

アンテナ基本測定技術 (WS-39)

石井 望 (新潟大学)

2010年1月29日18時1分版

まえがき

本ワークショップでは、アンテナ測定を実施する際に必要となる基本事項を復習するとともに、アンテナ測定の中で重要な位置を占めるインピーダンス測定および利得・パターン測定について解説する。さらに、応用測定として、放射電力測定、放射効率測定等について触れることにする。

以下に概要ならびに強調したい注意事項をまとめる。見知らぬ用語が多いかもしれないが、一通り本テキストを学習した後で読み返して頂ければ、理解できるようになっているはずである。

■高周波測定の基本 高周波測定において、まず注意しなければならないのは測定系のダイナミックレンジである。どの程度のレベルまでの信号が測定できるかということを常に考えていないと、ケーブルを余計に接続したりすることで、測定したい信号を測定できなくなったり、雑音を多く含んだ信号を測定したりすることになる。一般に、周波数が高くなるにつれて、ケーブルや空間を伝送する際の減衰が大きくなることは頭に入れておく必要がある。長めのケーブルをベクトルネットワークアナライザに接続して、 $|S_{21}|$ の周波数特性を自分で確かめるとよい。

またコネクタ接続技術は精度のよい測定を行う上で、必要不可欠のスキルである。まずコネクタには種類があり、接続できるからといって、安易につなげてはいけない。接続時の特性が悪いという問題はともかく、コネクタの破損、破損したコネクタを正常なコネクタに接続することによるコネクタ破損が次々と起こる事態は避けなければならない。

最近のベクトルネットワークアナライザなどの測定器本体は PC の OS 上で稼働しているので、受動素子の測定を行っている分には^{*1}、フロントパネルのボタンの押し間違いにより、測定器や測定デバイスを壊すことはない。しかしながら、コネクタやケーブルは、フロントパネルの操作と異なり、物理的に破損しやすく、それらの接続不良により測定値に大きな影響を与えかねないので、マニュアルを熟読し、熟練者の指導を受けるなど、訓練してから扱うべきである。わからないときは、ゲーム感覚の延長で、決して自己判断で

^{*1} 増幅器などの能動素子を扱う場合は、許容電力より大きい信号が流れないように十分に検討を行ってから実験を行うべきである。

扱ってはいけない。破損するだけである。熟知している人に聞くなど、慎重さと押し留まる勇気が必要である。

■インピーダンス測定 アンテナの主たる回路的性能は、アンテナの入力インピーダンスならびにその派生指標（リターンロス、VSWR）により記述される。入力インピーダンスは、アンテナの入力ポートをベクトルネットワークアナライザのポートに接続することで測定される。

一昔前は、入力インピーダンスは自動化されていないベクトルネットワークアナライザ等により測定されており、非常に大変な作業であったとともに、そのキャリブレーションも十分に確立されていなかったこともあり、測定された入力インピーダンスには様々な要因の誤差が含まれるのがごく当たり前のことであった。現在では、入力インピーダンスは自動化されたベクトルネットワークアナライザを利用して測定される。測定の前に行うのは、キャリブレーションとアンテナ入力ポートの参照面の決定のみと言ってよい。このように、作業の軽減化とキャリブレーション計算の自動化により、一昔前に比べて格段の測定の不確かさ^{*2}の軽減が図られている。しかしながら、インピーダンス測定は単に手順に従って作業を行えばよいわけではなく、伝送線路の知識を十分に理解していないと誤った結果が得られる場合が多い。

■利得・パターン測定 アンテナの主たる空間的性能は、アンテナの利得およびパターンによって記述される。利得は、アンテナが空間に放射する電磁界の強度を示す、あるいは、空間の電磁波をアンテナが受信する能力を示す定量的指標である。パターンは、送受信アンテナの受信感度の角度特性である。代表的な利得測定である比較法の手順は次の通りである。電波暗室内で、送信側から電磁波を放射するとき、受信側に利得がわかっているアンテナを設置したときの受信電力を測定する。次に、そのアンテナを取り去り、同じ位置に利得を知りたいアンテナを設置したときの受信電力を測定する。これら二つの受信電力の比から、利得を求める。送受を交換して測定しても同じように利得を測定することができる。パターン測定では、送信側あるいは受信側のアンテナをターンテーブルなどに設置し、 θ あるいは ϕ の角度を変化させながら受信電力を測定し、受信電力を角度の関数として表す。

測定原理は極めて単純であるが、測定原理では想定されていない様々な要因が不確かさを大きくする。注意深くセッティングをしないとアンテナまでの同軸ケーブルによる不要放射がパターンを乱したりするので、アンテナ以外からの放射がどの部位から生じているのかを考察する必要がある。その意味で、どの部位が放射をする可能性が高いなどの放射メカニズムなどのアンテナ放射に対する理解が不可欠である。

^{*2} 不確かさと誤差は別の概念であるが、ここでは同じようにイメージしてもらえばよい。1.3 節参照。

■**応用測定** 携帯電話機をはじめとする無線機器の小型化により、アンテナと筐体が一体化されるようになり、従来のように、アンテナと無線機を分離して測定することができないことがある。このような無線機器では、ある特定方向における EIRP (effective isotropic radiated power, 実効等方放射電力) を測定するだけでは不十分であり、無線機器の通常使用形態での全放射電力 (total radiated power, TRP) を測定する必要がある。本テキストでは、TRP の代表的な測定法として知られている全球面走査法、ランダムフィールド法について説明する。また、全放射電力に密接に関連する特性量として放射効率がある。TRP 測定と同じく、全球面走査法、ランダムフィールド法により放射効率を測定することができるが、本テキストでは、キャビティシールドによる放射抑制効果を利用した簡易な放射効率測定法として知られているウィラー法ならびに改良型ウィラー法について、その原理および測定実施上の問題点について述べる。最後に、標準的な SAR 測定法について触れる。組織等価液剤を充たしたファントムの外側に携帯無線機を取り付け、その放射によるファントム内の電界分布を測定することで、局所 SAR を測定する。その電界を測定する際に利用するプローブ (probe, 探針) のキャリブレーションについて、等方性損失媒質へのフリスの伝達公式の拡張および近傍界利得の導入を含めて、説明を行う。

