

波 弦 正 非 导 波 线 天 与

〔美〕H. F. 哈尔姆斯 著
邵定蓉 梁钊 译 张其善 审校



人民邮电出版社 / 人民邮电出版社 / 人民邮电出版社

非正弦波天线与波导

[美] H. F. 哈尔姆斯 著

邵定蓉 梁 钊 译
张其善 审 校

人民邮电出版社

1982

Antennas and Waveguides for
Nonsinusoidal Waves
HENNING F. HARMUTH
Department of Electrical Engineering
The Catholic University of America
Washington, D. C. 1984
ACADEMIC PRESS, INC.

内 容 提 要

本书主要介绍非正弦波在发射与接收过程中普遍感到最为困难的天线、发射和接收的设计原理、信号处理的方法以及有关的工程实践等技术问题。是一本使非正弦波从理论进入实际的设计阶段的指导性很强的参考书。全书共分六章：第一章引论；第二章辐射器；第三章接收器；第四章天线阵列；第五章阵列信号处理；第六章波导。

本书可使读者开阔思路，进一步理解传统的正弦波理论中的一些重要概念，对于研究非正弦波理论及其应用的研究人员无疑是一本值得一读的好书。

本书适合于通信、雷达和信息处理等专业的科技人员及高校师生阅读参考。

非正弦波天线与波导

〔美〕H·F·哈尔姆斯 著

邵定蓉 梁 钊 译

张其善 审校

责任编辑：王晓明

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

顺义向阳胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32 1990年4月 第一版

印张：11 1/2 页数：180 1990年4月北京第1次印刷

字数：260 千字 印数：1—1 500 册

ISBN 7-115-04101-6/TN·294

定价：4.60 元

译者前言

本书系统地论述了非正弦波信号在辐射、接收过程中天线、辐射器、接收器、信号处理及波导的原理及设计思想，这些都是非正弦波从理论走向实际应用中最为困难的问题。全书着重分析、比较了传统的正弦波与非正弦波在一些基本概念上的联系与区别、在通信、雷达及信号处理等方面的优缺点。

H. F. 哈尔姆斯博士是在非正弦波理论方面的著名学者，他的《序率理论基础与应用》中译本已在1980年由人民邮电出版社出版。他的《非正弦雷达与无线电通信》中译本也于不久前由人民邮电出版社正式出版。翻译本书的另一个目的就是介绍他在最近几年来在这方面的研究成果，读者从书中的许多详细的有关设计、计算公式及实验电路就可以了解到目前非正弦波理论在通信、雷达及信号处理等领域里的进展情况，因此本书对于研究非正弦波理论及其应用的科研人员来讲，是一本理论联系实际、指导性很强的参考书。本书对于现代通信、雷达和信号处理等领域的科技工作人员，在处理宽带信号的辐射、接收、匹配滤波、抗干扰等问题时，同样可以开阔思路，有所收益。本书还可作为高等院校有关专业的参考书。

由于我们水平有限，译文中缺点、错误在所难免，诚恳地希望读者批评指正。

对H. F. 哈尔姆斯赠给我们本书原版书及有关帮助，我们深表感谢。

译者

前 言

了解非正弦波领域新进展的读者对H. F. Harmuth 教授并不感到陌生。他本人对该领域所做出的突出贡献得到了广泛的赞许。从此，这一专业便超脱了理论的范围而进入了非正弦波天线与波导的设计阶段。新技术必定是要采用的，为了使这些生疏而又相当困难的材料能被科学工作者和工程师理解，作者已费尽了苦心。我深信，当这些方法赢得更广泛的读者时，本书将成为主要的参考文献。

