

非正弦波雷达 与 无线电通信

〔美〕H·F·哈尔姆斯 著
张其善 李植华 译

人民邮电出版社 / 人民邮电出版社 / 人民邮电出版社

TN92
08

非正弦波雷达与无线电通信

【美】H·F·哈尔姆斯 著

张其善 译
李植华

译者前言

由美国科学出版社主编的一套“电子学与电子物理的进展”丛书中，已出版了四本专著：《序率理论：基础与应用》（该书已译成中文，人民邮电出版社出版）、《非正弦波雷达与无线电通信》、《非正弦波天线与波导》、《非正弦波电磁波的传播》。作者是著名的哈尔姆斯教授，他曾应邀到中国、苏联、日本、印度、科威特等国讲学。他的著作大都已译成俄文出版。为了促进国内非正弦波方面的研究工作，我们译出上述四本中的第二本以飨读者。

本书主要研究非正弦波在雷达和无线电通信中的应用问题，提出了新理论，新观点，有其独到之处。它是哈尔姆斯教授的成功之作。随着科学技术的发展，它将日益显示出其潜在而深远的意义。

参加本书翻译工作的还有梁钊、沈骏等同志，感谢他们作了大量的工作。

限于我们的水平，翻译过程中错误在所难免，请广大读者批评指正。

译者 1987.10.1.

主编前言

对于哈尔姆斯博士所著此书的出版，我们因它具有双重意义而深感喜悦。一方面，这是他为《电子学与电子物理的进展》丛书所奉献的第三本著作。另一方面，该书的内容新颖，是有关这一专题唯一的综合性论著，而此专题在雷达与其它领域中都十分重要。我们相信，本书所涉及的内容将大大超过它的直接应用价值，具有潜在而深远的意义。我们祝愿此书富有持久而旺盛的生命力。我们认为，由于哈尔姆斯博士的勤奋努力而使本书获得成功，这是值得高度赞赏的。

L. 马丁

C. 马丁

中文版序言

对于科学家来说，看到自己的著作被译成另一种语言是最荣幸的。除个人的喜悦之外，翻译本身还有力地证明：科学是超越所有界限的，无论是政治的，意识的，还是文化的。通向科学成果交流的多种途径使它们具有广泛的应用。再也没有更好的方法使科学知识为共同的利益服务。

哈尔姆斯

1987.2.7

序 言

自从论述非正弦函数用于信息传输以及有关无载波雷达的第一批论文发表后，迄今已二十年了。在学术上，对这门理论的研究已遍及全球，从英国、以色列、约旦、苏联、美国和西德的专家们所发表的著作中就可以看到这一点。在实际应用上，已研制成约60部雷达，并已运用于从赤道到南北极的广大区域。

一种新理论要为人们所接受并普遍加以运用，就得做大量的工作，尤其是当这种理论不是象通常那样逐步地影响人们的看法而是要从根本上改变人们的思想时，就要做更多的工作。对这种理论，我们首先要求它具有简单明瞭的形式，这样毋须太多的时间就能被人们掌握；其次，则要求该理论在实际应用上有显而易见的成效。本书在研究雷达与无线电通信的理论时便试图遵循这两项要求。

序率理论的反对者们会利用本书所没有解决的种种问题来加以指摘。事实上的确如此。世界上没有十全十美的东西，科学上也没有完美无缺的理论。然而，正确的理论会随着时间的推移而日臻完善。任何力量都只能影响理论发展的速度而无法改变其归宿。正确的理论终究会胜利，错误的理论则必然要消亡。维护帮助没落势力注定要失败，唯有支持推动新生事物才能获得成功。正是这种有利于创造、有利于进步的潮流在不断促使科学向前发展。

作者要感谢电气及电子工程师协会（*IEEE*）电磁兼容学会多年来的支持。特别是要感谢学会的领导成员N.阿罕姆特，

W.E.科里, A.法拉, J.R.捷努斯基, B.凯泽, H.兰德尔, G.R.里丁波, G.F.桑迪, H.M.施利科, R.B.舒尔茨, R.M.肖沃斯, L.W.托马斯, 以及J.C.托勒。

