

# 检测、估计和调制理论

卷 I 检测、估计和线性调制理论

国防工业出版社

范特里斯 著 毛士艺 周荫清 张其善 译

## 内 容 简 介

迄今为止，本书仍然是公认的关于检测，参数估计和线性与非线性调制波形估计方面的一本论述详尽、深入、成功的著作。也是一本较好的研究生教材。中心是研究发生在通信、雷达和声纳中被噪声污染了的各种线性与非线性调制，随机与非随机波形的最佳处理的数学方法和物理结构，各种系统可能达到的性能极限和影响它的各种因素。

本书是为工程师和应用科学家构造新系统而写的。第I卷是检测、估计和调制理论的基本内容。全书包括导论、经典检测和估计理论、随机过程的描述、信号检测与信号参数估计、连续波估计、线性估计和讨论等七章。每章附有相当数量的扩大内容范围的习题。

本书对象是从事通信、雷达、声纳、信息理论与信息处理等方面的工程技术人员、研究生和高等院校教师。

DETECTION, ESTIMATION, AND  
MODULATION THEORY  
Part I Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory  
Harry L. Van Trees  
John Wiley and Sons, Inc. 1968

### 检测、估计和调制理论

#### 卷 I 检测、估计和线性调制理论

〔美〕 H. L. 范特里斯 著

毛士艺 周荫清 张其善 译

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168<sup>1/32</sup> 印张24<sup>5/8</sup> 627千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷 印数：0,001—3,700册

统一书号：15034·2493 定价：3.00元

## 中译本序

美国麻省理工学院教授H.L.范特里斯所写“检测、估计与调制理论”一书(全书分为三册出版)是一部享有世界声誉的、相当成功的重要著作。它是作者多年来为研究生开设的课程,多次修改充实的讲稿;又是作者及其同事们在这一领域研究成果的反映。

检测与估计的统计理论是当代信息科学的一个重要组成部分,是一门工程学科。它是概率论、数理统计、系统理论和通信工程(广义的通信工程包括雷达、声纳等信息传输和处理系统)相结合的边缘学科,具有很强的生命力。从四十年代初期第二次世界大战中发展起来以后,进展很快,几乎每经历十年就有一次新的重要突破,就有一系列的重要著作出现。

整个四十年代是这一理论的初创和奠基性时期,苏联科学家柯尔莫哥洛夫和美国科学家维纳等人作出了杰出的贡献。在五十年代,对维纳理论的研究和发展取得了不少成果并已把它推广到非平稳以及时变的条件下。拉斯匹配滤波器理论在雷达和通信系统中也得到了广泛的应用。到五十年代末就出现了好几本总结性的重要著作。表征着理论发展第一阶段的成熟。

另一方面,到了五十年代后期,随着各个领域科学技术的发展,特别是空间技术和数字计算机技术的发展,第一阶段的检测和估计理论无论在理论本身的局限性以及在实际应用方面都暴露了许多弱点(这也是工程科学发展的一般规律:从工程实践总结提高到理论,理论又去指导实践,实践提出的新问题又促进理论的向前发展)。维纳的滤波理论满足不了空间技术所要求的实时精密跟踪、测量与控制。在雷达和声纳技术中普遍应用检测和估

计理论也由于实际工程中噪声概率分布的多样性和特殊性而遇到了困难。

于是人们开始探索新的理论和技术途径。六十年代初就有了突破，出现了卡尔曼-布西滤波理论。他们将状态变量法引入到滤波理论中来，用信号和噪声的状态空间模型代替了协方差函数，用时域的微分方程来表示滤波问题，得到了递推滤波算法。它突破了平稳过程的限制，更没有无限时间的要求。它的一个明显优点是得到了一个可以用计算机求解的非线性微分方程（黎卡蒂方程），适于做实时处理。理论的这一突破很快就成功地应用于卫星轨道测量、导弹制导和自动化等许多领域。整个六十年代主要向应用方面发展。

范特里斯的著作产生于六十年代末，从时代背景和它的主要内容来看，人们确实可以把它看成是检测与估计理论（调制理论实质上是连续波形估计理论）领域的又一次成功的总结性的贡献。

