

# 雷达系统模拟

〔美〕 R. L. 米切尔 著

陈训达 译

吴朔平 校

科学出版社

1982

## 内 容 简 介

本书是雷达模拟技术领域的第一本专著。作者在书中系统地介绍了使用数字计算机对雷达信号进行逼真模拟的方法。全书内容包括五个部分：第一至二章是概述及基础知识；第三至五章介绍如何建立雷达信号及接收机响应模型；第六至九章介绍如何用数字计算机进行高效率的模拟；第十至十一章是地面雷达和机载雷达的举例；第十二章介绍实时模拟的问题。

本书以雷达信号理论和随机过程为理论基础，广泛采用了傅里叶变换、卷积和相关运算，并着重介绍了这些运算的快速算法。书中还提出了矩形网格法，这是描述雷达环境的必不可少的有效方法。

本书题材新颖，概念清楚，重点突出，简明扼要，并附有实例。

本书可作高等院校雷达专业高年级学生或研究生选修课教材，亦可供从事雷达系统研究、设计、教学、生产、试验等方面的人员参考。

Richard L. Mitchell

RADAR SIGNAL SIMULATION

Artech House, INC. 1976

雷 达 系 统 模 拟

〔美〕R. L. 米切尔 著

陈训达 译

吴朔平 校

责任编辑 张建荣 唐友群

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1982 年 7 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1982 年 7 月第一次印刷 印张：10 5/8

印数：0001—3,500 字数：240,000

统一书号：15031·408

本社书号：2601·15—7

定 价： 1.65 元

## 译 者 的 话

雷达系统模拟是数字模拟技术与雷达技术相结合的产物。简而言之,就是用计算机软件来建立雷达系统的模型,然后在数字计算机上复现雷达系统的动态工作过程。具体地说,模拟的对象是雷达系统,包括雷达本身(硬件及软件)、雷达目标及目标环境;模拟的手段是数字计算机,包括软件及硬件;模拟的方式是复现蕴含雷达目标及目标环境信息的雷达信号。这里所讲的“复现”就是重现雷达信号的产生、传递、处理等动态过程,从时间关系上看,就是重现一个随机的时间序列。

由于雷达功能的日益多样化和复杂化,使得在设计和分析雷达系统中不得不考虑大量的非线性因素和随机因素。这时,采用数字模拟方法有很多的优点。最主要的优点就是经济、灵活。用软件建立模型可以大量节省人力和物力,因而经济性是显而易见的。灵活性主要表现为数字模型的可控性。用软件建立模型,其模型参数可任意给定,几乎不受什么条件限制。(如用实物或实物模型,则往往要受技术条件、物质条件以及环境条件等因素的限制)根据数字模拟的可控性特点,所建立的各种统计模型,可以在时间上进行任意次的重复,并能保持其统计特性的严格一致。而且,数字模型的各项参数可以一个单独地变化,也可以若干个参数按照需要而任意组合地进行变化。这些特点对于研究整个系统的统计特性,以及研究各个参数对整个系统统计特性的贡献是十分重要的。

鉴于上述的优点,雷达系统模拟确实是雷达系统设计和

分析的有效方法。目前,如果说没有计算机的雷达已经是过时雷达的话,那么不使用计算机的雷达设计和分析的方法,也是陈旧的方法。当然,还必须进一步指出,“使用计算机”决不是仅仅把计算机作为一种解算工具,还应该把它作为一种建立模型的手段。不然的话,仍然是一种陈旧的概念。

雷达模拟技术也存在一般数字模拟所共有的弱点,这就是模拟的逼真性问题,即模型和模拟结果的可信度问题。模拟的逼真性与经济性是一对相互制约的矛盾。这种相互制约推动着雷达模拟技术的不断发展。雷达模拟技术的基本研究课题,就是寻求既逼真又经济的雷达模拟方法。

雷达系统模拟是一门新技术。R. L. 米切尔所著的这本书是这个领域的第一本专著。本书曾经作为美国和西欧一些国家举办雷达模拟技术专题讲座的教材,颇受欢迎。译者希望通过本书的翻译出版,对我国的雷达模拟技术的研究工作有所裨益。

