调频多路无线电通信系统中的失真和干扰

〔苏〕C.B.包罗杰奇 著
王晦光 张华忠 译
张 世 箕 校

人民邮电出版社

С. В. Бородич

ИСКАЖЕНИЯ И ПОМЕХИ В МНОГО-КАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

内 容 提 要

本书主要分析频分复用调频无线电接力通信系统和卫星通信系统话路中的串音。在分析中运用随机过程理论，并采用把多路电话信号表示为正态平稳随机过程的数学模型。提出了根据已知的信道特性来计算串音的工程计算方法以及从给定的信道串音允许值确定对这些特性要求的方法。本书可供从事无线电接力通信和卫星通信工作的科技人员、有关专业的研究生和大学生阅读。

调频多路无线电通信系统中的失真和干扰

〔苏〕C. B. 包罗杰奇 著
王晦光 张华忠 译
张 世 箕 校

*

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
天津新华印刷一厂印刷
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 1983年2月 第一版
印张：11 16/32页数：184 1983年2月天津第一次印刷
字数：265千字 印数：1—5,200册
统一书号：15045·总2654—无6215
定价：1.20元

原　序

按频分复用和单边带传输原理工作的第一批多路电话通信系统，是在30年代创建并在电缆线路上付诸实用的。1936年出现了传输频谱为60千赫的对称电缆12路通信系统，没有多久，到1936年就实现了用同轴电缆在1兆赫的频谱内同时传送240路的电话。随着路数的增多和增音站间距的缩短，降低放大器的非线性在各话路中所产生的串音[1]，就成为突出的问题。为了确定对放大器的要求，就需要对串音进行数学分析，但那时没有适当的数学手段，无法进行这种分析。在有线通信和无线电通信的理论研究方面，当时一般采用了把信号表示为许多谐和振荡的方法，亦即把信号表示为确定性过程的方法；其实多路信号本身却是随机过程。

1939年，鲁布内——格尔泽克(А.Л. Лубны-Герцык[2]提出在计算串音时把多路信号看作随机量的方法。当话路数很多时，根据中心极限定理，该随机量的概率分布趋近于正态分布。他的著作没有在电信界的专家中获得响应，也未得到进一

（1）原文是“Переходная помеха”，对话路而言，称为“串音”或“串话”，更广义地说（例如传送电报，传真电报或数字信息时），也可称为“串扰”（串越干扰）或“交越干扰”，为简单起见，我们一般都译为“串音”。

顺便指出，为了方便读者阅读本书，我们对书中采用俄文脚标的数学符号在译文中加了注释；对原文中的排印错误，凡已发现的均已在译文中改正——译注

（2）Электросвязь.1939№. 6, Стр.63—70.——原注

步的发展，因为数学家们刚刚才创立了适于分析串音的数学工具。

1945年发表了布洛克班克（R.A. Brockbank）和沃斯（A.A.Wass）[1]的论文，文中分析了放大器的非线性在多路系统的话路中所引起的串音。虽然分析是在把多路信号表示为不同频率的谐和振荡之和（亦即表为确定性过程）的条件下完成的，但却也得出了一些把非线性产物在多路信号频带内的功率分布考虑进去的串音计算公式，而且他的结果和后来别的作者用随机过程来表示多路信号所得到的结果相同。这篇文章成为设计多路通信系统的经典著作，在计算中获得了广泛的应用，但是，理论的进一步发展却只能建立在采用新的数学工具——随机过程理论——的基础之上。

随机过程的一般理论，主要是由欣钦（А.Я. Хинчин）和柯尔莫哥洛夫（A.H. Колмогоров）在30年代创立的。欣钦提出了平稳随机过程的相关理论[2]，推导出了随机过程的谱密度和它的相关函数之间的关系式。在这不久之前，维纳（N.Wiener）得到过同样的关系式[3]，不过他只是针对平稳随机过程之中的一类过程得到的。由于这个缘故，现在便把这些关系式的证明称为维纳—欣钦定理[4]。建立了随机过程的理论之后，在很长的一段时间内，无线电技术专家们都未应用它，直到40年代中叶，才出现了第一批运用这种理论来分析无线电接收机起伏过程的论文。