这次译成中文的是全书的第 I 部分（第 I 卷），也是全书的基础。由于它的基础性的特点以及作者在材料安排上的很强的逻辑性，清楚易懂的叙述方式以及大量的例题和习题，都使它特别适合于作为研究生的教材，也可作为大学高年级优秀学生和在职的有志于在这一领域深造的科研人员和工程师们的自学材料。

我建议对初学者来说，认真读一下第一章是很有益处的。在导论里可以看到作者是如何精心地安排材料，使读者很快就能看到检测与估计理论这一领域的全貌，从而引起兴趣。作者由浅入深地，清楚地描述了这一领域的一层一层的许多问题以及处理问题的方法。这种启发性和逻辑性的安排是引人入胜的，这是本书的一个显著特点，并贯彻在本书的全过程。这就使这卷书虽然出版至今已经十多年，国外许多大学仍用它作为研究生教材。

在第二章，作者从经典的贝叶斯以及奈曼-皮尔逊的观点出发，介绍了判决理论的一些基本方面。在讨论各种估计准则时，就把这些基本思想推广到估计问题，并且也论述了这些准则可以

应用的条件。这一章的最后讨论了多参数估计和高斯噪声条件下的一些特殊结果。

第三章叙述了随机过程的表示方法。这是为讨论信号检测、参数估计和连续波形估计问题做数学准备的。开始就介绍卡亨南-洛维展开式和有关的积分方程的性质，随后讨论平稳随机过程的谱表示法，最后讨论了矢量随机过程。这一章是有一定深度的。读者最好应先阅读戴温波特和罗特合写的一本名著“随机信号与噪声理论导论”。第二章和第三章是全书的基础。

第四章开始介绍信号检测与参数估计问题。讨论从噪声信道中的通信问题为例子展开，包括已知参数的信号和未知参数的信号在白高斯噪声和非白高斯噪声中的检测和估计问题，由浅入深，叙述清楚。

第五章简明地叙述了连续波形的估计问题(调制理论)，反映了作者当时在这一领域的一些最新研究成果，是一种无论对线性调制和非线性调制均有价值的最大后验概率估计法。

第六章详细地讨论了线性最小方差估计法，总结了维纳和卡尔曼两类方法。前者是用线性系统中的冲激响应和系统函数表示法(频域方法)得出著名的维纳-何甫积分方程和它的解；后者是用微分方程状态空间方法(时域方法)得到卡尔曼-布西滤波器和黎卡蒂方程。这一章的最后讨论了线性调制信号的最佳解调问题。

作者把连续波形的非线性估计问题(非线性调制)作为一个单独部分放在第Ⅱ卷中，而把随机信号的检测和估计问题作为全书的第Ⅲ卷。

总之，这次译出的第Ⅰ卷是全书的基础。读者可以从中得到许多有益的启示和坚实的理论基础，由此再求深造也就不难了。

此外，译者还改正了原书中的某些疏漏。

陈宗鹭于中国科学院电子学研究所

一九八一年五月

## 中文版序

十五年前, 1967年我曾为检测、估计和调制理论第 I 卷写了序言。此后, 第 I 卷已再版九次并仍然广泛用于全世界各研究生院。在七十年代曾译成俄文。成千上万学生已从第 I 卷, 以及它的两个姊妹篇: 第 II 卷“非线性调制理论”; 第 III 卷“雷达-声纳信号处理和噪声中高斯信号”, 学到了检测、估计和调制理论的一系列基本原理。我非常高兴有机会为中文版写序言。中译本将使本书内容在一大批新的中国学生和教师中得到传播。几年来在美国和我一起进行研究的, 以及在参观北京、上海和广州所遇到的中国学生的聪明、勤奋的工作品德都给我留下了深刻印象。他们的素质对研究本书所涉及的内容是极为合适的。

十五年来, “检测、估计和调制理论”三卷书仍在继续使用有几个原因: 第一是在这个时期中, 在诸如数字通信, 卫星通信, 雷达, 声纳, 地震分析和医学诊断等领域中这一理论的应用在不断增长。第二是数字处理速度和存储量增加了几个数量级。这一增加使许多系统中实现了最佳或接近最佳的实际算法。第三是本书的结构。三卷书中极为详细地研究了所涉及的理论, 因此勤奋的学生能够理解这些结论的前提, 应用和它们的限制。这些方法为将所得结果应用或推广到新的场合奠定了基础。