本书的书名未照原文直译,为的是强调系统概念,避免把信息模拟误解为目标模拟器。事实上,作者 R. L. 米切尔本人亦经常采用“Radar System Simulation”的提法。

本书大部分译稿经吴朔平同志校阅,其中部分译稿还请张履谦同志校阅过,在此一并致谢。

由于译者水平有限,不妥之处望读者予以指正。

## 前 言

本书论述的重点是关于雷达信号的模拟方法问题,该方法能逼真地复现雷达系统各个不同点上的雷达信号。这个课题极为重要,因为它直接影响模拟的质量。然而,在以往的雷达系统模拟中,却很少对雷达信号作高保真度的处理,之所以如此,主要在于该问题的复杂性。直接按数学式子进行模拟,不是达不到精度要求,就是实现起来成本太高,办不到。作者的意图就是要对雷达信号模拟提供一种系统化的方法。这种方法使模拟精度和计算效率两者的要求都能得到满足。

全书几乎毫无例外地仅讨论数字计算机模拟技术。由多个起伏目标和非均匀杂波所组成的雷达环境,对于非数字式的模拟来说,实在是太复杂了。而现代的数字计算机使用方便,运算迅速,费用低廉,因此在雷达模拟中使用数字计算机,的确是很经济实惠的。

数字技术需要一种不使用任何非数字式设备的数据结构。例如,在雷达数字模拟中,有些地方为了描述雷达环境,几乎是不可避免地需要采用一种矩形网格。如果不用这种矩形网格,那么对于大多数基本的模拟运算来说,其程序编排就很繁杂,运算效率就很低。因此,本书对于这样一些数据结构给予了足够的重视。

在雷达信号模拟中,计算时间同样也是极为重要的。编排拙劣的模拟和编排精巧的模拟,其运算时间可相差若干个数量级。正是由于这个原因,本书着重介绍了快速算法。当然这些算法还必须满足精度要求。此外,书中还给出了大部

分通用库函数的快速算法。

在本书中,信号理论和随机过程居重要地位,此外还包含了研究生班的某些教材。读者将会发现,书中广泛地采用了傅里叶变换以及诸如卷积和相关这样一类的运算。正如大多数电气工程师所理解的那样,无论对信号进行何种处理,这些运算都是必不可少的。当然,由于书中给出的是这些运算的具体算法,因此可以跳过那些涉及理论推导的部分,而把注意力集中于这些算法的应用。

信号处理往往只是雷达系统模拟中若干基本环节中的一个。不过,除此之外,剩下的数据处理环节和控制环节通常都比较容易模拟。因为一般说来,那只是将实际系统中所发生的数据流加以复现而已。虽然这种做法广为采用,但本书没有必要作详尽的论述。

本书所介绍的一些方法开始在刊物上发表时,正值作者在技术服务公司所举办的雷达模拟技术讲座上讲授这一课程。作者感谢彼得·斯威尔林(Peter Swerling)博士提供了讲课的机会。作者还感谢许多同事,尤其是C. R. 斯通(Stone)。他的数学见识和对计算机的理解有独到之处。同样,作者对J. F. 沃克(Walker)表示致谢,他为本书提供了许多积极的见解,并校阅了本书部分原稿。他还和G. E. 波龙(Pollon)博士承担了第十二章的编写工作。他们所作的贡献肯定会受到读者的赞赏。最后,作者认为,读者不会不注意到A. W. 里海捷克(Rihachek)博士对本书的重要影响。尽管他事先并没有预料到,但是他对高分辨雷达所采用的一整套的分析方法,都可以直接推广到雷达信号模拟中来。里海捷克博士还为本书提供了许多宝贵的意见,在此一并致谢。

