



相干通信技术

国防工业出版社

相 干 通 信 技 术

但 森

國防工業出版社

内 容 简 介

本书介绍相干通信技术的原理及其在跟踪测量、卫星通信、遥测、导航和雷达等领域中的应用,说明整机和部件的工程设计方法。叙述了相干通信的理论基础、锁相原理、频率稳定度的统计分析、跟踪接收、低门限解调、数字信号的相干检测和同步以及部件电路。

可供从事航天技术、通信和测量控制等方面的人员以及有关专业的院校、研制和使用单位参考。

相 干 通 信 技 术

但 森

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第074号

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 10 3/16 269 千字

1977 年11月第一版 1977 年11月第一次印刷 印数: 0,001— 6,500 册

统一书号: 15034·1585 定价: 1.30 元

目 录

第一章 绪论	7
§ 1-1 相干通信的初步知识	7
§ 1-2 相干通信的应用	12
第二章 调角信号和噪声	16
§ 2-1 随机过程的表征	16
§ 2-2 接收机噪声	20
§ 2-3 调角信号的表示式和功率关系	24
§ 2-4 模拟调角信号的功率谱	29
§ 2-5 数字调相信号的功率谱	34
§ 2-6 信号加噪声的概率分布	41
第三章 相干检波	48
§ 3-1 线性相干检波	48
§ 3-2 带通限幅器的性能	51
§ 3-3 具有预限幅的相干检波	51
第四章 锁相原理	69
§ 4-1 锁相环路的基本组成	69
§ 4-2 线性锁相环路的一般性能	72
§ 4-3 一阶和二阶环路	78
§ 4-4 三阶环路	86
§ 4-5 锁相环路的非线性分析	97
§ 4-6 取样锁相环和数字锁相环	108
第五章 相干系统中的频率稳定度分析	119
§ 5-1 频率稳定度的作用	119
§ 5-2 频率稳定度的定义和统计模型	121
§ 5-3 信标跟踪对频率稳定度的要求	130

§ 5-4	压控振荡器的频率稳定度对锁相环路的影响	134
§ 5-5	双向测量系统中频率源的稳定度对测量精度的影响	144
第六章	载波锁相接收	154
§ 6-1	载波锁相接收机的技术要求和基本组成	154
§ 6-2	调制对载波跟踪环路的影响	166
§ 6-3	限幅器的作用	166
§ 6-4	信道设计中的若干问题	172
§ 6-5	频率捕获方法	176
§ 6-6	载波锁相接收机的设计和计算	180
§ 6-7	复合跟踪接收	186
第七章	低门限相干解调	192
§ 7-1	调频体制及一般解调器的性能	192
§ 7-2	理想解调器和最优滤波器	199
§ 7-3	最优锁相解调器	202
§ 7-4	二阶锁相解调器的门限及最优参数	207
§ 7-5	二阶锁相解调器的设计	219
§ 7-6	其他低门限解调器	224
第八章	数字信号的相干检测和码位同步	230
§ 8-1	数字信号的误码率和匹配滤波器	230
§ 8-2	相移键控信号的形式和检测方法	240
§ 8-3	平方环路和同相-正交环路	244
§ 8-4	反调制环路	253
§ 8-5	参考相位抖动对误码率的影响	259
§ 8-6	码位同步及其影响	262
§ 8-7	连续同步器	265
§ 8-8	量化同步器	272
§ 8-9	频移键控信号的解调	280
第九章	部件原理和电路	286
§ 9-1	一般压控振荡器	286
§ 9-2	晶体压控振荡器	296

§ 9-3 鉴相器.....	307
§ 9-4 环路滤波器及控制电路.....	315
§ 9-5 自动增益控制电路.....	317
附录一 等效噪声带宽的计算公式	322
附录二 数字信号的功率谱	322
附录三 相干检波器输出信号的均方值	325

相 干 通 信 技 术

但 森

國防工業出版社

内 容 简 介

本书介绍相干通信技术的原理及其在跟踪测量、卫星通信、遥测、导航和雷达等领域中的应用，说明整机和部件的工程设计方法。叙述了相干通信的理论基础、锁相原理、频率稳定度的统计分析、跟踪接收、低门限解调、数字信号的相干检测和同步以及部件电路。