原序言中的许多建议仍然是有效的。为了获得更好的了解, 我们从不同角度考察许多问题, 读者应当详细讨论不同的方法。最重要的建议是作习题。不作大量习题要理解这些结论是不可能的。

在第 I 卷的序言中〔美国版〕, 我指出了第 II 卷要完成的工作。实际上, 第 II 卷成了关于非线性调制理论的一本扼要的专著, 因

此包括雷达、声纳信号处理和噪声中高斯信号的第Ⅱ卷就显得非常必要了。当我完成第Ⅱ卷的时候，我还有500页计划编写题为“阵处理”的第Ⅳ卷的手稿。在这些材料中我把前三卷的许多结论推广到多维随机过程并指出怎样把这些理论应用到通信、雷达和声纳等领域中的大量阵处理问题。有关自适应天线的几章提供了检测和连续波估计的有意义的综合。但是在1972年5月，我离开了M. I. T, 成为国防通信署的首席科学家, 因而这些材料未曾正式发表。这是值得遗憾的, 因为最佳阵处理的应用, 在卫星通信, 飞机通信, 声纳和雷达系统中已经迅速扩大。它们中的大部分都应用了第Ⅳ卷的结论。

我十分感谢负责第Ⅰ卷译文的北京航空学院毛士艺副教授所起的作用。

*Harry L. Van Trees*  
Harry L. Van Trees

1982年1月于弗吉尼亚州马克林

## 序 言

本书所要研究的检测与估计理论的内容是，将统计推断的经典方法与通信、雷达、声纳和其它现代数据处理系统的随机过程特征加以综合性的阐述。统计推断的两个主要领域是判决理论和估计理论。前一领域，即判决理论，是指观测一个具有随机特性的输出，并判断产生这个输出的两个因素中的哪一个为真。在十八世纪中叶，詹姆斯·贝叶斯〔1〕曾研究过这类问题。关于估计理论，其输出与某一有意义的参数有关，而我们正是试图去估计这个参数值。在十九世纪初，勒让德〔2〕和高斯〔3〕曾经发表过这方面的著作。三十多年前，费什尔〔4〕，奈曼和皮尔逊〔5〕对作为本书基础的经典检测理论作出了重要贡献。在1941和1942年，柯尔莫哥洛夫〔6〕和维纳〔7〕把统计方法应用于解决最佳线性滤波问题。此后，统计方法用于各类系统统合和分析就得到了迅速发展。本书研究的主题是讨论这些方法的应用和所得结论的本质。

本书（第Ⅰ卷）及其续卷“检测、估计和非线性调制理论”（第Ⅱ卷）的内容取材于“检测、估计和调制理论”课程的讲稿。在麻省理工学院，这门课程是为高年级研究生开设的。我对这些内容最初的兴趣是产生于我在模拟调制理论方面的研究活动。研究调制理论的初始文本在1964年曾用作麻省理工学院开设的夏季课程的教材。结果表明，对于现代检测和估计理论有透彻了解的听众来说，就能非常好地理解调制理论的观点。当时，还没有一本合适的教材，能够概括那些有价值的内容以及重点阐明我感到重要的那些论点，于是我开始写讲义。显然，在一个适当的时间里，将这些材料介绍给研究生，就要研究三个课题：检测、估计



和调制理论的统一提法，以及探索联系它们的基本概念。进行的结果，原来打算作为调制理论基础的材料，最后占据了本书的整个内容。有关调制理论的原始材料在第Ⅱ卷的起始几章介绍。从总体说来，这两本书提供了有关检测、估计和调制理论三个课题的一个统一的概念以及它们在许多重要的具体问题中的应用。

近三年来，我又陆续提出了关于本课程内容的修改意见。听众一般由40名至60名学生组成，他们已经学完了有关随机过程的研究生课程，这些内容大部分包括在戴温波特和罗特的著作〔8〕中。总的说来，他们对随机过程理解得比较透彻，并具有相当的能够解决问题的常规运算的实践。此外，他们当中的许多人对于在这个领域或与此密切有关的相邻领域进行研究是有兴趣的。这种兴趣形成了极大的动力，利用这种动力，我要求他们以作习题的方式发展许多重要的概念。本书最初就是打算为这些听众编写的。附录中列出了详细的课程大纲。