在40年代，无线电多路通信开始发展，出现了第一批无线

---

(1) PIEE, part III March,1945,Vol.92,p.45—46——原注

(2) успехи Математических Наук,1938, вып.V.СТР.42-51.——原注

(3) Acta Math,1930, Vol.55, №.2-3, p.117-258.——原注

(4) 原文为"欣钦—维纳定理"，不合通常的习惯，事实上，维纳发表的有关论文比欣钦早8年.——译注

电接力通信系统。这种通信系统所采用的按频率分割话路的方法以及形成话路的设备，都和电缆多路通信系统相同，不过都采用由多路信号调频的无线电信号来传输。由于傳输方法上的这种差异，对无线电多路通信系统来说，串音的分析就比有线通信系统复杂得多。

1950年，本书的作者提出了采用下述数学模型和运用随机过程的能谱理论来分析无线电多路接力通信系统中的串音，在该数学模型中，多路信号表示为具有均匀连续谱的正态平稳随机过程的形式。看来这一途径是极有成效的。分析的结果得到了一系列公式，以计算调频信号通过具有非均匀群时延特性的通道以及通过终端不完全匹配的天线馈线对产生的串音。在分析群通道中的串音时所得到的公式与布洛克班克和沃斯公式完全一致。借助于随机过程理论又进一步研究了出现串音的另外一些原因，并探讨了计算方法。这些研究结果还推广到其后问世的频分复用调频卫星通信系统。

本书是以作者本人的一些有独创性的论文为基础而编写成的一本专著，专门分析多路无线电接力通信和卫星通信系统中的串音和失真。书中研究了由于通信线路的群通道和高频通道的特性不理想而在这些通道中产生的串音，以及由于无线电干扰的作用和几个无线电信号在非线性的转发器中相互作用而引起的串音。本书还给出了调频信号通过具有给定特性的通道时所产生的失真的计算方法。这些方法可用于似稳近似法不适用的场合。在分析天线馈线中的回波信号所引起的串音时，话路中的串音在线路输出端上的功率被看作随机量，该随机量在线路的不同现实中具有不同的值，这是由于在天线馈线的不同现实中，反射系数随机性地弥散的结果。同样也用概率论的方法来计算了高频通道中产生的串音。在所需的频带内，通道特性

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

对理想特性的偏离被看作随机量，在这基础上，研究出了从给定的串音平均功率和超过现实百分之几的功率出发确定通道特性不均匀度容差的方法。例如，在工厂里进行设备的调谐时，或在无线电接力线路上进行各段的调谐时，利用这种方法可以从线路输出端所容许的串音功率出发，以最方便而又直观的形式提出对通道特性的要求。

自然，本书并未把无线电多路通信系统串音的所有理论问题都阐述无遗，也未用一些章节来阐述关于引起串音的一些较为次要的原因，例如，无线电信号的寄生调幅（随后由调幅变换为调相），以及在限幅器输出端出现的调频信号的谐波对鉴频器的影响等等。为了使理论完备，按理应将线路通道的所有部件中产生的所有各种串音作为一个复合体来考虑，并计及它们的相关性关系和特性的随机离散，以及求出线路输出端上串音功率的统计特性。然而，这是一个十分复杂的课题，大概只有在很多学者们辛勤地研究之后才有可能解决。