本书的不少材料均取自《IEEE电磁兼容汇刊》所发表的论文。对电气及电子工程师协会为引用这些文献所提供的方便表示感谢。

作者多年来对于是否在本书中发表有关军事上应用的材料一直是持犹豫态度的,只是通过与(美国)国防部的许多科学家进行讨论、通信与商榷后才决定这样做的。这些科学家有:空军科研部主任L.C.克拉维茨,海军研究部电子及固态科学处主任J.O.狄摩克;海军研究实验室雷达负责人M.I.斯科尔尼克;海军水下系统中心,ELF处经理D.A.米勒;高级研究计划处的J.C.R.利克里特和C.H.邱奇;海军研究实验室的W.S.阿门特, D.J.贝克, J.P.谢尔顿;以及海军研究部的H.W.墨勒尼。

巴塞的纳加州理工学院的P.M.伽墨尔对本书进行了审阅并提出了不少改进意见,作者在此表示衷心的感谢。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 正弦波在无线电传输中的起源	(1)
1.2 集中参数的时变谐振电路	(5)
1.3 分布参数时不变谐振电路	(17)
1.4 相对带宽.....	(22)
1.5 波的衰减、噪声与失真	(27)
1.6 什么时候采用非正弦波	(35)
第二章 大相对带宽射频信号	(52)
2.1 基本概念	(52)
2.2 无载波信号	(59)
2.3 正弦载波	(64)
2.3.1 正弦载波的幅度调制	(64)
2.3.2 解调	(73)
2.3.3 正弦载波的频率调制	(80)
2.4 非正弦载波	(83)
2.4.1 非正弦波的幅度调制.....	(83)
2.4.2 能量分布的控制	(88)
2.4.3 一般载波的解调	(91)
第三章 辐射器与接收器	(94)
3.1 与频率无关的天线	(94)
3.2 赫兹偶极子	(97)
3.2.1 与频率无关的天线的工作原理	(97)
3.2.2 偶极子阵	(101)

3.2.3 大电流偶极子	(128)
3.3 谐振辐射器	(134)
3.4 接收器	(137)
第四章 选择性接收机	(142)
4.1 一般周期波接收机	(142)
4.2 射频率率滤波器	(144)
4.2.1 序率低通滤波器	(144)
4.2.2 序率带通滤波器	(150)
4.2.3 短周期抑制电路	(154)
4.3 序率变换器	(158)
4.4 中频率率滤波器	(130)
4.5 波形鉴别器	(163)
4.6 非周期波接收机	(167)
第五章 在雷达中的应用	(174)
5.1 低仰角跟踪	(174)
5.1.1 幅度反向原理	(174)
5.1.2 线性极化非正弦波的反射	(177)
5.1.3 傅里叶分析的应用	(183)
5.1.4 所需的距离分辨率	(187)
5.1.5 与传统雷达的比较	(191)
5.1.6 装甲车跟踪雷达	(193)
5.2 综合孔径雷达	(196)
5.2.1 两点间的分辨率	(196)
5.2.2 距离和定位误差	(200)
5.2.3 侧视雷达	(202)
5.2.4 综合孔径静止雷达	(209)
5.2.5 二维综合孔径	(215)

5.2.6	脉冲分辨率	(222)
5.2.7	有限带宽的角分辨率	(231)
5.2.8	用多普勒效应形成波束	(235)
5.2.9	简单非正弦载波的多普勒效应	(243)
5.2.10	编码载波的多普勒效应	(246)
5.2.11	编码载波的波束形成	(251)
5.2.12	脉冲位置与脉冲形状	(255)
5.2.13	幻影抑制	(258)
5.2.14	用 <i>MTI</i> 技术形成波束	(261)
5.2.15	基于脉冲斜率的波束形成和成像	(262)
5.3	跟踪雷达和波束导引	(271)
5.3.1	几何关系	(271)
5.3.2	两个半圆锥面相交而成的波束轴	(275)
5.3.3	简单的非正弦信号	(279)
5.3.4	波束宽度、角分辨率和角精确度	(281)
5.3.5	工作方式	(290)
5.4	下视雷达	(294)
5.4.1	分辨率问题	(294)
5.4.2	数字控制波	(299)
5.4.3	脉冲产生及压缩	(302)
5.4.4	杂波的对消	(304)
5.4.5	技术问题	(306)
第六章	高级信号设计与处理	(310)
6.1	载波编码与基带信号编码	(310)
6.1.1	脉位与脉形编码	(310)
6.1.2	非正弦无线电信号的结构	(315)
6.1.3	精细结构或脉位编码	(316)