另一方面，许多从事系统研究的实际工程师，已经或将要用本书中提出的统计方法来分析或设计各种系统，我力求使本书对他们有所裨益。较早的一个版本曾成功地用作研究工程师的内部课程的教材。

从对专业基础知识的要求来看，本书不需要高深的基础知识。当然，有关基础概率论的知识和随机过程二阶矩的特性应已掌握。熟悉一些矩阵理论和线性代数是有益的，但不一定是必需的。数学的严谨程度不高，不过，本书大多数章节的结论，只要在推导中精心一点就可以得到严格的证明。采取这种方法是为了不致使那些重要的概念与许多细节问题混淆起来，也为使这些内容便于需用这本书的工程技术人员阅读。幸而，几乎在所有的场合我们都能验证答案在直观上是合乎逻辑的。值得注意的是，即使推导是严格的，但仍然需要有直观地检验答案的能力，因为我们根本的目的是获得一个与某一有价值的实际系统相当的答案。容易遇到这样一类物理问题，其数学模型似乎是合理的，经过正

确的数学运算以后,却导致出一个对原来问题的不可实现的答案。

本书有几个适于叙述的特点。总的来说,考察一个问题是相当详细的。为了更好地理解所得结论的含义,总是用几种不同的方法,多次考察同一个问题。同时注意教给学生一些处理问题的方法,以便帮助他们较灵活地探讨新问题。第二个特点,为了使读者透彻地理解本书的内容,做习题是不可缺少的。本课程和本书都强调提高解决问题的能力。每章末尾附有习题,包括的范围从一般运算直到本书内容的一些有意义的扩展。在许多情况下,它们与当时杂志上发表的论文相当。只有作适当数量的习题,才有可能体会出上面结论的重要性和普遍性。对于个别问题的解答,可来函索取。有一本包含有三分之一的习题解答的书可供讲授这门课的教师使用。我们正在不断地拟制与本课程有关的新习题,并且可以把这些习题寄送给应用本书作为教材的任何人。第三个优点是本书中方块图、略图和插图比较丰富。采用这些图表是因为大多数工程师(包括我本人)对这些方式比相应的方程式更为熟悉。

通常遇到的一个问题是要选用许多学科所必需的符号,我们力求以合理的方式选择符号,并尽量使其便于记忆。全部符号都归纳在本书末尾的术语表中。我们力求使参考资料目录尽量完整,并尽可能地承认归属别人的任何概念。

(以下译略。)

H. L. 范特里斯

#### 参 考 资 料

- [1] Thomas Bayes, "An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances," *Phil. Trans.*, 53, 370-418 (1764).
- [2] A. M. Legendre, *Nouvelles Méthodes pour La Détermination des Orbites des Comètes*, Paris, 1806.
- [3] K. F. Gauss, *Theory of Motion of the Heavenly Bodies Moving About the Sun in Conic Sections*, reprinted by Dover, New York, 1963.
- [4] R. A. Fisher, "Theory of Statistical Estimation," *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 22, 700 (1925).
- [5] J. Neyman and E. S. Pearson, "On the Problem of the Most Efficient Tests of Statistical Hypotheses," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A 231, 289, (1933).
- [6] A. Kolmogoroff, "Interpolation and Extrapolation von Stationären Zufälligen Folgen," *Bull. Acad. Sci. USSR, Ser. Math.* 5, 1941.
- [7] N. Wiener, *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*, Tech. Press of M.I.T. and Wiley, New York, 1949 (originally published as a classified report in 1942).
- [8] W. B. Davenport and W. L. Root, *Random Signals and Noise*, McGraw-Hill, New York, 1958.

