工学計測 I
(7) 電磁波の計測原理

高田潤一
takada@ide.titech.ac.jp

2010 年 5 月 11 日

概 要

本日は，電気量の測定の 3 回目として，電磁波の強度，周波数，位相の計測原理について説明する．シラバスでは，光及び電磁波となっていたが，両者の測定原理はかなり異なるため，今回は電磁波に絞って説明する．

1　アンテナ〜空間の電磁波を捉える

空間を伝搬する電磁波のセンサに当たるデバイスがアンテナである．電磁気学ではアンテナの詳細については説明しなかったが，電磁波と高周波信号（電流・電圧）を相互に変換する．

測定周波数が決まっているときにはは標準アンテナとしてダイポールアンテナ（図 1）やホーンアンテナ（図 2）が使用される．ダイポールアンテナは半波長の長さで電流定在波が共振し，これを動作周波数とする．ホーンアンテナは開口に入射した平面波を集約して導波管と呼ばれる伝送線路に送り込む．導波管の動作周波数帯域で決まる周波数範囲（ダイポールアンテナよりは広い）で動作する．

電磁波は横波なので，電界の向きを偏波と定義する．ダイポールアンテナはアンテナと偏波の向きが平行となる．ホーンアンテナでは幅の狭い方向が偏波の向きとなる．

アンテナ感度の角度特性を指向性という．ダイポールアンテナは垂直面内では無指向性，アンテナを含む面内では８の字特性となる．ホーンアンテナは開口面と垂直な方向を中心に指向性が絞られる．波長で正規化した長さが大きいほど指向性の幅は絞られる．

受信アンテナの指向性は，アンテナ係数 AF で表現される．アンテナ係数は，空間に存在する電界と，その電界中にアンテナを置いたときに測定器で計測されるアンテナ端子電圧との比で定義され，以下のように表される [4].

$$\mathrm{AF} = \frac{E}{V} \tag{1}$$

ただし， E は空間に存在する電界強度，V は測定器の指示電圧である．

2　スペクトラムアナライザ〜高周波信号の強度・周波数解析

スペクトラムアナライザは高周波信号の強度と周波数特性の解析を行う装置で，図 3 のような構成である．

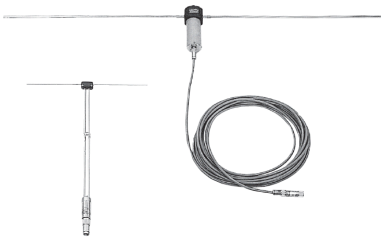

図 1: 標準ダイポールアンテナ（[1] より引用）

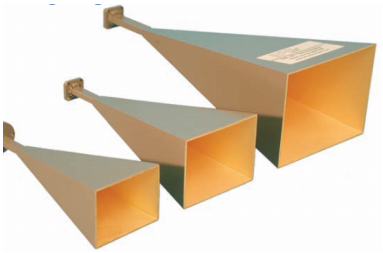

図 2: 標準ホーンアンテナ（[2] より引用）

2.1　ヘテロダイン回路〜周波数変換

対象となる高周波信号の振幅・位相情報を保持したまま，処理しやすいように周波数を下げるのがヘテロダイン回路である．入力信号を $v_{\mathrm{in}}(t) = A\cos(2\pi f_{\mathrm{i}} t + \phi)$，測定器内の局部発振器の信号を $v_{\mathrm{LO}}(t) = \cos(2\pi f_{\mathrm{l}} t)$ とする．これらの信号を，信号の積を出力するミクサ回路に入力すると，出力 v_{mix} は

$$
\begin{aligned}
v_{\mathrm{mix}}(t) &= v_{\mathrm{in}}(t) v_{\mathrm{LO}}(t) \\
&= A\cos(2\pi f_{\mathrm{in}} t + \phi)\cos(2\pi f_{\mathrm{LO}} t) \\
&= \frac{A}{2}\left(\cos(2\pi(f_{\mathrm{in}} + f_{\mathrm{LO}})t + \phi) + \cos(2\pi(f_{\mathrm{in}} - f_{\mathrm{LO}})t + \phi)\right) \qquad (2)
\end{aligned}
$$

