

# 检测、估计和调制理论

## 卷Ⅱ 非线性调制理论

〔美〕H. L. 范特里斯 著

毛士艺 周荫清 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。全书共分三卷,第Ⅰ卷是介绍非线性调制理论的专著。全书包括导论、最佳解调器、同步与相位估计、频率调制、最佳调角系统、各种通信系统的比较、非线性估计的其它方法、在随机时变信道中的模拟通信和有关课题的讨论等九章。

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、研究生和高等学校教师。

DETECTION, ESTIMATION AND MODULATION THEORY

PART I Nonlinear Modulation Theory

Harry L. Van Trees

John Wiley and Sons, Inc.

1971

\*

检 测、估 计 和 调 制 理 论

卷 I 非线性调制理论

〔美〕 H. L. 范特里斯 著

毛士艺 周荫清 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 1/32 印张12 1/8 316千字

1985年8月第一版 1985年8月第一次印刷 印数: 0,001--2,790册

统一书号: 15034·2782 定价: 2.50元

## 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。他们的素质对于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，读者应当详细讨论这些不同方法。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专著。因此包括雷达、声纳信号处理和噪声中高斯信号的第Ⅲ卷就显得

## Ⅳ

非常必要了。当我完成第Ⅲ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，并指出如何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。这是令人遗憾的，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。后略译。

*Harry S. Van Trees*

1982年1月于弗吉尼亚州马克林

# 目 录

第一章 导论	1
1.1 第 I 卷内容回顾	1
1.2 论题概要	2
1.3 本书编排方式	4
参考资料	5
第二章 最佳解调器	6
2.1 调角系统模型	6
2.2 解调器设计的直观方法	7
2.3 最大后验估计	13
2.4 最佳解调器结构	15
2.5 系统设计和性能	24
2.5.1 推导不可实现的均方误差	25
2.5.2 滤波器设计	27
2.6 实际问题	29
2.6.1 振荡器模型	29
2.6.2 后-环滤波	30
2.6.3 环路噪声带宽	31
2.6.4 压控振荡器的外部控制	32
2.7 小结	32
2.8 习题	34
参考资料	36
第三章 相位估计:同步问题	38
3.1 振荡器不稳定性分析	40
3.2 无噪声时的非线性分析	43
3.2.1 一阶环路:恒定频偏	44
3.2.2 二阶环路:恒定频偏	49
3.2.3 二阶环路:恒定加速	54
3.3 有噪声时的非线性分析	56

# X

3.3.1 福克-普朗克方法 .....	57
3.3.2 扰动法和近似法 .....	64
3.4 有关课题 .....	64
3.4.1 最佳跟踪系统:时变的 .....	65
3.4.2 最佳跟踪系统:时不变的 .....	67
3.4.3 最小捕获时间系统 .....	70
3.4.4 相位检波器设计 .....	71
3.4.5 有噪声时的捕获 .....	72
3.4.6 环路前的带通限幅器 .....	73
3.5 小结:同步问题 .....	73
3.6 习题 .....	74
参考资料 .....	87
第四章 频率调制 .....	90
4.1 调频系统模型 .....	90
4.2 最佳调频解调器:门限约束 .....	96
4.2.1 一般维纳方法 .....	97
4.2.2 简化维纳方法 .....	98
4.2.3 状态变量法 .....	99
4.2.4 调频系统设计举例 .....	99
4.3 最佳调频解调器:带宽约束 .....	106
4.4 小结 .....	110
4.4.1 调频系统设计小结 .....	111
4.4.2 调相系统 .....	111
4.4.3 调幅、调频和调相系统比较 .....	114
4.5 习题 .....	117
参考资料 .....	125
第五章 最佳调角系统 .....	127
5.1 最佳预矫滤波器:门限约束 .....	129
5.2 最佳预矫滤波器:带宽约束 .....	136
5.3 次最佳预矫滤波器 .....	141
5.3.1 次最佳系统设计 .....	141
5.3.2 小结 .....	145
5.4 模拟消息传输系统的性能边界 .....	145
5.4.1 率-失真界 .....	147
5.4.2 性能比较:无限带宽信道 .....	161