■**本テキストの使い方** このテキストの企画意図は、測定の際にわからなくなったり、確認したくなったり、とりあえず手を伸ばして頂けるような冊子を提供することにある。手垢で表紙が汚くなり、装丁もぼろぼろになるまで、何度もこのテキストを手にとって頂ければ、筆者の望外の喜びとするところである。

目次

まえがき	iii
第 1 章 アンテナ測定のための基礎理論	1
1.1 伝送線路理論	1
1.1.1 伝送線路の基本事項	1
1.1.2 スミスチャート	9
1.1.3 S パラメータ	11
1.1.4 インピーダンス整合	16
1.1.5 Q ファクタと帯域幅	21
1.2 アンテナ理論	25
1.2.1 微小電気ダイポール・微小磁気ダイポールによる電磁界	25
1.2.2 アンテナの界領域	28
1.2.3 電流分布・磁流分布と電磁界	31
1.2.4 放射波の性質を表す特性量	33
1.2.5 利得・放射効率・EIRP	39
1.2.6 入力インピーダンス	42
1.2.7 相互インピーダンス	44
1.2.8 偏波整合	45
1.2.9 フリスの伝達公式	47
1.2.10 送受可逆性	48
1.2.11 スケール則	49
1.3 誤差と不確かさ	50
1.4 1 章のまとめ	54
参考文献	54
第 2 章 アンテナ測定技術の基礎	57
2.1 測定技術における人的要素	57

2.2	同軸ケーブルとコネクタ	59
2.2.1	同軸ケーブル	59
2.2.2	コネクタ	61
2.2.3	APC-3.5 と SMA コネクタの接続	63
2.2.4	コネクタの着脱	66
2.3	高周波素子	68
2.4	ベクトルネットワークアナライザ	73
2.4.1	VNA の概要	73
2.4.2	キャリブレーション	76
2.5	スペクトラムアナライザ	83
2.6	雑音とダイナミックレンジ	84
2.7	法的規制	89
2.8	2 章のまとめ	89
	参考文献	89
第 3 章	インピーダンス測定	93
3.1	VNA を用いたインピーダンス測定	93
3.1.1	測定手順	93
3.1.2	注意事項	95
3.2	電気長補正	97
3.2.1	電気長補正の概念	97
3.2.2	短絡による電気長補正	100
3.2.3	VNA の時間領域機能を用いた電気長補正	101
3.3	イメージ法による測定	108
3.4	ケーブルにおける不平衡電流対策	111
3.4.1	不平衡電流の影響	111
3.4.2	バラン	114
3.5	平衡系アンテナのインピーダンス測定	118
3.6	3 章のまとめ	119
	参考文献	120
第 4 章	パターン・利得測定	123
4.1	測定環境	123
4.1.1	遠方界条件と測定レンジ	123
4.1.2	電波暗室	124

4.1.3	送受信装置	127
4.2	パターン測定	130
4.2.1	2次元パターン	130
4.2.2	ポジショナ	132
4.2.3	円偏波成分パターン	138
4.2.4	誤差要因	139
4.3	軸比測定	145
4.3.1	偏波パターン法	145
4.3.2	スピンリニア法	147
4.3.3	直交直線偏波成分の振幅位相測定による偏波特性の決定	149
4.4	利得測定	151
4.4.1	比較法	151
4.4.2	2アンテナ法および3アンテナ法	154
4.5	4章のまとめ	155
	参考文献	155
第5章	応用測定	159
5.1	放射電力測定	159
5.1.1	全球面走査法	159
5.1.2	変調散乱法	166
5.1.3	ランダムフィールド法	167
5.2	放射効率測定	170
5.2.1	ウィラー法	170
5.2.2	改良型ウィラー法	176
5.3	SAR測定	186
5.3.1	標準的なSAR測定法	186
5.3.2	電界プローブ較正	187
5.3.3	液剤中における利得測定	188
5.4	5章のまとめ	189
	参考文献	189
あとがき		195
付録A	dB表示	197
A.1	電力比とdB表示	197
A.2	電圧比・電流比とdB表示	198

A.3	電力レベル・電圧レベルの dB 表示の例	200
A.4	dB の速算法	201
付録 B	測定器のディスプレイ表示	203
付録 C	アンテナ測定に関連する規格等	205
C.1	技術適合証明	205
C.2	計量標準量	205
	参考文献	206
付録 D	偏波整合に関する効率	207
D.1	偏波を表す単位ベクトル	207
D.2	送受信アンテナ間における偏波整合に関する効率	207
D.3	スピリニア法における極大・極小電界と主偏波・交さ偏波成分の関係	209
付録 E	利得の直交偏波成分分解	211
E.1	直交偏波成分分解	211
E.2	直交直線偏波成分分解	211
付録 F	最小二乗法による円の中心と半径の求め方	213
F.1	円の方程式と円の中心と半径	213
F.2	最小二乗法の適用	214
	参考文献	214
索引		215