R. L. 米切尔

# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 译者的话.....               | i   |
| 前言.....                 | iii |
| 绪论.....                 | 1   |
| 第一章 雷达模拟的要求.....        | 6   |
| 1.1 雷达系统的功能 .....       | 6   |
| 1.2 影响模拟的因素 .....       | 8   |
| 1.3 模拟方法 .....          | 13  |
| 第二章 两种雷达模拟方法.....       | 15  |
| 2.1 功能模拟 .....          | 15  |
| 2.2 相干视频信号模拟 .....      | 20  |
| 2.3 根据恒定多卜勒理论进行简化 ..... | 23  |
| 2.4 简化成立的条件 .....       | 24  |
| 第三章 雷达环境模型.....         | 27  |
| 3.1 散射模型的分类 .....       | 28  |
| 3.2 点目标 .....           | 31  |
| 3.3 延伸目标 .....          | 40  |
| 3.4 地面杂波 .....          | 46  |
| 3.5 海面杂波 .....          | 49  |
| 3.6 体杂波 .....           | 50  |
| 3.7 其它类型的杂波 .....       | 52  |
| 3.8 蓄意干扰和射频干扰 .....     | 53  |
| 3.9 其它的环境效应 .....       | 54  |
| 3.10 模型的选择 .....        | 55  |
| 第四章 信号、滤波器和噪声 .....     | 61  |
| 4.1 实信号 .....           | 61  |

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 4.2 | 复信号 .....               | 62  |
| 4.3 | 窄带信号 .....              | 65  |
| 4.4 | 滤波器和卷积 .....            | 66  |
| 4.5 | 能量 .....                | 67  |
| 4.6 | 匹配滤波器和相关 .....          | 69  |
| 4.7 | 随机噪声 .....              | 71  |
| 4.8 | 随机噪声的过滤 .....           | 73  |
| 第五章 | 接收信号和接收机响应 .....        | 76  |
| 5.1 | 接收信号 .....              | 76  |
| 5.2 | 线性接收机响应 .....           | 80  |
| 5.3 | 模糊函数 .....              | 83  |
| 5.4 | 五种类型的雷达波形 .....         | 86  |
| 5.5 | 非线性处理 .....             | 101 |
| 5.6 | 噪声以及接收机对噪声的响应 .....     | 103 |
| 第六章 | 映象法 .....               | 106 |
| 6.1 | 矩形网格 .....              | 106 |
| 6.2 | 矩形网格维数的扩展——增加角度维 .....  | 112 |
| 6.3 | 向网格作映象 .....            | 114 |
| 6.4 | 采样间隔 .....              | 117 |
| 6.5 | 地面雷达的目标坐标转换 .....       | 123 |
| 6.6 | 地面雷达的地面杂波坐标转换 .....     | 124 |
| 6.7 | 机载雷达的目标坐标转换 .....       | 128 |
| 6.8 | 机载雷达的地面杂波坐标转换 .....     | 130 |
| 6.9 | 坐标变换的快速算法 .....         | 135 |
| 第七章 | 采样信号 .....              | 140 |
| 7.1 | 时域采样 .....              | 140 |
| 7.2 | 频域采样 .....              | 147 |
| 7.3 | 时域和频域双重采样 .....         | 149 |
| 7.4 | 简化表示法 .....             | 155 |
| 7.5 | 离散傅里叶变换的直接变换和快速变换 ..... | 158 |

|      |                      |     |
|------|----------------------|-----|
| 7.6  | 滤波及卷积 .....          | 159 |
| 7.7  | 求卷积的方法 .....         | 162 |
| 7.8  | 采样率 .....            | 165 |
| 7.9  | 实信号采样 .....          | 174 |
| 第八章  | 随机序列的产生 .....        | 177 |
| 8.1  | 采样过程 .....           | 177 |
| 8.2  | 频谱的采样独立性 .....       | 180 |
| 8.3  | 产生随机序列的一般方法 .....    | 181 |
| 8.4  | 以高斯型频谱为基础的快速算法 ..... | 186 |
| 8.5  | 用内插法降低采样频率 .....     | 197 |
| 第九章  | 随机数及库函数的产生 .....     | 203 |
| 9.1  | 产生随机数的经典方法 .....     | 203 |
| 9.2  | 产生随机数的快速算法 .....     | 207 |
| 9.3  | 计算库函数的快速算法 .....     | 214 |
| 第十章  | 地面雷达举例 .....         | 224 |
| 10.1 | 问题的阐述 .....          | 224 |
| 10.2 | 杂波和目标的雷达截面积 .....    | 228 |
| 10.3 | 相干视频信号的产生 .....      | 233 |
| 10.4 | 接收机信号处理 .....        | 242 |
| 10.5 | 检测结果的记录 .....        | 248 |
| 第十一章 | 机载雷达举例 .....         | 251 |
| 11.1 | 杂波模型 .....           | 251 |
| 11.2 | 网格单元的结构 .....        | 253 |
| 11.3 | 映象法 .....            | 259 |
| 11.4 | 高度回波 .....           | 263 |
| 11.5 | 点杂波 .....            | 266 |
| 11.6 | 信号处理 .....           | 267 |
| 第十二章 | 实时雷达信号模拟 .....       | 276 |
| 12.1 | 实时信号模拟的组成部分 .....    | 278 |
| 12.2 | 雷达与雷达环境的关系 .....     | 283 |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 12.3  | 数据处理与计算 .....   | 287 |
| 12.4  | 模拟模型 .....      | 292 |
| 12.5  | 数据库的产生 .....    | 296 |
| 12.6  | 小型计算机预处理器 ..... | 299 |
| 12.7  | 目标信号的计算 .....   | 300 |
| 12.8  | 分布杂波的产生 .....   | 307 |
| 12.9  | 输出波形产生器 .....   | 315 |
| 12.10 | 一个例子 .....      | 317 |