5.4.3 性能比较:带宽约束	164
5.4.4 小结	167
5.5 普通鉴频器	168
5.5.1 弱噪声分析	169
5.5.2 门限特性	173
5.6 小结	177
5.7 习题	179
参考资料	186
<b>第六章 传输系统比较</b>	<b>188</b>
6.1 采样和量化系统	189
6.2 量化器分析	192
6.3 二进制无编码系统	199
6.4 正交信号系	204
6.5 编码数字系统	207
6.6 小结	210
6.7 习题	212
参考资料	216
<b>第七章 非线性估计理论:其他方法</b>	<b>218</b>
7.1 最大后验概率估计的微分方程法	219
7.1.1 最大后验概率区间估计	219
7.1.2 可实现最大后验概率点估计与不变嵌入法	224
7.2 马尔可夫过程方法	232
7.3 小结	238
7.4 习题	240
参考资料	245
<b>第八章 在随机时变信道上传输的模拟通信</b>	<b>247</b>
8.1 模型和可能的方法	247
8.1.1 模型	247
8.1.2 可能的方法	249
8.2 推导最佳接收机:瑞利信道	254
8.2.1 最大后验概率方程:无记忆瑞利信道	255
8.2.2 角度调制:瑞利信道	258
8.2.3 消息和信道的联合估计	261
8.2.4 可实现最大后验概率与最小均方误差估计器	263

## Ⅱ

8.3 性能边界与近似方法 .....	268
8.3.1 均方误差边界 .....	268
8.3.2 精确测量边界 .....	272
8.3.3 慢起伏信道中的接收机设计与性能:准平稳分析 .....	274
8.4 小结 .....	281
8.5 习题 .....	282
参考资料 .....	287
第九章 讨论 .....	288
9.1 有关课题 .....	288
9.1.1 多路系统 .....	288
9.1.2 分集系统 .....	293
9.1.3 同步与跟踪系统 .....	297
9.2 第Ⅰ卷小结 .....	298
9.3 第Ⅱ卷与阵处理预告 .....	301
9.4 习题 .....	303
参考资料 .....	309
附录: 状态变量分析法 .....	311
术语汇编 .....	361



# 第一章 导 论

本书是检测、估计和调制理论四卷书中的第 I 卷。这四卷书是为了给求解检测、估计和调制理论问题提供一个统一的方法。本卷中我们研究许多不同方面的问题，但中心问题是估计经过非线性变换后在噪声中观测到的模拟波形。

本章简要讨论三个问题。在 1.1 节我们回顾第 I 卷的内容，以便看出第 I 卷材料在整个发展过程中的地位。1.2 节介绍本卷材料的论题概要。最后，在 1.3 节概述了本书的编排方式。

## 1.1 第 I 卷内容回顾

在第 I 卷的导论中，我们概述了检测、估计和调制理论方面问题的层次，并讨论了许多出现这些问题的实际情况。

在第 I 卷中是从详细研究经典检测和估计理论开始的。在经典问题中观测空间是有限维的，而在大多数我们感兴趣的问题中观测是一个波形，并且必须用无限维空间表示。所有检测和参数估计的基本概念都在经典范围内研究过了。

在 I-3 ● 章讨论了用级数展开的波形表示式。这种表示式能够使我们直接将经典问题和波形问题联系起来。以这两章作为基础，我们开始研究 I-1 章列出的问题层次。

在 I-4 章的前部分，我们研究了在高斯噪声中已知信号的检测，以及在高斯噪声中已知信号参数估计。在 I-4 章的后部分，我们讨论在高斯噪声中具有未知参数的信号。本章结果完成了检测和估计理论的前两层问题。

在 I-5 章我们着手讨论调制理论（或连续波形估计）的问

---

● 表示第 I 卷第三章，下同。——译注

题。在形成问题模型之后，推导了一组规定最佳解调器的积分方程。在 I-6 章集中讨论线性估计问题。在该问题中，我们能够求解必要的积分方程并得到最佳接收机。为了详细研究这类问题，还介绍了维纳和卡尔曼-布西解法。