P. W. 霍克斯

中 文 版 序 言

翻译一本科技书本来就不容易，对于象中文和英文这两种不同的语言，这个任务就更艰巨。我的书受到重视使我深感荣幸，对所作的努力表示感谢。

科学是人类能够跨越任何边界的少数的活动之一。这些边界限制的减少可促进科学进步，可能更重要的是通过科学的实际应用能获得特殊的成效。

H.F.哈尔姆斯

美国天主教大学

1987年7月30日

序 言

在大相对带宽电磁波（也简称为非正弦波）的原理与应用方面过去几年里已发表了不少论著。下一个步骤便是去开发为实现这些应用所需要的技术。

因为纳秒与亚纳秒脉冲电路已问世一段时间，而自麦克斯韦起人们就理解了电磁波的可能的时变量，故一般都认为天线问题是最为棘手的。1900年前后在开发正弦波的传输技术时曾面临过类似的问题，这个问题通过采用谐振偶极子而得到了解决。现在通常认为这种天线是马可尼在专利中提出来的，这一问题在当时曾引起了不少争议。

现有的天线理论是从1900年起发展起来的，在谈及正弦波天线与参数频率的关系时虽然有时也把某些天线广义地称为宽带天线或与频率无关的天线，但该理论所研究的主要还是正弦波。对非正弦波而言，所需要的也正是象谐振偶极子那样的基本型天线。大电流辐射器和闭环接收器看来就是这类基本型天线。

在数学上非正弦波天线理论与正弦波天线理论相比要求更高。这是因为，正弦波是麦克斯韦方程的特解而非正弦波却是其通解。作为数学工具，贝努利乘积法的变量分离将以矢量分析来取代。在本书中我们将对此做比较详细的讨论，目的是使电气工程师能掌握这一类方法。

与正弦波相比非正弦波所代表的麦克斯韦方程的解更具有普遍性，根据这种事实我们就预料非正弦波在性能上将优于

正弦波。对天线阵列辐射方向图的研究表明，这种预测是完全正确的。

正弦波波导理论大约已有九十年的历史。要把这一理论推广到非正弦波自然就求助于矢量分析。然而，我们却选用富里叶级数和富里叶变换法，这种方法虽然不如矢量分析法得力，但数学上比较简单。由于我们已经熟悉了无失真理论中利用同轴波导或电缆的非正弦波无失真传输，采用这种简化方法就显得比较合理。

这里的某些成果原发表于IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility。作者对编辑里查德·B·舒尔茨表示感谢，是他打破了不发表新思想的惯例。此外，作者要感谢IEEE电磁兼容学会，特别是感谢其成员A·T·亚当斯，H·K·麦尔托，G·R·雷丁波，G·F·桑迪，H·M·施里克，以及L·W·托马斯十多年来所给予的支持。北京清华大学常迺，陕西西安电子科技大学樊昌信和胡征，四川成都电子科技大学谢处方，北京航空航天大院张其善以及南非约翰斯堡威特沃特斯兰大学B·A·奥斯丁，H·E·汉拉恩，C·F·兰迪，J·P·莱恩德斯，m·G·鲁特以及澳大利亚悉尼大学T·W·科尔曾以各种方式给作者提供了帮助，在此谨表示衷心的感谢。

本书3.11节中雷达天线与无线电传输的试验工作内容是在新罕布什尔州休斯顿地球物理勘探公司的支持下进行的。科学园地处处百花盛开，作者的工作进而又得到了中华人民共和国有关部门、南非威特沃特斯兰大学以及澳大利亚悉尼大学的支持。对研究人员和工程师来说最好的礼物莫过于为他们提供从事实验的机会和条件。

作者想借此机会提醒读者，对苏联古比雪夫D·D·科罗

夫斯基及其合作者的著作（1969，1975，1976，1984）应引起重视。由于缺乏英文版，他们的成果还得不到广泛传播，这与上一代人中科托尼科夫的工作不被人们了解又何其相似。

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 基本概念.....	(1)
1.2 非正弦波发射机和接收机.....	(4)
1.3 非正弦波的扩谱无线电传输.....	(16)
1.4 相位跳变与频率跳变的比较.....	(21)
1.5 傅里叶分析的适用范围.....	(28)
1.6 吸收器.....	(33)
1.7 分层介质对短脉冲的反射.....	(36)
1.8 电磁波的阻抗匹配.....	(41)
1.9 吸收与阻抗的匹配.....	(45)
1.10 对大相对带宽与小相对带宽 无线电信号的吸收.....	(50)
第二章 辐射器	(55)
2.1 赫兹电偶极子.....	(55)
2.2 谐振辐射器.....	(69)
2.3 大电流辐射器.....	(73)
2.4 面辐射器.....	(79)