## 绪 论

雷达模拟法日益获得推广,其原因是多方面的,重要原因之一,就是现代雷达系统日益变得复杂,难以用简单直观的分析方法进行处理。雷达工程师对雷达系统输出信息的最后一个分贝的潜力都不放过,而传统的分析方法往往满足不了这样的精度要求。同时,还因为计算机的容量越来越大,运算速度越来越快,费用越来越低,而且使用越来越方便。不过,雷达模拟法的推广,其根本原因是经济。为在复杂环境下工作而设计的现代化雷达,假若只为看看它是否按预想的那样工作,就造一个试试,那是造不起的。即使有雷达设备可供试验,其运行费用也远远超过用计算机模拟所需的费用。对于机载雷达或航天雷达尤其如此。

模拟方法的推广还有其它一些原因。方便,显然是其原因之一,因为模拟试验的结果可以取自最近的计算机中心。如果雷达工作在遥远地区或在恶劣气象环境中,则模拟方法几乎是必不可少的。模拟方法的一个关键性的优点就是灵活性。改变参数有时需要对具体设备作广泛的改动,而这在模拟方法中,一般都很容易办到。此外,用模拟方法可以对试验的全过程实施控制,相比之下,假若使用具体设备进行试验,则只能对试验的极少部分实施控制。

模拟方法也是雷达工程师解决各种各样问题的有效工具之一。最基本的是常规分析方法。例如,假设有一单独的点目标,它的特性只用一个参数——雷达截面积来表示。假若给出了雷达距离方程中的其它参数,我们就可以很容易地计

算出所接收到的目标反射信号的功率。诸如热噪声和地面杂波这样一类其它因素的影响，在分析中也可以考虑在内。假设有一块均匀的地面，则地面杂波也可以用一个数值——后向散射系数来表示。若要计算分辨单元中杂波的雷达截面积，只需要知道分辨单元所截取的地面面积就可以了。到目前为止，这还不是一个很值得关心的问题，但却是便于分析的问题中的一个典型例子。我们可以假设目标的雷达截面积按照某种统计分布规律起伏，杂波可能按另一种分布规律起伏，从而使得分析更加逼真。现在我们可以用雷达距离方程来计算目标和杂波的平均雷达截面积，我们还可以计算各种信杂比和信号干扰比。运用现有的曲线族，也可以预先估计雷达系统将如何完成某些功能。

上述的分析方法在设计雷达中经常用到，因为可以得到参数的解。这样，只要一看，就可确定哪些是重要参数，而且很容易得到特解。但这些解的实际使用价值很有限。有许多雷达问题难以用解析法处理。例如，当存在多目标时，如何用解析法确定跟踪雷达的性能？再如，假设地面杂波不均匀，或者接收机中信号处理不是线性的呢？在某些情况下，我们也许可以写出描述上述各种效应的复杂的积分方程。然而，在一般情况下，只有这些方程还不足以为雷达工程师提供任何有价值的东西。虽然在分析过程中，也许要用计算机作些计算，但这还不是我们所说的模拟。

