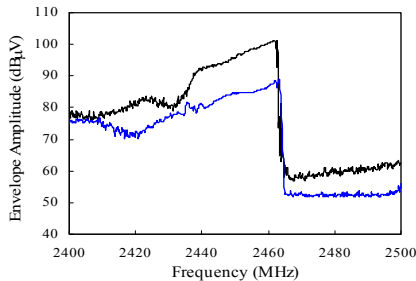


図 1・14 2.4 GHz ISM 周波数帯における家庭用電子レンジ雑音のスペクトルの例
青線：トランス昇圧型電子レンジ 黒線：インバータ内蔵型電子レンジ 周波数分解能 1 MHz

■参考文献

- 無線設備規則六十五条
- 昭和 46 年郵政省告示 257 号
- B. Depres, “Measurement of microwave oven radiation between 1 & 18 GHz in relation with the CISPR

- standardisation activities,” IEEE 1997 International Symposium on EMC, pp. 118-122, Austin, Aug. 1997.
- 4) CISPR 11, “Industrial, scientific and medical equipment – Radio frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement,” ed. 5.1, May 2010.
 - 5) Y. Matsumoto, T. Murakami, K. Fujii, and A. Sugiura, “Band-limitation effects on microwave oven noises in the 2.4 GHz band,” IEICE Trans. on Communications, vol. E-88-B, No. 3 pp. 1307-1312, March 2005.