# 目 录

<b>第一章</b>	<b>导论</b> .....	<b>1</b>
1.1	论题提要 .....	1
1.2	可能的方法 .....	11
1.3	编排方式 .....	16
<b>第二章</b>	<b>经典检测和估计理论</b> .....	<b>20</b>
2.1	引言 .....	20
2.2	简单二元假设检验 .....	24
	判决准则。性能；接收机工作特性。	
2.3	$M$ 元假设 .....	52
2.4	估计理论 .....	58
	随机参数；贝叶斯估计。实（非随机）参数估计。多参数估计。估计理论小结。	
2.5	复合假设 .....	98
2.6	一般高斯问题 .....	110
	等协方差矩阵。等均值矢量。小结。	
2.7	性能边界和近似式 .....	135
2.8	小结 .....	155
2.9	习题 .....	156
	参考资料 .....	201
<b>第三章</b>	<b>随机过程的表示法</b> .....	<b>203</b>
3.1	引言 .....	203
3.2	确定性函数，正交表示法 .....	206
3.3	随机过程表示法 .....	211
	随机过程；传统表示法。随机过程样本函数的级数表示法。高斯过程。	
3.4	齐次积分方程和特征函数 .....	225
	有理谱。限带谱。非平稳过程。白噪声过程。最佳线性滤波器。特征函数和特征值的性质。	
3.5	周期过程 .....	251

3.6	无限时间区间：频谱分解 .....	254
	频谱分解。频谱分解的应用：高斯过程的最大后验概率估计。	
3.7	矢量随机过程 .....	264
3.8	小结 .....	268
3.9	习题 .....	270
	参考资料 .....	285
<b>第四章</b>	<b>信号检测和信号参数估计 .....</b>	<b>287</b>
4.1	引言 .....	287
	模型。内容编排。	
4.2	白高斯噪声中信号的检测和估计 .....	294
	附加白高斯噪声中信号的检测。线性估计。非线性估计。小结：白高斯噪声中的已知信号。	
4.3	非白高斯噪声中信号的检测和估计 .....	341
	“白化”方法。应用卡亨南-洛维展开直接推导。用充分统计量直接推导。检测性能。估计。积分方程的解法。灵敏度。已知线性信道。	
4.4	具有多余参数的信号：复合假设问题 .....	398
	随机相角。随机振幅和相位。	
4.5	多信道 .....	434
	公式。应用。	
4.6	多参数估计 .....	439
	附加白高斯噪声信道。推广。	
4.7	小结和省略 .....	445
	小结。略去的课题。	
4.8	习题 .....	448
	参考资料 .....	507
<b>第五章</b>	<b>连续波估计 .....</b>	<b>512</b>
5.1	引言 .....	512
5.2	估计器方程的推导 .....	515
	无记忆调制系统。有记忆的调制系统。	
5.3	均方估计误差的下界 .....	528
5.4	多维波形估计 .....	539
	多维问题举例。建立数学模型。推导估计器方程。误差矩阵的下界。有色噪声估计。	
5.5	非随机波形的估计 .....	551

5.6	小结 .....	554
5.7	习题 .....	556
	参考资料 .....	563
<b>第六章</b>	<b>线性估计</b> .....	<b>564</b>
6.1	最佳处理器的性质 .....	565
6.2	可实现线性滤波器: 平稳过程, 无限过去: 维纳滤波器 .....	580
	维纳-何甫方程的解。最佳系统的误差。不可实现的滤波器。闭型误差表示式。最佳反馈系统。评论。	
6.3	卡尔曼-布西滤波器 .....	620
	线性系统的微分方程描述法与随机过程的产生。推导估计方程。应用。推广。	
6.4	线性调制: 通信领域 .....	689
	双边带调幅: 可实现解调。双边带调幅: 延迟解调。调幅: 广义载频。调幅: 单边带-抑制载频。	
6.5	最佳线性滤波器的基本作用 .....	698
6.6	解说 .....	699
6.7	习题 .....	701
	参考资料 .....	744
<b>第七章</b>	<b>讨论</b> .....	<b>748</b>
7.1	总结 .....	749
7.2	第 I、II 卷和阵处理内容预告 .....	750
7.3	尚未研究的问题 .....	752
	参考资料 .....	755
	术语汇编 .....	759

# 第一章 导 论

在这两卷书中，我们将要研究统计理论的三个领域：检测理论、估计理论和调制理论。目的是以共同的数学结构研究这些理论，并论证在许多不同的具体场合中怎样利用它们解决大量的实际问题。

在这章中，我们介绍三方面的内容提要。第一是论题提要，通过考察某些有关的典型问题，定性了解统计理论的三个领域的内容。第二是逻辑提要，探讨解决问题的不同方法。第三是按年代先后概要地阐述本书的结构。