2.5	天线电流的时变量、驱动电压和辐射功率.....	(82)
2.6	功率辐射的效率.....	(89)
2.7	能量辐射的效率.....	(94)
2.8	隙缝天线辐射器.....	(102)
2.9	大电压辐射器.....	(118)
2.10	赫兹磁偶极子.....	(123)
2.11	行波天线.....	(130)
2.12	与频率无关天线的概况.....	(135)
第三章	接收器.....	(140)
3.1	相量与算子.....	(140)
3.2	赫兹电偶极子.....	(143)
3.3	接收机输入电压的时间变量.....	(147)
3.4	功率、平均功率、等效孔径.....	(150)
3.5	功率匹配与减小失真.....	(156)
3.6	闭环接收器.....	(159)
3.7	隙缝天线接收器.....	(162)
3.8	隙缝天线的平均特性.....	(172)
3.9	赫兹磁偶极子接收器.....	(179)
3.10	功率源与辐射器的匹配.....	(183)
3.11	实验结果.....	(187)
第四章	阵列天线.....	(194)
4.1	波束形成技术和信息.....	(194)
4.2	产生方向性效应的信号的特征.....	(197)
4.3	作为方位角函数的电场和磁场强度时 间变量.....	(200)
4.4	峰值幅度, 峰值功率和能量方向性图.....	(207)

4.5	上升时间或斜率方向性图.....	(210)
4.6	仰角的方向性图.....	(212)
4.7	单脉冲天线方向性图.....	(217)
4.8	非正弦波单脉冲天线方向性图.....	(222)
4.9	非对称的天线方向性图.....	(231)
第五章	阵列信号处理	(234)
5.1	噪声抑制.....	(234)
5.2	斜率处理器.....	(238)
5.3	以斜率处理为基础的能量方向性图	(243)
5.4	热噪声的影响.....	(249)
5.5	角度分辨率.....	(253)
5.6	电路的实现.....	(259)
5.7	滤波后的脉冲恢复.....	(270)
5.8	雷达中的方位失真.....	(273)
5.9	对称性的问题.....	(283)
第六章	波导	(288)
6.1	矩形波导的通解.....	(288)
6.2	非正弦波的举例.....	(297)
6.3	矩形谐振腔	(311)
6.4	圆柱形波导.....	(326)
6.5	同轴波导.....	(334)
6.6	天线转换开关和环形器.....	(341)
参考文献		(344)

第一章 引 论

1.1 基本概念

自从1900年前后无线电工程诞生以来，无线电传输理论与技术几乎完全是建立在正弦波概念的牢固基础上。这一理论之所以以正弦波为基础，是因为若不采用贝努利乘积法就很难求出麦克斯韦方程的解。尽管用这种方法也可以通过常微分方程去解偏微分方程，但得到的只是特解而不是通解，并且这些解都具有正弦函数的形式。半个多世纪以前，随着《Theorie der Elektrizität》（德文，“电理论”——译者注）这本名著的第一个英译本的出现，相应于赫兹偶极子辐射的麦克斯韦方程的通解就已经能够得到*。如果我们不象通常那样假设偶极

*该书于1894年由August Föppl以书名《Einführung in die Maxwellsche Theorie》（德文，《麦克斯韦理论导引》）首次出版。1904年Max Abraham做了修订，改为现在的书名《Theorie der Elektrizität》并出版了第一卷的第二至第七版。1930年Richard Becker接替了这项工作，出版了第八至第十五版。1955年正当第十六版准备出版时Becker去世，Fritz Sauter便继续进行这项工作。英文第一和第二版（Abraham and Becker, 1932, Part III, Chapter X, Sect. 11; 1950, Part III, Chapter X, Sect. 10）给出了赫兹电偶极子的通解，以分量形式 H_a , E_r , E_θ 表示。英文第三版（Becker, 1964, Chapter D III, Sect. 67）给出了通解的矢量形式。当一个点电荷以具有任意时间变量的速度 V 运动时就产生场强 E 和 H （用矢量表示），这一点在德文第二版（Abraham, 1905, Vol. 2, Sect. 13）中可以查到；由这些方程不难求出赫兹电偶极子的场强。Abraham在第97页的脚注中提到，K. Schwarzschild于1903年发表了文献的出处（Schwarzschild, 1903）。赫兹提供了正弦电流赫兹偶极子麦克斯韦方程的解（1889, 1893）。