6.1.4	平均一峰值功率比的极大化	(323)
6.1.5	接收机设计原理	(329)
6.1.6	多普勒移位解算器	(335)
6.1.7	复杂无线电信号的傅里叶级数表示	(341)
6.2	图钉模糊函数	(343)
6.2.1	16个脉冲的互相关函数	(343)
6.2.2	消除大峰值电流	(354)
6.2.3	互相关函数的改善	(356)
6.2.4	理想的互相关函数和模糊函数	(363)
6.3	速度与加速度处理	(368)
6.3.1	距离及其一阶和二阶导数	(368)
6.3.2	简单的速度与加速度处理器	(372)
6.3.3	有效处理的原理	(377)
6.3.4	速度处理器	(381)
6.3.5	加速度处理器	(384)
第七章	潜艇无线电通信	(393)
7.1	电传机及数据链路所需要的带宽	(393)
7.2	在海水中的衰减及天线增益	(401)
7.3	信号在海水中的失真	(404)
7.4	作为深度函数的最佳带宽	(415)
7.5	典型电路	(419)
7.6	各种系统的比较	(424)
7.7	本地和远处噪声	(435)
7.8	潜艇的辐射	(439)
	参考文献	(451)

第一章 绪 论

1.1 正弦波在无线电传输中的起源

正弦波在无线电通信中的应用已变得如此广泛，以致于使大多数人很难觉察到这个事实：它并非一向如此。H·赫兹（1893年）在其实验中运用火花放电产生了电磁波。这种波我们今天称之为有色噪声。在赫兹这一实验后的二十年间，碳电极之间的电弧以及火花隙放电便是当时产生电波的主要方法，无线电信号就由所迸发出来的或长或短的有色噪声组成。旋转式高频发生器和电子管的研制成功才最终导致了正弦电流及正弦电波的产生。

需要在几部发射机同时工作的情况下有选择地接收其信号是促使正弦波得到广泛应用的强大动力。麦克斯韦¹（1891年）早已研究过由线圈和电容器组成的电路的一种现象，这种现象我们现在称之为谐振。许多人曾致力于这种现象的理论和实现方法的研究，但是，将线圈和电容器组成的谐振式滤波器用来有选择地接收无线电信号的成果通常归功于马可尼，这一点其专利²（Marconi, 1901, 1904）就足以证明。是否只有正弦

1. 第779段，“电容器的静电电容和线圈的电磁自感的组合。”

2. 专利（763, 772）中采用了“调谐”这一术语并介绍如何适当选择电感和电容来实现对发射机和接收机的调谐。七个月后又申请另一专利（676, 332），其中运用了“谐振”这一术语来描述我们现在称之为LC并联回路的谐振现象。这种用于有选择地进行无线电传输的谐振的专利权问题在争论纷纭的早期无线电发展史上曾经是一个最有争议的问题之一。

波才具有谐振现象呢？显然，还没有什么人曾认真地提出过这一问题。因此，传统的发射机和接收机的研制都是以正弦波为基础的。电波频段的管理来源于实践，这就导致了对各种无线电设备的频段分配。然而，1920年出版的一本教科书上的一段话表明，非正弦波在当时还是得到了应用，而且已被充分地理解¹，书中（Edelman, 1920, P.187）说：“比较先进的无线电通信方法均采用由电弧、猝熄火花或直接高频发生器产生的连续〔正弦〕波。这些方法很可能会导致极为完善的无线电系统，因而值得在理论和实验上加以考虑”。

让我们来讨论谐振现象的数学基础。齐次微分方程

$$(d^2v/dt^2) + \omega_0^2 v = 0 \quad (1)$$

的通解为

$$v(t) = V_1 \sin \omega_0 t + V_2 \cos \omega_0 t \quad (2)$$

用力函数（force function） $\omega_0^2 v_f(t)$ 代换方程（1）右面的零，得

$$(d^2v/dt^2) + \omega_0^2 v = \omega_0^2 v_f(t) \quad (3)$$

该非齐次方程的通解由式（2）给出的齐次方程的通解加上非齐次方程的一个特解组成。寻求这一特解的系统的方法是采用系数变换法或拉氏变换法。然而，在简单情况下，我们往往猜测一个特解来简化求解过程。