在某种意义上，假若我们知道雷达的统计特性，就可以直接模拟雷达的输出。即使必须求解复杂的方程，我们也可以常规的解析方法来描述雷达输出信号的特性，然后再在计算机里用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法产生特定的响应。在第二章，我们将仔细研究这种雷达功能的模拟方法。

我们也可以不必推导雷达输出的解析解，而设法用计算

机复现在雷达系统中流通的信号。在这类模拟中,可以使目标按真实轨道飞行,而且可以给定各种各样的非均匀杂波特性。采用常规的解析方法时,为便于解决问题,通常必须作一些简化假设。但是,对流通的信号进行模拟则与此不同,我们可以对各种效应采用非常复杂的描述,因为最终信号的综合是以计算机求解的方式进行的。用这种方法,我们可以复现实际的信号,而且求解时,不必附加一般限制。本书将主要介绍这种方法。

在信号模拟中,我们采用一组散射体来描述所给定的散射现象,而不采用某些复杂的函数表达式。事实上,这种方法能够解决各种各样的雷达问题,不受什么限制。而且,我们也可以将许许多多的环节组合在一起,其数量也没有限制。我们可以一直增加散射体的数目,使模拟越来越真实。然而,实际上还是存在限制,这主要与费用有关。因此,即使在实际模拟中,或许只有  $10^6$  或  $10^9$  个散射体,我们也不可能对每个散射体都分别进行模拟。在模拟中,我们不仅必须根据雷达环境模型,而且还必须根据具体进行模拟时所使用的计算方法来进行选择。编写本书的主要目的,是想根据一定的预算指标,来获得最佳的模拟结果。虽然,几乎任何实现模拟的方法都行得通,但我们将主要集中研究那些能更有效地使用计算机的方法。假若不考虑模拟的费用问题,就没有必要编写雷达模拟的书了。

本书将介绍模拟雷达信号的一般方法。但这并不是说,要产生一种对所有各种应用都适合的单一模拟程序。我们将看到,影响模拟的因素很多,由于我们力求模拟的费用最少,所以我们主张对具体应用确定具体方法。这样,将使我们得到许许多多的计算机程序,每一个程序用于解决一个特定的问题。不过,所有这些程序都存在着许多共同的特点。这就是

为什么能够给雷达信号模拟确定一个一般方法的原因。

雷达模拟的核心，是用来描述雷达以外的信号散射和传播情况的模型或模型组。描述各种效应的数学模型很多，有的是从微观量级来描写，有的是从大一些的量级或宏观量级来描写。模拟中允许采用所有各种模型，虽然我们会立即发现，为了避免不必要的浪费，必须对其加以选择。在第三章，我们将介绍模拟中一些重要散射模型的一般特性。对雷达工程师来说，问题在于针对具体的应用选择适当的模型。必须在模型的精细程度和模拟的费用之间进行权衡，而且所作的选择必须与模拟目的恰当地配合起来。

为了模拟雷达所接收的信号，我们要把从雷达环境中各个不同点上散射来的信号进行叠加。进行这种叠加时，必须规定好各个信号分量的相位。这便促使我们采用相位矢量来描述信号，并在模拟中采用复数算术对它们进行处理。在第四章，我们将扼要地介绍，用以描述和处理雷达信号的经典的数学运算方法。我们所使用的基本方法有两种——傅里叶变换和卷积。这两种运算是模拟雷达信号的基础，每个研究雷达模拟问题的人，都应该熟悉这些运算的特点。

在第五章，我们推导了接收机对散射集合体的响应，并介绍了对各种类型的波形如何进行简化。但是，在第五章中所推导出来的解，对于用数字计算机进行模拟，并不很适合。在第六章，我们定义了矩形网格法，从而能更有效地使用数字计算机的内部结构。我们还推导了各种映象法。这些方法在模拟中实现起来比较经济。采用矩形网格，将产生一定的采样误差。这些误差的大小，取决于我们愿意付出费用的多少。因此，在第六章中，着重讨论了如何确定最大允许误差。用数字计算机求解，则所有信号都必须进行采样。在第七章，我们推导了采样信号的特性，并介绍了对这些采样信号可能进行的