下一步研究非线性估计理论。第 II 卷的讨论正是从这一点开始。

在开始讨论之前，应当再次强调 I-5 和 I-6 章的材料是本书讨论的主要基础。

## 1.2 论 题 概 要

本书研究四个主题。每个主题逐次由一个或多个前面的主题诱发。我们最初的动机是要表明：怎样才能将 I-5 章波形估计的结论用到非线性估计问题中。

第一个要研究的问题如图 1-1 所示。模拟消息源产生消息  $a(t)$ ，它是高斯随机过程的样本函数。消息  $a(t)$  是调制器的输入，其输出为  $s(t, a(t))$ ，然后将它发送出去，如图 1-1 所示。传输波形被独立于消息过程的零均值高斯噪声过程污染。接收波形为

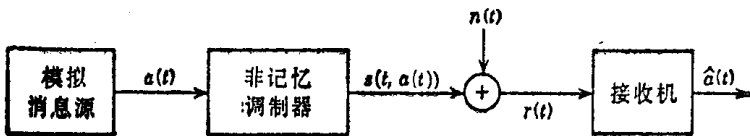


图1-1 连续非记忆调制方案

$$r(t) = s(t, a(t)) + n(t) \quad T_i \leq t \leq T_f \quad (1.1)$$

接收机观测  $r(t)$ ，并产生消息的估计量  $\hat{a}(t)$ 。所要研究的问题是设计一个最佳接收机并分析它的性能。

这一问题最初是在 I-5 章形成的，而且已推出规定最佳接收机的方程式。当  $s(t, a(t))$  是  $a(t)$  的线性函数时，我们得到在 I-6 章中详细研究过的线性估计问题。

本书第一个要研究的课题是求出  $s(t, a(t))$  为  $a(t)$  的非线性函数时的最佳接收机。这个问题的解法，联同 I-6 章中详细研究过的线性估计问题，可以给出波形估计问题的完整论述。可惜，正如在 I-4 章非线性参数估计问题中所见到的那样，要作出有用的一般论述是困难的。比较有效的方法是选择一个特殊的非线性方案并详细研究它。由于详细研究要花费大量劳动，因此关键是选择一个实际中常常遇到的，其解又是重要的非线性估计问题。满足这一要求的问题是待估计的波形对应于正弦信号的瞬时相位或频率。

估计正弦信号的相位或频率的问题可能在两个方面遇到。第一方面称为同步问题。我们在 I-4.4 节数字通信中遇到了这样一个例子。在这种情况下，二元信息是由在  $T$  秒内发送一个  $\sqrt{2P} \sin(\omega_c t + \theta(t))$  或  $-\sqrt{2P} \sin(\omega_c t + \theta(t))$  来传输的。发射机振荡器的相位在  $T$  秒间隔内基本上是常数，但在较长的时间间隔内是变化的。可以看出，若接收机能够建立一个相位参考，那么它就能以一个低错误概率作出判决。在许多情况下，我们都会遇到要用一个振荡器去同步另一个振荡器的问题。同步应用的特征常常是用不希望有的相位变化来表征。为使这一变化尽可能小，我们应用稳定的振荡器。这意味着我们要估计的  $\theta(t)$  通常是一个慢变化过程。在许多有意义的情况下（如跟踪运动着的空间飞行器上的振荡器的相位），相位过程将包括一个非平稳的过渡分量。以恒速运动的振荡器会导致一个相位斜升 ( $\theta(t) = kt$ )。

第二方面是调角问题。这里我们用改变振荡器的相位或瞬时频率来传输模拟数据。调角概念是一个古老问题（如阿姆斯特朗〔1〕或卡森和弗赖伊〔2〕）。在这种情况下，为了传输信息，相位或频率是有意识地改变的。通过传输一个其带宽明显大于消息带宽的调角信号，我们希望得到一个比用线性调制系统所能得到的还要小的均方消息估计误差。在某些情况下，相位过程将是慢变化的。但是在大多数我们所研究的情况下，相位过程将是一个宽带随机过程。此外，所研究的消息是频率而不是相位，而且是