令 $v_f(t)$ 为正弦函数：

$$v_f(t) = V \sin \omega t \quad (4)$$

我们猜出式（3）的一个特解具有以下形式

$$v_p(t) = V_0 \sin \omega t \quad (5)$$

1. 第22页的图22画出了一种用于电报的非正弦载波，这种典型的载波在早期无线电传输中曾被火花式发射机所采用。

2. 设 t 采用时间单位， ω_0 以时间的倒数为单位， v 采用电压单位，运用 $\omega_0^2 v_f(t)$ 而不是 $v_f(t)$ 就能保证 $v_f(t)$ 具有电压单位。

在式(3)中, 用 $v_p(t)$ 代换 v , 用式(4)的力函数代换 $v_f(t)$, 就得到 V_0 :

$$V_0 = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} V,$$

$$v_p(t) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} V \sin \omega t \quad (6)$$

显然, 我们猜出的这一特解除了 $\omega = \omega_0$, 即所谓谐振状态以外, 对所有 ω 值均成立。对于谐振状态, 我们只好去另猜一个解:

$$v_p(t) = V_0 \omega_0 t \cos \omega_0 t + V_1 \omega_0 t \sin \omega_0 t \quad (7)$$

在式(3)中, 用 $v_p(t)$ 代换 v , $V \sin \omega_0 t$ 代换 $v_f(t)$ 就求得 V_0 和 V_1 :

$$V_0 = -\frac{1}{2} V, \quad V_1 = 0 \quad (8)$$

因此, 谐振时的特解为

$$v_p(t) = -\frac{1}{2} V \omega_0 t \cos \omega_0 t \quad (9)$$

现在让我们将谐振的纯数学概念与简单电路的谐振联系起来。图1.1-1是一个由电感 L 、电容 C 和电阻 R 组成的并联谐振电路。流进电路的电流 $i(t)$ 和电路两端的电压 $v(t)$ 之间的关系用下列微分方程表示:

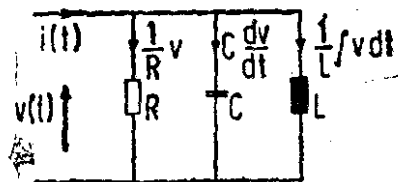


图 1.1-1 正弦函数的并联谐振电路

$$\frac{1}{R}v + \frac{1}{L}\int v dt + C\frac{dv}{dt} = i(t) \quad (10)$$

对上式求导并整理可得

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \frac{1}{RC}\frac{dv}{dt} + \frac{1}{LC}v = \frac{1}{C}\frac{di}{dt} \quad (11)$$

若 R 足够大并满足关系式

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad v_f(t) = \frac{1}{\omega_0^2 C} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

则式(3)等于式(11)。这样，微分方程谐振的数学概念就与电路谐振的概念联系起来了。

我们至今所讨论的都是线性常系数微分方程。这种微分方程所描述的电路只与正弦力函数谐振¹。此外，具有线性时不变元件的集中参数电路总是用线性常系数微分方程来描述的，因而它也只与正弦函数谐振。然而，谐振的数学概念意义更为广泛。特别是，它还适用于变系数线性微分方程。这种方程用来描述具有线性时变元件的集中参数电子电路。线性时变元件就是开关、话筒以及调制器等等²。在无线电通信的前期，优质时变元件尚未出现，因而谐振现象就为正弦函数所独有。随着半导体技术的出现，这种情形发生了根本的改变。开关是目前最受欢迎的电子元件之一，而且它还是一种线性时变元件。

1. 更严格地讲，这类方程所描述的电路只能与函数 $\exp(-st)$ ， $\exp(-st)\sin\omega t$ 以及 $\exp(-st)\cos\omega t$ 谐振，其中 s 是非负实数。

2. 许多教科书都将幅度调制器和频率调制器称为非线性器件，并进而讨论其在语言和音乐传输上的应用。产生这种共同错误的原因有两个：第一，没有明确线性时变与非线性的区别。第二，忽视了具有非线性元件的电路在其输入和输出之间存在着线性关系。例如，由四个平方律检波器组成的环形调制器将两个输入电压 u 和 v 转换成输出电压 $(u+v)^2 - (u-v)^2 = 4uv$ 。非线性项 u^2 和 v^2 互相抵消，只余下线性二次项 uv 。