各种运算,还继续讨论了采样误差。

大多数的雷达信号模拟,都是以某种形式的随机过程为基础的,杂波更是如此。在第八章,我们研究了产生具有特定统计特性的随机序列的各种方法。第九章说明了如何产生随机数,并给出了能够很快在数字计算机上产生随机数的算法。正如第九章所介绍的那样,这些算法可以推广应用到普通的库函数中去。

在第十章中,我们把前面各章所提供的一些方法,用于对一部具体的地面雷达进行模拟。在第十一章,则用于模拟一部机载雷达。第十二章讨论了雷达信号实时模拟的一般方法。

本书主要研究相干视频信号的模拟和处理。这些信号通常包括,在检波级之前通过雷达系统所有各点的雷达信号。为什么不在检波后的信号处理上多费点笔墨呢? 原因有两个:第一,在这个问题上进行革新的余地不大,我们所能做的,无非是模仿实际雷达中已被采用了的处理算法而已;第二,这个问题在一些文献资料中都已广为包括了。

# 第一章 雷达模拟的要求

雷达模拟课题涉及的范围很广。雷达系统种类很多,用途也很广。雷达可以设在地面,可以装在船上,也可以载在飞机上或航天飞行器上。雷达系统的功能有几种,从简单地发现目标到对目标进行识别,各不相同。模拟的目的也不一样,从检验一种算法到评定整个雷达系统的性能。也许还要求实时计算。为了满足这各种各样的要求,可以有各种方法建立雷达模拟。有的方法比较精确,有的方法速度比较快,而有的方法实现起来费用比较高。一般说来,没有单一的模拟程序能够对所有各种情况都适用。一种模拟程序对某一种应用适合,对另一种应用也许就根本不适合。当进行雷达模拟时,所有这些因子都必须考虑在内。否则,模拟所得的结果,其实用价值就很小。

在我们花时间研究模拟雷达信号所采用的技术之前,有必要明确模拟的要求。我们从雷达系统的功能开始讨论,这些可能是影响模拟方法的最重要的因素。

## 1.1 雷达系统的功能

雷达的许许多多用途一般可以根据其功能进行分类。雷达的基本功能是检测——通常是在有干扰信号的情况下,发现感兴趣的目标。某些干扰信号看起来象目标,假若把它当作目标来发现,这便称之为虚警。雷达除了发现目标之外,还

可以在一个或若干个雷达坐标上,粗略地确定目标位置,通常把这也看作是检测功能的一部分。搜索和警戒同样是用来称呼检测功能的术语。

雷达可以通过对运动目标进行重复测量的方法,沿目标轨道对目标进行跟踪。对目标的测量可以外推到未来位置,以估计拦截点或落点,也可以向后外推,以估计发射点。只有被发现了的目标才进行跟踪。有些雷达处理机,在跟踪之前还采取验证步骤,以鉴别是目标还是虚警,或是用以防止对同一现象的多次重复探测作过多的处理。

从雷达信号中,可以提取大量的信息。经过处理,不仅可以取得轨道信息,还可以取得目标大小、形状、取向、自转速率、进动等等数据。这些统称为参数估计。

并非对所有可能的目标都一样感兴趣。有的目标比别的目标威胁性大(例如,看它是一个武器还是一个诱饵?)需要更密切注意。雷达可以采用鉴别的方法,根据信号特征或目标位置、运动或者目标的轨道来区分两个目标群。假若要挑选的目标群有若干个,这就变为分类问题。单独地指出某一个目标所采用的术语是辨别或识别。

最后,雷达可以用于测绘分布目标,诸如地面、云雨、箔条干扰物或大型刚体目标等。这时,雷达的功能就是测绘。一旦我们获得了测绘图,就可以采用自动的或人工的数据处理方法,来确定目标位置或目标特征,估计目标参数,并且对目标进行鉴别、分类或识别。

大多数雷达系统都兼备若干种功能。例如,跟踪目标必须首先发现目标,并且通常还要验证它确实是目标。这一点在模拟中很重要,因为各种功能相互作用。对每种功能分别进行模拟所得到的结果,和对整个系统功能进行整体模拟所得到的结果,不会是一样的。

• 7 •