作者指望本书对那些熟悉概率论的工程师、研究生以及专门从事无线电接力通信和卫星通信的科学工作者们将会有所帮助。

目　录

原　序

第一章　多路无线电通信系统中的失真和干扰的形式及其研究方法

1·1　失真和干扰的形式…… 1

1·2　分析方法…… 8

第二章　多路消息和信号

2·1　多路消息及其数学模型……17

2·2　多路消息的统计特性……20

2·3　由多路消息调频的信号的相位……29

2·4　由多路消息调频的信号的相关函数和能谱……37

2·5　由多路消息调频的信号能谱的计算方法……42

第三章　群通道中的串音

3·1　串音的相关函数和能谱……62

3·2　话路中的串音功率……72

3·3　由多路消息的限幅而引起的串音……81

第四章　回波信号引起的串音

4·1　引　言……98

4·2　一个回波信号引起的串音……99

4·3　多个回波信号引起的失真及其叠加 ……111

4·4　回波信号引起的串音的能谱 ……117

4·5　串音能谱的计算方法 ……123

4·6　多个回波信号引起的串音功率及其统计特性 ……130

第五章　无线电干扰在话路中引起的串音

5·1　引言 ……145

5·2 有用调频信号和调频无线电干扰对理想鉴频器的作用 ……147
5·3 有用调频信号和调幅无线电干扰对理想鉴频器的作用 ……171
5·4 有用调频信号和无线电干扰对实际鉴频器的作用 ……179
5·5 在公共放大器中同时放大几个调频信号时所产生的干扰 ……202
第六章 高频通道中的串音
6·1 高频通道所需的通带宽度 ……224
6·2 调频信号通过线性四端网络时产生的相位误差的普遍表示式 ……236
6·3 似稳近似法及其应用条件 ……243
6·4 以似稳近似法为基础的计算串音的方法 ……250
6·5 以相位误差普遍式为基础的计算方法 ……257
6·6 用成对回波法计算高频通道中的串音 ……273
6·7 串音功率的统计特性及高频通道特性偏离理想特性的容差的确定 ……284
6·8 鉴频器所引起的串音 ……297
第七章 高频通道中消息的线性失真
7·1 问题的提出及在谐和调制下失真产物的普遍表示式 ……313
7.2 消息的线性失真和通道的微分特性 ……321
附 录 ……330

第一章　多路无线电通信系统中的失真和干扰的形式及其研究方法

1·1　失真和干扰的形式

本书研究无线电多路通信系统，属于这类系统的包括无线电接力通信系统和利用人造地球卫星上的转发器工作的卫星通信系统。无线电接力通信系统是在有线（电缆）通信系统已经实现并在此基础上建立起了长途干线通信网的时候才出现和开始发展起来的。因此，很自然，如同电缆线路中一样（很少例外），在无线电接力通信系统中也采用了多次传输的方法和频分复用技术。这可以简化无线电接力线路与电缆线路的连接，毫无困难地将无线电接力线路接入现有的通信网中。

已在复用设备中形成的多路信号被加到无线电接力线路的输入端；多路信号本身是沿着各个单独的话路传输的信号按频率分割而形成的集合，其中每个信号是由该话路中传输的消息对载频振荡进行单边带调制而形成的。然后多路信号对沿着接力线路传输的无线电信号调频。这样，在无线电接力通信的多路系统中便采取了两级调制：各单个话路对载频振荡进行单边带调制；各话路的单边带信号的集合（即多路信号）对无线电信号调频。采用这种传输方法，便形成了有效传输频带为300至3400赫的许多个万用音频话路，它们既可以用作电话通信，也可以通过二次复用的方法传送电报和传真信号，还可以用来传输数字信息。把若干个话路结合起来，便可组成频带较宽的信

道，以传送无线电广播节目（把两、三个话路结合起来），或传输中速和高速数字信息（将12个或60个话路结合起来）。[1]在一条无线电接力线路上，通常有几个频率稍为错开的宽带无线电信道或波道，其中一部分波道用于多路通信，一部分波道用来传送电视信号，一部分波道则作为工作波道发生故障时的备用波道。随着需要在通信网中传递的信息量的增加，对无线电接力线路每一波道的通过能力就提出了更高的要求。波道通过能力的提高与许多问题的解决密切相关，其中主要是与话路中的干扰作斗争。

在频分复用调频无线电接力线路上，话路中的干扰由热噪声和串音两部分组成。热噪声是由电路元件（主要是接收机输入电路）中的电子热骚动引起的。降低热噪声的必要措施，可归结为增大发射机的功率、降低接收机的热噪声温度、提高天线的增益系数、降低天线馈线中的损耗等。换句话说，也就是在于提高整个系统的“能位”。这些措施是显而易见的，并已充分地研究过了，不过，要实现这些措施，往往在技术上有重大的困难。

串音是由于多路信号沿线路传输时遭受非线性失真产生的。多路信号的非线性失真导致多路信号频谱中的各个频率出现谐波，并出现多路信号频谱各频率的组合所构成的分量。结果话路中便出现了在别的话路中传输的消息所引起的电流，这就是串音。在很多场合下，串音是提高无线电接力线路通过能力的主要障碍，并且与它们作斗争是十分复杂的课题。

（1）这种把若干个话路“群集”起来而组成的信道，本书中也统称为“群”（参阅第3·3节），包括通常所谓的前群（由3个话路组成）、基群（12个话路）和超群（60个话路）等。如果这些信道在微波频率再次进行复用（如图1·2所示），形成若干条独立的通信线路，则每个信道又称为一个“无线电波道”或一条“干线”（见下文）。——译注

在发展无线电接力通信的初期，曾有过一种普遍的见解，认为无线电信号采取频率调制，多路信号的非线性失真最小，因而话路中的串音也最小；为此，只要使调制器和解调器具有线性的特性并校正高频通道的群时延特性就行了。随着无线电接力通信技术的发展和无线电接力线路通过能力的提高，产生串音的许多前所未知的原因才一个接着一个地被弄清楚。看来，在无线电接力线路主要通道的一切部件中，几乎全部都可能产生串音；为了使串音最小，就应精确地校正各部件的特性，并正确地选择它们的参量。