下面我们来研究几个具有线性时变元件的集中参数电路，这些电路将与非正弦函数谐振。

1.2 集中参数的时变谐振电路

为了引出非正弦函数的谐振电路，我们首先要重新设计图1.1—1中的并联谐振电路，以便于用运算放大器来实现。为此，我们对方程(1.1—11)进行两次积分

$$v + \int \frac{1}{RC} v dt + \frac{1}{LC} \iint v dt' dt = -\frac{1}{C} \int i dt \quad (1)$$

整理后得

$$v = -\frac{1}{RC} \int v dt - \frac{1}{LC} \iint v dt' dt + \frac{1}{C} \int i dt \quad (2)$$

现在我们考虑图1.2—1中的电路。电压 $v(t)=v$ 被加到左上方由运算放大器 A_1 、电阻 R_1 和电容 C_1 组成的积分器¹上。于是产生一个积分电压 $-(1/R_1 C_1) \int v dt$ 。该电压被 A_2 、 R_2 和 C_2 再次积分，得到电压 $+(1/R_1 C_1 R_2 C_2) \iint v dt' dt$ 。同时，右下方的电流 $i(t)$ 被放大器 A_4 以及电容 C 积分，形成电压 $-(1/C) \int i dt$ 。这三个电压在适当的符号下相加就得到

$$-\frac{1}{R_1 C_1} \int v dt - \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} \iint v dt' dt + \frac{1}{C} \int i dt$$

若选择

$$R_1 C_1 = RC, \quad R_1 C_1 R_2 C_2 = LC \quad (3)$$

1. 假设读者已熟悉用运算放大器来组成积分、加法及微分电路。在这一方面Graeme等曾于1971年写了一本很好的教科书。

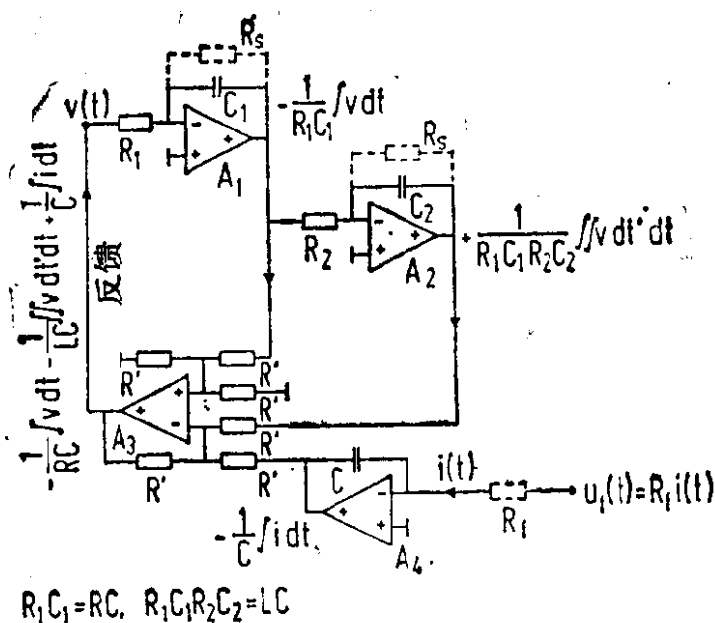


图 1.2-1 用运算放大器、电阻和电容来实现图1.1-1中的并联谐振电路

就得到式(2)右边的结果。既然式(2)的右边等于左边的电压 $v=v(t)$ ，我们就可以将图1.2—1中的反馈环路闭合起来。因此，图1.2—1就是实现式(2)的一个实际电路¹。

图1.1—1和图1.2—1的电路将与“周期性的”正弦函数或与有足够多个周期的函数谐振。象第一次对这类谐振电路归纳一样，我们先讨论一个能与正弦或余弦脉冲谐振的电路，这些脉冲具有 $i=1, 2, \dots$ 个周期，且在区间 $-T/2 \leq t \leq +T/2$ 外为零。前几个脉冲示于图1.2—2中，同时还有一个矩形脉冲。这些脉冲就是用来表示有限区间内的傅氏级数的函数。它们由下式来定义

$$(d^2v/dt^2) + \omega^2 v = 0, \quad -T/2 \leq t \leq +T/2 \quad (4)$$

1. 用虚线表示的电阻用来防止运算放大器在漂移时发生饱和。由于我们只对原理感兴趣，所以对在运算放大器实际电路中采用的许多技术上的改进措施在此不再作深入的讨论。