它的某一线性泛函。

研究同步和调角问题的最初出发点是为了阐明非线性估计理论的应用。我们发现，在某些实际情况中，原先的估计理论模型并不包括问题的全部重要性质。因此，第二个主题是详细研究同步问题和调角问题。在研究同步问题时，我们探讨了在设计该系统时应当考虑的所有论题。在研究调角问题时，我们考察了影响系统设计和性能的各个量，并定量论述在带宽和信噪比之间的折衷选择问题。

最后，从调角问题的研究导出一个“最佳”调角系统。倘若我们通过对正弦波调角来传输一个模拟消息，那么这个系统以最佳方式来实现它。下一个合乎逻辑的问题是，如果我们是為了有效地传输一个模拟消息，那么是否有比调角更有效的其它方案？第三个主题是比较传输模拟消息的各类系统。分析的主要内容是研究系统的性能边界。

当着手进行这些不同课题时，我们往往会发现 I-5 章中的非线性估计理论是不够的。这就促使我们讨论最后一个课题，它包括重新考察一般非线性估计问题，并研究两种可采用的解法。

总之，本书包括四个主题：

1. 将最大后验概率估计理论应用于调角问题。
2. 详细研究同步和调角问题。
3. 比较传输模拟数据的各类方法。
4. 研究解决一般非线性估计问题的其它可能方法。

### 1.3 本书编排方式

从 1.2 节看出，本书讨论四个主题。第一个主题是将最大后验概率估计理论用于调角问题。

解决第一个主题的方法包括以下步骤：

1. 应用 I-5 章结果可以写出规定对于  $\theta(t)$  的最佳解调器的积分方程。它是一个非线性积分方程。一般说来它不能用解析法求解。我们将会看出，非线性积分方程可视为一个含有不可

实现的滤波器的反馈系统。

2. 下一步是怎样才能找到一个不可实现的解调器所表明的性能的实际系统。我们证明：在一定范围内（这取决于信号电平、噪声电平和消息相关函数）能够求出一个用延时来实现的系统。它是以任何逼近的方式接近最佳系统的。

3. 最后，可以看出有许多系统都能在各个不同范围内非常近似地接近最佳解调器。我们要求出在最大可能范围内，性能和最佳系统一样好的系统。

在第二章详细进行了这些步骤，并获得一个解调器结构。得到该解调器结构以后，分别讨论同步和调角问题就更方便了。

在第三章详细讨论同步问题。在第四、五章研究调角系统。如同 I-4 章，我们求出基于能噪比约束和带宽约束而产生的性能极限。在这两个约束下，比较最佳和一般系统的性能。重要结果之一是传输模拟数据的任一系统所能达到的均方误差边界。

在第六章提出了一个重要问题，当给定模拟消息源、一定带宽和信噪比约束时，最有效的通信系统是什么？应用 I-4 章结果，我们将应用采样和量化的数字系统与第五章中研究的最佳连续调制系统进行比较。

在第七章简要讨论解决非线性估计问题的两种可采用的方法。两种方法都直接得出可实现的接收机。它们都是应用均方误差准则，并且能使我们处理某些非高斯过程。

整个第七章的讨论都是研究附加高斯噪声信道。在第八章研究在瑞利衰落信道中的模拟通信问题。

在第九章简要讨论多路系统和分集系统。然后对本书主要结论进行小结，并概述第 II 卷和阵处理的要点。

## 参 考 资 料

- [1] E. H. Armstrong, "A Method of Reducing Disturbances in Radio Signaling by a System of Frequency Modulation," Proc. IRE 24, 689-740 (1935).
- [2] J. R. Carson and T. C. Fry, "Variable Frequency Electric Circuit Theory with Application to the Theory of Frequency-Modulation," Bell System Tech. J. 16, 513 (1937).