现在我们来研究无线电接力线路在话路中产生的几种主要的串音及其产生的原因。

图1·1示出了无线电接力线路的通道结构略图，它由两个终端站（发射站和接收站）和一个外差式中间站组成。通道可分为群通道和高频通道：群通道是多路信号（群信号）在其中通过的通道，高频通道是经多路信号调频的无线电信号通过的通道。属于群通道部件的有：终端发射站输入端和终端接收站输出端的群放大器和调制器，有时还包括解调器。属于高频通道部件的有：限幅器、中频放大器、混频器、滤波器、高频放大器、天线馈线（波导）和天线。在群通道的部件中，串音是由于传输特性的非线性而产生的。在群放大器中，传输特性代表输出端瞬时电压值与输入端瞬时电压值的关系。在调制器中，传输特性代表输出端瞬时频偏值与输入端瞬时电压值的关系；在解调器中，则代表相反的关系。传输特性的非线性引起多路信号的非线性失真，因而在话路中引起串音。在滤波器、中频放大器和高频放大器等高频通道部件中，出现串音的主要原因是幅—频特性的不均匀性和相—频特性的非线性，它们导致调频无线电信号的频谱失真，因而使多路调制信号产生非线

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

性失真。当调频无线电信号通过高频通道各部件时，由于通道特性偏离理想特性，无线电信号将会被多路信号按照有失真的规律来进行调制，从而产生寄生调幅。在高频通道的某些部件中，这种寄生调幅被转换为调相，结果便导致多路信号的非线性失真和串音。在中频放大器中，特别是在限幅器、混频器和高频放大器的行波管中，由于多级电路的动态电容随信号幅度的改变而改变，就会产生调幅——调相变换。在所有这些部件中，输出信号的相位与输入信号的幅度有关，这也会产生调幅——调相变换。在限幅器中寄生调幅抑制不完全也会导致串音的出现，因为信号幅度的变化作用于鉴频器时，会使解调后的多路信号产生非线性失真。在天线馈线中，由于信号从馈线的两端（当不完全匹配时）和馈线各节的连接处反射，产生滞后于主信号的回波信号或伴流。主信号和滞后的回波信号同时作用于鉴频器，便使多路信号产生非线性失真。在相邻两站天线间的无线电信号传播区段上可能出现从地面或从大气不均匀性反射的滞后回波信号，结果也会引起串音。最后，还有一个产生串音的原因，这就是无线电干扰。如果有用调频信号和干扰信号同时作用于接收机，而且信号频谱与干扰频谱相互重叠，那么，在话路中就会出现由频谱重叠情况决定的串音。甚至于，即使信号频谱和干扰频谱不相重叠，但由于在高频通道部件中的调幅——调相变换的作用，也会产生串音。无线电干扰可分为内部干扰和外部干扰；前者是在无线电接力系统本身的内部产生的，后者则是由其它系统或其它无线电电子设备引起的。