矩或偶极子电流是正弦时间变量，这个解所给出的电场强度与磁场强度就是偶极矩或偶极子电流的函数。

这一通解在工程技术文献中几乎完全没有谈到。论述天线的教科书、科技书以及几乎所有的期刊文献均认为，波是随着天线电流的正弦变化而产生的。受这些广为流传的文献的影响，技术的发展自然就遇到了阻碍。后来，人们又发现正弦电流和电压能和LC电路以及某种结构的天线发生谐振，这就使得有选择地进行无线电传输成为可能。然而，随着又产生了一种普遍的看法，认为谐振是正弦波所特有的现象。更一般的趋向是，建立在正弦函数基础上的理论导致了正弦函数技术，正弦函数技术反过来又促进正弦理论的进一步发展。回顾这一发展进程，我们难以判断到底是什么因素打破了这一循环。或许是，随着半导体的发展，数字电路（现在这种电路是以电子元件而不再以机电元件为基础）重新又引起了人们的兴趣，于是在我们的脑海中便产生了这样的印象：正弦函数并非在任何场合下都可以运用。

既然信息总是通过非正弦*函数发射的，那么，非正弦函数意味着什么呢，我们必须给出一个具体的定义。我们采用相对带宽这样一个技术性较强的术语。相对带宽定义为，

$$\eta = (f_H - f_L) / (f_H + f_L) \quad (1)$$

其中 f_H 和 f_L 分别为相应的最高频率和最低频率。该定义可运用

* 更准确地说，只有当发射信息的时间函数 $f(t)$ 在 $-\infty < t < +\infty$ 的整个区间内为非解析时，发射信息的速率才能大于零。如果一个解析函数在某个特定时刻 t_0 是已知的，那么对所有时刻也将为已知，在其余时刻发射这个函数值时就不能得到信息。函数只有在有限区间内以大于零的速率发送信息才是可解析的。因此，报务员按电键时所产生的长短非线性脉冲均能以大于零的速率发送信息，而周期无限长的正弦函数却不能发送信息。除了可解析的函数以外，周期函数不管是可解析的还是不可解析的，都可以以零速率发送信息。

于带宽为 Δf 的信号对频率为 f_c 的正弦载波进行调幅。我们得到 $f_H = f_c + \Delta f$, $f_L = f_c - \Delta f$, 于是

$$\eta = \Delta f / f_c \quad (2)$$

这是教科书中相对带宽的一般表达式。我们看到式(1)中没有出现 f_c 。所以式(1)就比式(2)更具有普遍性。

对于正弦函数, 我们得到 $f_H = f_L$ 且 $\eta = 0$ 。典型的无线电或雷达信号, $\eta \approx 0.01$; 这类信号不再是纯正弦函数, 但外表上与正弦函数仍很相似。随着 η 的增大, 与正弦函数的相似程度便减小, 当相对带宽接近其上限值 $\eta = 1$ 时, 这种相似性便不复存在。我们谈论“正弦”信号或更确切一点说几乎是正弦的信号时, 是指极限 $\eta \rightarrow 0$, 非正弦信号则是指其相对带宽等于区间 $0 < \eta \leq 1$ 中的某一数值并且这个值“明显”大于零。

相对带宽并不是一个精确的概念, 这一点我们决不可马虎。在现实世界中任何(时间)信号都是有始有终的; 信号具有有限的能量、有限的幅度, 并且幅度变化一个有限值 ΔA 需要一个有限的时间 ΔT 。在 $0 \leq f < \infty$ 区间内, 傅氏变换几乎处处不为零。因此, f_L 和 f_H 就不可能是低于或高于傅氏变换处处为零这样的频率。我们又必须任意定义所谓相应的最高频率和最低频率; 例如, 可规定低于 f_L 和高于 f_H 的范围内信号能量不大于1%。运用正弦函数和傅氏变换导出的这类概念时产生这种困难是不可避免的。原因在于, 用无限持续的正弦函数(在 $-\infty < t < +\infty$ 的整个区间内解析)的叠加来表示有限持续的信号(一种非解析函数), 这种表示是含糊的。为了避免产生这种问题, 我们可以抛开傅氏变换* 以及由此所产生的诸如频率和频率带宽这样的概念, 但赞成以这种代价来换取数学上的精确性的无