## 第二章 最佳解调器

本章详细研究一个重要的非线性估计问题。这是一个通过线性运算，使待估计的波形和正弦信号的瞬时相位有关的角度估计问题。

在2.1节要形成调角系统的模型。在2.2节讨论设计解调器的直观方法。在2.3节给出规定消息最大后验概率估计量的方程式。在2.4节利用最大后验概率方程获得最佳解调器结构。在2.5节研究系统设计方法和分析最佳解调器性能。在2.6节讨论某些包含在实现真实解调器中的实际问题。最后，在2.7节小结本章的主要结论。

### 2.1 调角系统模型

用于调角系统的模型如图 2-1 所示。系统模型包括三部分：

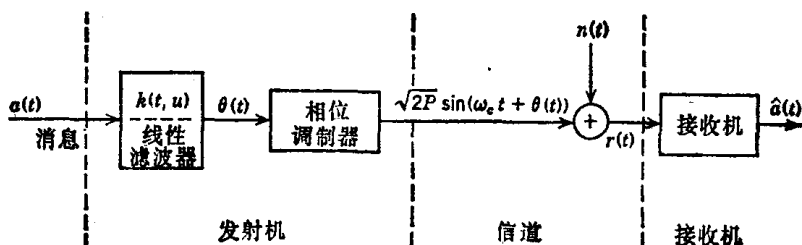


图2-1 调角系统

1. 发射机
2. 信道
3. 接收机

首先讨论发射机。波形  $a(t)$  是要传输的消息。假定  $a(t)$  是协方差函数为  $K_a(t, u)$  的零均值高斯随机过程的样本函数，

它通过一个冲击响应为  $k(t, u)$  的线性滤波器。该滤波器的输出波形是  $\theta(t)$ ，它又作为相位调制器的输入。发射信号为

$$s(t, \theta(t)) = \sqrt{2P} \sin(\omega_c t + \theta(t)) \quad (2.1)$$

式中， $\omega_c$  是载频， $P$  是平均发射功率。

在调相系统中，线性滤波器只是一个简单增益，且

$$\theta(t) = \beta a(t) \quad (2.2)$$

式中  $\beta$  为调制指数。

在调频系统中，消息对应于发射信号的瞬时频率。线性系统是一个积分器：

$$k(t, u) = d_f u_{-1}(t - u) \quad (2.3)$$

式中  $d_f$  称为频偏。在这种情况下，发射信号为

$$s(t, \theta(t)) = \sqrt{2P} \sin\left(\omega_c t + d_f \int_{-\infty}^t a(u) du\right) \quad (2.4)$$

以后我们将看到  $\beta$  和  $d_f$  值的重要意义。在更普通的调角系统中， $k(t, u)$  用来将消息特征变成更加适合于传输的形式。本章中假定  $k(t, u)$  是固定的，且只研究接收机设计的问题。在第五章讨论  $k(t, u)$  最佳化问题。

信道附加谱高为  $N_0/2$  的白高斯噪声。因此接收信号为

$$r(t) = \sqrt{2P} \sin(\omega_c t + \theta(t)) + w(t) \quad T_i \leq t \leq T_f \quad (2.5)$$

接收机处理  $r(t)$  以得到消息  $a(t)$  的估计量，我们将它表示为  $\hat{a}(t)$ 。

本章大部分内容是研究寻求最佳接收机并分析其性能的问题。在开始讨论之前，我们想用直观论据研究最佳解调器的某些可能方案。

## 2.2 解调器设计的直观方法

本节研究调频信号解调的某些可能方法。为简化起见，假定  $a(t)$  是一个低通消息，其频谱在大于  $W_M$  赫的频率处基本为

零。设计解调器的简易方法是假定  $a(t)$  为正弦波，

$$a(t) = \sqrt{2} \sin(2\pi W_M t) \quad W \leq W_M \quad (2.6)$$

根据推测，若在直到包含消息中的最高频率的任一频率上都能满意地解调一个正弦波，那么我們也能解调消息。因此为设计接收机令  $W = W_M$ 。还假定  $d_f$  很大（如  $d_f \geq 10$ ）。于是，发射信号为

$$s(t, \theta(t)) = \sqrt{2P} \sin \left[ \omega_c t + d_f \int^t \sqrt{2} \sin(2\pi W_M u) \times du \right] = \sqrt{2P} \sin \left[ \omega_c t + \frac{\sqrt{2} d_f}{2\pi W_M} \cos(2\pi W_M t) \right] \quad (2.7)$$