图1·2示出八个无线电信道（八个波道）的无线电多路系统的频率分配方案。该方案以下述基本原理为基础：每一波道都分配给两个频率（分别用于发信和收信），所有发信频率都

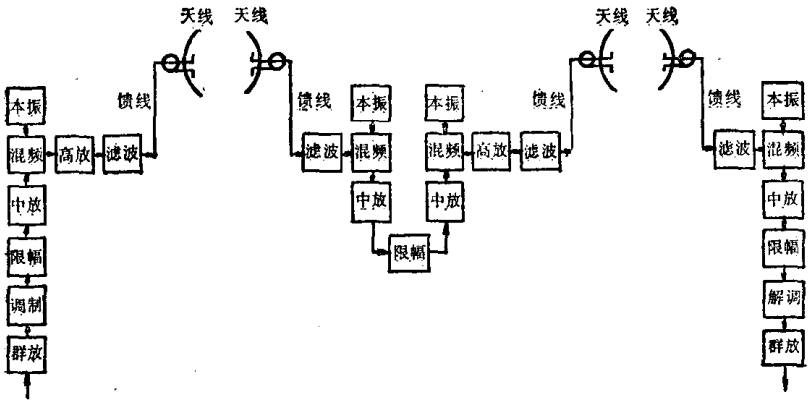

图 1·1　无线电接力线路的通道结构图

配置在所分给频带的一半之内，而所有的收信频率则配置在另半个频带内；相邻波道使用不同的天线和不同的电波极化；本机振震频率配置在各波道工作频率之间的间隔中，而各镜象波道的频率则配置在分给该系统的频带之内。所有频率与石英主振器的频率f_K成整倍数关系，并且相邻波道频率之间的间隔等于$2f_K$，收信频率与发信频率之间的最小间隔等于$3f_K$，而中频则等于$5f_K$。由图1·2可以看出，一些波道的镜象频率与另一些波道的工作频率相同。例如，1、2、3波道的镜象频率与6、7、8波道的工作频率相同；反之，6、7、8波道的镜象频率也与1、2、3波道的工作频率一致。因此系统的各波道之间便可能发生交叉干扰。

在系统内部，也可能由于收到从反方向来的信号和收到相隔三段的越站信号而产生另一类干扰。图1·3示出的图形可以解释这类干扰的产生原因。当按照类似于图1·2所示的频率配置方案工作时，在线路的每一个站上，两个通信方向的收信机

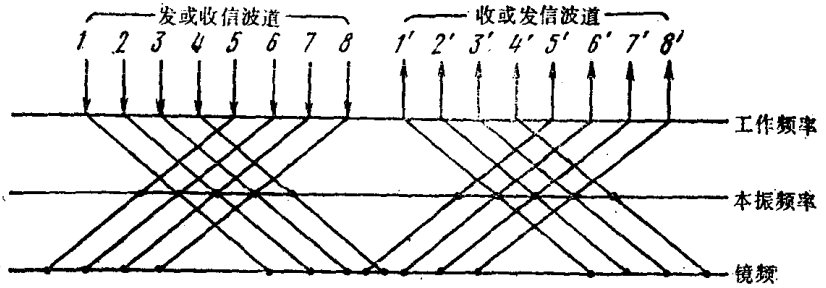

图 1·2 多波道无线电接力系统的频率配置方案

工作在同一个频率上，但使用不同的天线。如果天线的防护度不足以防止反方向的接收，则落到每部收信机中的除了有用的工作信号之外，还有来自相反方向的信号，后者就是干扰。发信频率和收信频率是逐站轮换的，因此，4 号站的收信频率同 2 号站的收信频率一样。在某种条件下，例如在超折射时，4 号站不仅收到来自 3 号站的信号，而且还可能收到来自 1 号站的信号。由于这两个信号的传播时间不同（来自 1 号站的信号滞后于来自 3 号站的信号），所以就会出现类似于天线馈线中的回波所引起的那种干扰。为了防止这类干扰，线路的路径应设计成折线形，α_1和α_2的角度可以从抑制干扰所必需的衰减出发根据天线的方向图来选择。

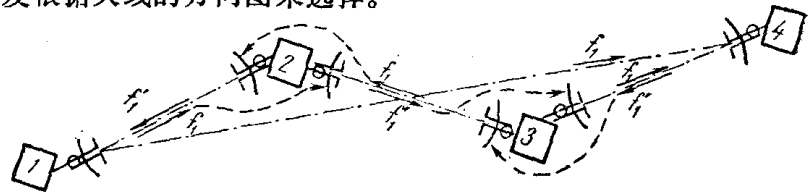

图 1·3 在无线电接力线路的路径上产生各种干扰的示意图
1、2、3、4——接力站的编号

在外部无线电干扰当中，值得指出的是与无线电接力线路工作在同一频段的卫星通信系统所产生的干扰。

无线电多路通信系统的另一种形式是卫星通信系统。包括地面发射站、卫星转发器和地面接收站在内的卫星通信线路，

与无线电接力线路不同之点在于：中间站（转发器）是安装在卫星上的；终端站（地面站）发信机的功率比无线电接力站发信机的功率大得多，收信机的灵敏度比无线电接力站的接收机高得多。卫星通信线路和无线电接力线路一样，也采用通道的频率复用和信号的频率调制，亦即采取两级调制——单边带调幅和调频。与其它通信系统相比，卫星通信系统的根本特点在于，各地面站是通过一个卫星转发器来实现相互之间的通信和组成通信网的。在这情况下，各地面站的信号都通过转发器的一个通道，而实现对转发器的所谓“多址”接续。实现多址接续的方法有好几种，但在采取频率复用和频率调制的系统中是采用按频率分割地面站信号的多址方式。这时，在转发器高频通道的频带内有许多信号，但它们的载频彼此隔开，使各信号的频谱实际上不相重叠。