* 傅氏级数则不受影响, 这是因为它只需要一个有限区间。有限区间外一般不要求周期连续。

线电工程师却寥寥无几。因此，除非特别说明，我们将尽量采用傅氏分析的概念。

1.2 非正弦波发射机和接收机

既然用于非正弦信号的发射机和接收机与传统模式相比有显著区别，我们就首先讨论这种设备的方框图，然后再对这类设备的天线和波导做详细的讨论。图1.2-1是一种无载波雷达的方框图。发射机中有一个信号产生器SGE，产生器的输出电流经功率驱动器PDR进入辐射器RAD。a和b点的电压以及

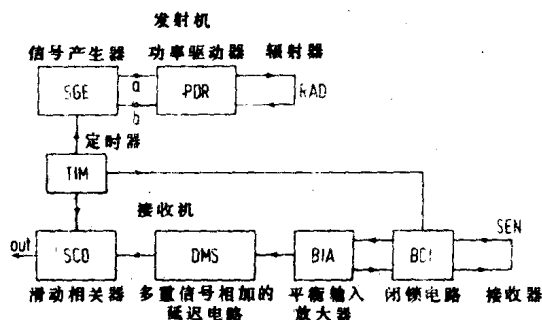


图 1.2-1 无载波雷达方框图

辐射器的典型时间变量如图1.2-2中行a和行b所示。辐射器中的锯齿形电流产生行c随时间而变化的电场强度与磁场强度。正的短脉冲与负的长脉冲具有相同的面积 $E \Delta T$ 。因而正脉冲的能量与 $E^2 \Delta T$ 成正比，而负脉冲的能量则与 $(E \Delta T)^2 / (T - \Delta T)$ 成正比。 $\Delta T \ll T$ 时，全部能量实际上都集中在正的短脉冲上。因此，即使辐射信号中不含直流分量，我们往往也可以忽略这些负的长脉冲。

假设图1.2-2行c的正脉冲被点状散射器或雷达反射器反射回来。选择这两个目标时我们确保回波脉冲与辐射脉冲具有相同的时间变量。其他目标将引起一些变化，这种变化有时被称为失真，更确切地说应把它称为雷达目标特征信号，因为这种变化为我们提供了目标的形状和材料方面的信息。

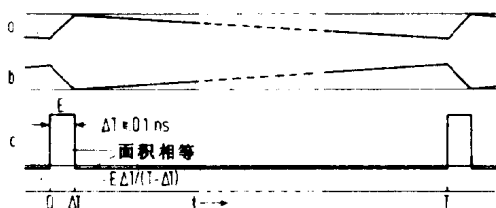


图 1.2-2 在无线信道中运用一个简单矩形脉冲时，图1.2-1的无载波雷达的时间波形图。

回波脉冲被图1.2-1中的接收器接收后进入闭锁电路。若反射器和接收器采用相同的天线结构，闭锁电路便成为天线转换器。市场上出售的隔离器和环行器也可作为天线转换器使用，其相对带宽大约可达 $\eta = 0.69$ 。此数值对传统雷达来说已相当大，但对无载波雷达还嫌不够。莫雷 (Morey) (1947) 介绍了一种用于无载波雷达的实用天线转换器，该转换器目前已在许多无载波雷达中得到了应用。在其他设计方案中，尤其是当辐射器和接收器分别采用独立的天线时，闭锁电路是用开关来实现的，辐射时开关切断接收器与输入平衡放大器 B I A 之间的连接并将放大器输入端短路。输入平衡放大器抑制接收器的相同信号并放大不同信号。

至此，发射机和接收机与传统通信设备并无区别；若图