发射信号瞬时频率  $\omega_i(t)$  的示意图如图 2-2 所示。可以看出，瞬时频率是在  $\omega_c + \sqrt{2} d_f$  和  $\omega_c - \sqrt{2} d_f$  之间变化。

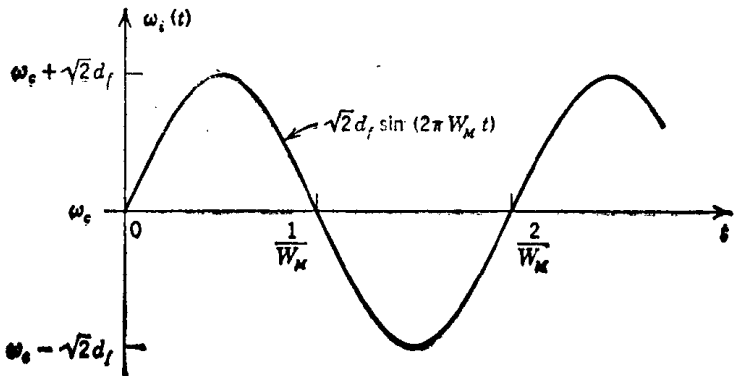


图2-2 瞬时频率曲线

估计  $a(t)$  的一个明显方法示于图 2-3。为了滤去带外噪声，接收信号通过中心频率为  $\omega_c$  的带通滤波器。这个滤波器必须有稍大于  $2\sqrt{2} d_f$  的带宽，以使被调制的消息不致失真。调频信号的失真是一个重要问题。在许多参考书中都讨论了这一问题。这里，我们假定所设计的带通滤波器对传输信号基本上不失真。带通滤波器的输出作为鉴频器的输入。理想鉴频器只不过是一个输出电压正比于输入瞬时频率的装置。简单的实际鉴频器是





图2-3 普通调频解调系统

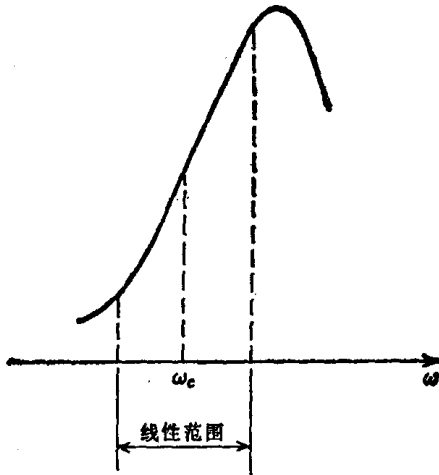


图2-4 简单调谐滤波鉴频器的频率特性

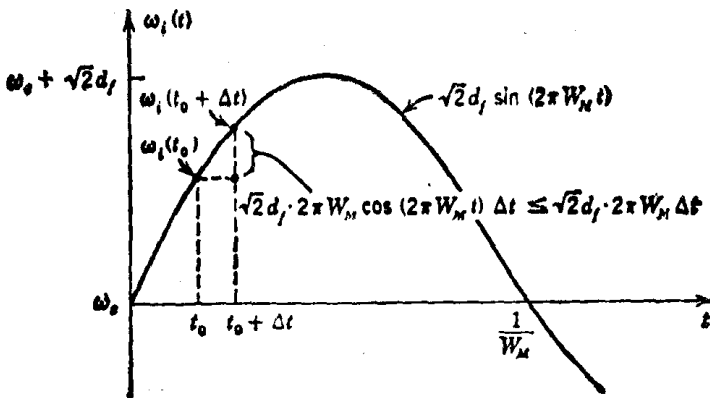


图2-5 短期瞬时频率特性

一个调谐电路，其频率响应如图 2-4 所示。然后，将鉴频器的输出通过一个低通滤波器，滤掉高于  $W_M$  的全部频率分量。在无噪声的情况下，这个装置给出正确输出。也能证明，对于大信噪比