在卫星通信系统中，话路中的干扰同样包括有热噪声和串音两部分。卫星线路的能位比无线电接力线路低，但却不存在信号的衰落，也没有噪声的累积，因为线路仅由具有一个中间站的两段组成。在地面站中采用高增益天线和低噪声参量放大器（用液氮乃至用氦蒸汽致冷），可以使话路中的热噪声保持在容许的范围之内。正象无线电接力系统中的情况一样，卫星通信系统中的串音具有同样重要的意义。在地面站和转发器中，同无线电接力线路的终端站和中间站一样，具有类似的一些部件，在这些部件中，也会产生上述各种串音。与无线电接力线路不同的是，卫星通信线路在无线电波传播区间不会发生串音，因为不存在回波信号。但是，在卫星线路上却会发生在无线电接力线路上所没有的另外一种串音。这种干扰是由几个地面站的信号通过同一个转发器时所引起的。由于转发器传输特性的非线性以及在转发器中发生的调幅——调相变换，便形

成非线性产物。奇次（主要是第三次）非线性产物落到各地面站的信号频带内，起了象无线电干扰那样的作用，使话路中出现串音。对该系统来说，这种无线电干扰是内部干扰，而工作在同一频段的其它卫星通信系统和地面上的无线电接力线路，则可能引起外部无线电干扰。

由上面的简短介绍可以看出，在无线电多路通信系统的话路中产生串音的原因是很多的。研究这些原因并确定与干扰作斗争的必要手段，对于无线电多路通信系统的研制和设计有着重要的意义。本书的下一章将研究在群通道、高频通道、天线馈线和无线电波传播区段上产生的串音，以及由于无线电干扰的作用而引起的串音。此外，还将研究由于高频通道特性偏离理想特性所引起的被传输消息的非线性失真。分析的结果得到了一些公式，这些公式适用于串音的工程计算，亦适用于确定对通道部件的要求，以保证干扰不超过容许值。

1·2 分析方法

多路信号的非线性失真表现为非线性产物的出现。非线性产物就是频率为多路信号频率整数倍的一些分量，以及频率为多路信号频率各阶组合的一些分量。非线性产物的一部分落在多路信号的频带内，便在话路中引起串音。显然，分析串音的最恰当的方法是频谱法，利用这种方法可以求出非线性产物在有用信号频谱中的分布并确定它们的大小。

多路信号是一种随机过程，因此应选用随机过程频谱分析方法。现在，我们写出在下一章分析串音时要用到的随机过程理论中的一些基本公式和关系。如果随机过程$\xi(t)$具有一维或二维的概率分布函数$w_1(x,t)$或$w_2(x_1,x_2,t_1,t_2)$，则其数字特征由下述各式确定：

平均值或数学期望

$$M[\xi(t)] = \overline{\xi(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} x w_1(x,t)\,dx = a_\xi(t).$$

方差

$$D[\xi(t)] = M[\xi(t) - \overline{\xi(t)}]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [x - a_\xi(t)]^2 w_1(x,t)\,dx$$

$$= \sigma_\xi^2(t).$$

相关函数

$$\psi_\xi(t_1,t_2) = M\{[\xi(t_1) - a_\xi(t_1)][\xi(t_2) - a_\xi(t_2)]\}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} [x_1 - a_\xi(t_1)][x_2 - a_\xi(t_2)]$$

$$w_2(x_1,x_2,t_1,t_2)\,dx_1 dx_2.$$

在后面的分析中，在大多数场合碰到的是函数的概率分布与计算时间的起点无关的平稳随机过程。如果一维分布函数$w_1(x)$与时间无关，而二维分布函数$w_2(x_1,x_2,\tau)$仅与增量$t_2 - t_1 = \tau$有关，则

$$M[\xi(t)] = \overline{\xi(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} x w_1(x)\,dx = a_\xi, \qquad (1\cdot1)$$

$$D[\xi(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} [x - a_\xi]^2 w_1(x)\,dx = \sigma_\xi^2, \qquad (1\cdot2)$$

$$\psi_\xi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} [x_1 - a_\xi][x_2 - a_\xi] w_2(x_1,x_2,\tau)\,dx_1 dx_2. \qquad (1\cdot3)$$

平均值和方差与时间无关而相关函数仅与增量$t_2 - t_1 = \tau$有关的过程，称为广义平稳过程。在分析串音时，我们运用的相关理论，使用不多于二维的分布和不高于二阶的矩，因此，我

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com