## 1.1 论 题 提 要

说明什么是检测理论的简易方法是用来考察一些检测理论问题的实际情况。

一个简单数字通信系统示于图1-1。信源每隔  $T$  秒产生一个二进制数字。我们的目的是要把这个数字序列传输到另一个地方。适于传输序列的信道取决于特定的情况。典型地，它可能是电话线路、无线电通道或传声通道。为了说明方便，我们只考虑无线电通道。为了传送信息，必须把它变成适于在信道上传送的形式。一个简单的方法是建立一个装置。假定信源在  $T$  秒内产生



图1-1 数字通信系统

一个“1”，那么该装置在  $T$  秒内产生一个正弦波

$$s_1(t) = \sin \omega_1 t \quad (1.1)$$

假定信源在  $T$  秒内产生一个“0”，那么该装置在  $T$  秒内产生一个不同频率的正弦波

$$s_0(t) = \sin \omega_0 t \quad (1.2)$$

选择的频率要使信号  $s_0(t)$  和  $s_1(t)$  能够在特定的有关无线电信道中传播。装置的输出馈送到天线并在信道中传输。图 1-2 示出了典型的信源和所传送的信号序列。在最简单的一类信道中，信号序列到达接收天线时有衰减但基本上不畸变。为了处理接收信号，我们把它通过接收天线和若干级射频放大器。在上述传输过程中，热噪声  $n(t)$  附加到消息序列上。于是，在任何  $T$  秒间隔内，

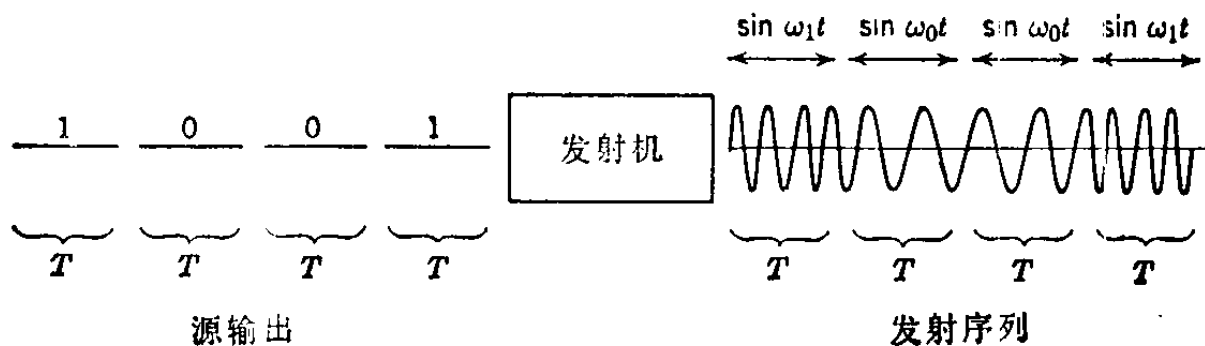


图1-2 典型序列

我们可得下述波形：若传输  $s_1(t)$  时，为

$$r(t) = s_1(t) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.3)$$

若传输  $s_0(t)$  时，为

$$r(t) = s_0(t) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.4)$$

现在，我们面对着判定两个可能的信号中传输的是哪一个信号的问题。我们把进行这一过程的装置称为判决装置。这只不过是观测  $r(t)$ ，并按某一组规则推测发送的是  $s_1(t)$  还是  $s_0(t)$  的处理器。这和推断信源在上一个时间间隔里输出什么是等效的。我们把设计和计算这一处理器的问题称为检测理论问题。在这种特定情况下，作出判决时唯一可能的误差源是附加噪声。若不存在噪声，则输入会是完全已知的，并可没有误差地作出判决。我们

把这类问题称为噪声中已知信号的问题，它相当于我们所研究的最低级的检测问题(即最简单的)。

第二级检测问题的例子示于图1-3。用来产生在上述例子中的  $s_1(t)$  和  $s_0(t)$  的振荡器有一相移。因此，在特定的  $T$  秒间隔内，对应于“1”的接收信号为

$$r(t) = \sin(\omega_1 t + \theta_1) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.5)$$

对应于“0”的接收信号为

$$r(t) = \sin(\omega_0 t + \theta_0) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.6)$$