$f_{\mathrm{in}} \sim f_{\mathrm{LO}}$) ならば，$f_{\mathrm{in}} - f_{\mathrm{LO}} \ll f_{\mathrm{in}}$ となり，式 2 の第 2 項は v_{in} の振幅及び位相情報を保持したまま低い周波数に変換されたこととなる．$f_{\mathrm{in}} - f_{\mathrm{LO}} = f_{\mathrm{IF}}$ が一定となるように f_{LO} を調整し，$v_{\mathrm{mix}}(t)$ を中心周波数 f_{IF} の帯域通過フィルタに通せば，式 (2) の第 2 項だけを取り出すことができる．これがヘテロダイン受信機の原理である．

スペクトラムアナライザでは，f_{LO} を走査して $v_{\mathrm{in}}(t)$ の周波数特性を取得する．

2.2　直交復調〜位相情報の抽出

古いスペクトラムアナライザではヘテロダイン受信機の出力する電力だけを観測していたが，最近のスペクトラムアナライザにはシグナルアナライザ機能が付いていている．

位相情報を取り出すためには，直交復調という手法がよく用いられる．原理はヘテロダイン受信機とほぼ同一であるが，入力信号 $v_{\mathrm{in}}(t) = A\cos(2\pi f_{\mathrm{i}} t + \phi)$ に，同一周波数の互いに直交する 2 つの局部発振器信号 $v_{\mathrm{I}}(t) = \cos(2\pi f_{\mathrm{i}} t)$ 及び $v_{\mathrm{Q}}(t) = -\sin(2\pi f_{\mathrm{i}} t)$ をそれぞれ掛け算して，低域通過フィル

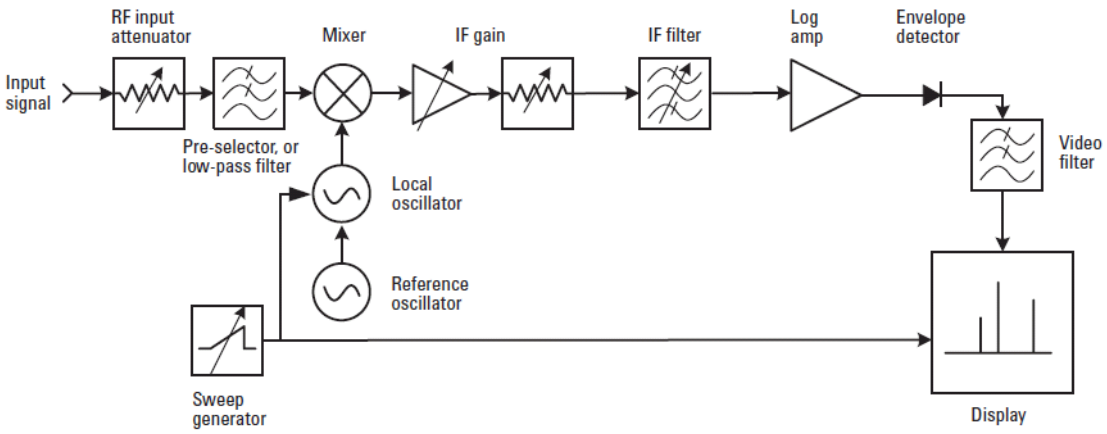

図 3: スペクトラムアナライザのブロック図（[4] より引用）

タにより直流成分のみを取り出すと次のようになる．

$$v_{\mathrm{I}}(t) = \mathrm{LPF}[v_{\mathrm{in}}(t)v_{\mathrm{I}}(t)] = \frac{A}{2}\cos\phi \tag{3}$$

$$v_{\mathrm{Q}}(t) = \mathrm{LPF}[v_{\mathrm{in}}(t)v_{\mathrm{Q}}(t)] = \frac{A}{2}\sin\phi \tag{4}$$

$\cos\phi$ と $\sin\phi$ の値が判れば，位相 ϕ の値は一意に定まる．

参考文献

[1] アンリツ，標準ダイポールアンテナ．[Online]. Available: http://www.anritsu.com/ja-JP/Downloads/Brochures-DatasheetsandCatalogs/Catalog/DWL6182.aspx

[2] MI Technologies, Standard Gain Antennas Horns. [Online]. Available: http://www.mi-technologies.com/Microwave_Components/GainHornAntennas.htm

[3] 小見山耕司，森岡健浩，廣瀬雅信，“電磁界・アンテナ計測標準に関する研究．” [Online]. Available: http://www.aist.go.jp/ETL/jp/results/bulletin/pdf/64-8/09komiyama72.pdf

[4] Agilent Spectrum Analysis Basics, Application Note 150, Agilent Technologies, 2004.