式中  $\theta_0$  和  $\theta_1$  是未知的恒定相角。于是，即使在没有噪声时，输入波形也不是完全已知的。在实际系统中。接收机可以包括测量振荡器相位的辅助设备。假如相位变化足够缓慢，我们将看出，精确测量基本上是不可能的。若果然如此，这个问题就和前述的一样。然而，如果测量并不精确，那么我们必须要在模型中计入信号的不定性。

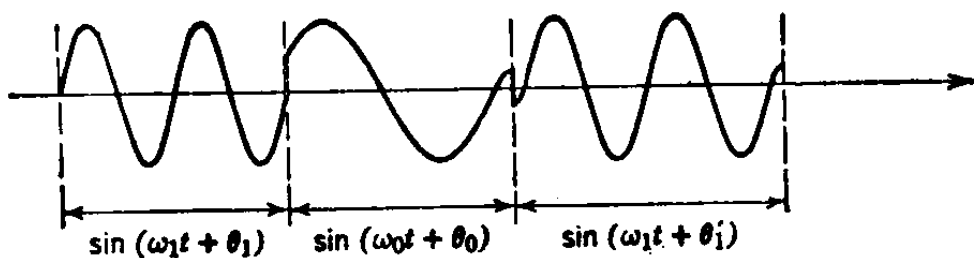


图1-3 具有相移的序列

在雷达和声纳领域中也产生相应的问题。普通雷达发射一个具有矩形包络的，频率为  $\omega_0$  的脉冲：

$$s_r(t) = \sin \omega_0 t \quad 0 \leq t \leq T \quad (1.7)$$

假如目标存在，脉冲被反射回来，即使最简单的目标，在传输的信号上也会引入衰减和相移。于是，在所考虑的时间间隔中，用于进行处理的信号为：若目标存在

$$\begin{aligned} r(t) &= V_r \sin[\omega_0(t - \tau) + \theta_r] + n(t) \quad \tau \leq t \leq \tau + T \\ &= n(t) \quad 0 \leq t < \tau, \quad \tau + T < t < \infty \end{aligned} \quad (1.8)$$

若目标不存在



$$r(t) = n(t) \quad 0 \leq t < \infty \quad (1.9)$$

可以看出，噪声不存在时，信号仍然包含着三个未知量：振幅  $V_r$ 、相位  $\theta_r$  和到目标的往返时间  $\tau$ 。

这两个例子表示第二级检测问题。我们把它们归类为噪声中具有未知参数的信号检测问题。

第三级检测问题出现在好几个领域。在无源声纳检测系统中，接收机收听由敌舰产生的噪声。敌舰的发动机、推进器和其它部件会产生音响信号，该信号通过海洋传输到检测系统中的水听器。这个合成信号能够最恰当地用随机过程的一个样本函数来表征。此外，水听器本身会产生噪声，并会接收海洋噪声。因此，适合于检测问题的适当模型应当是：若目标存在

$$r(t) = s_{\Omega}(t) + n(t) \quad (1.10)$$

若目标不存在

$$r(t) = n(t) \quad (1.11)$$

在不存在噪声时，信号是随机过程的一个样本函数（由下标  $\Omega$  表示）。

在通信领域中，大量系统使用具有随机性的信道。典型系统是对流层散射通信，轨道偶极子通信和箔条系统。通用的方法是发射两个以频率区分的信号中的一个（我们分别用  $\omega_1$  和  $\omega_0$  表示这些频率）。所得接收信号为：若传输  $s_1(t)$  时

$$r(t) = s_{\Omega_1}(t) + n(t) \quad (1.12)$$

若传输  $s_0(t)$  时

$$r(t) = s_{\Omega_0}(t) + n(t) \quad (1.13)$$

这里， $s_{\Omega_1}(t)$  是以  $\omega_1$  为中心的随机过程的样本函数， $s_{\Omega_0}(t)$  是以  $\omega_0$  为中心的随机过程的样本函数。这些例子的特征是没有任何确定的信号分量。所设计的任何判决方法，必须基于可以获得  $s_{\Omega_0}(t)$  和  $s_{\Omega_1}(t)$  的两个随机过程的统计特性的差异。这是第三级检测问题，并称为在噪声中随机信号的检测问题。

在考察这些典型例子时，我们看出，检测理论问题是用必须