可供从事航天技术、通信和测量控制等方面的人员以及有关专业的院校、研制和使用单位参考。

相 干 通 信 技 术

但 森

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可証出字第074号

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 10 3/16 269 千字

1977 年11月第一版 1977 年11月第一次印刷 印数: 0,001— 6,500 册

统一书号: 15034·1585 定价: 1.30 元

前 言

在毛主席的革命路线指引下，我国科学技术事业贯彻执行了“独立自主、自力更生”的伟大方针，在很短的时期内，获得了飞跃的发展，取得了丰硕的成果。

尖端技术的发展，要求跟踪测量、遥测、遥控和通信等无线电系统具有十分优良和可靠的性能。相干通信技术是近十几年来得到迅速发展和广泛应用的无线电手段。这里所说的通信，广义上包括测量、控制和报话通信等信息传输的场合。相干的意思，就是利用信号的相位信息并进行同步、跟踪和解调。

在通信理论方面已经有不少专著。本书侧重于把相干通信方面的理论分析和实际应用相结合。在原理方面叙述了基础理论知识，对相干通信的基本方式进行了分析计算，说明物理意义、条件和适用范围；在应用方面针对工程实践中碰到的主要问题，介绍技术途径、性能及工程设计方法。

在本书前四章中，说明相干通信的基本概念和原理，主要是频谱分析、信号和噪声通过系统各环节时发生的变化以及锁相原理。所述内容在满足工程设计需要的范围内作了一些简化，以便明确物理概念和抓住主要问题。频率稳定度是一个经常涉及的重要问题，在第五章结合一些应用专门分析。在第六、第七和第八章中说明各种主要应用，其中包括跟踪接收、低门限解调以及相干数字通信等方面的技术途径和设计。第九章介绍主要部件的原理和电路。这些内容对于其他锁相系统的分析和设计，亦可作为参考。

关于编码方面的理论和技术，本书没有叙述。

本书在写作过程中得到有关领导和同志们的支持和帮助。原稿曾请陈芳允同志和其他同志审阅，他们提出的宝贵意见已采纳在书中。

目 录

第一章 绪论	7
§ 1-1 相干通信的初步知识	7
§ 1-2 相干通信的应用	12
第二章 调角信号和噪声	16
§ 2-1 随机过程的表征	16
§ 2-2 接收机噪声	20
§ 2-3 调角信号的表示式和功率关系	24
§ 2-4 模拟调角信号的功率谱	29
§ 2-5 数字调相信号的功率谱	34
§ 2-6 信号加噪声的概率分布	41
第三章 相干检波	48
§ 3-1 线性相干检波	48
§ 3-2 带通限幅器的性能	51
§ 3-3 具有预限幅的相干检波	51
第四章 锁相原理	69
§ 4-1 锁相环路的基本组成	69
§ 4-2 线性锁相环路的一般性能	72
§ 4-3 一阶和二阶环路	78
§ 4-4 三阶环路	86
§ 4-5 锁相环路的非线性分析	97
§ 4-6 取样锁相环和数字锁相环	108
第五章 相干系统中的频率稳定度分析	119
§ 5-1 频率稳定度的作用	119
§ 5-2 频率稳定度的定义和统计模型	121
§ 5-3 信标跟踪对频率稳定度的要求	130

§ 5-4	压控振荡器的频率稳定度对锁相环路的影响	134
§ 5-5	双向测量系统中频率源的稳定度对测量精度的影响	144
第六章	载波锁相接收	154
§ 6-1	载波锁相接收机的技术要求和基本组成	154
§ 6-2	调制对载波跟踪环路的影响	166
§ 6-3	限幅器的作用	166
§ 6-4	信道设计中的若干问题	172
§ 6-5	频率捕获方法	176
§ 6-6	载波锁相接收机的设计和计算	180
§ 6-7	复合跟踪接收	186
第七章	低门限相干解调	192
§ 7-1	调频体制及一般解调器的性能	192
§ 7-2	理想解调器和最优滤波器	199
§ 7-3	最优锁相解调器	202
§ 7-4	二阶锁相解调器的门限及最优参数	207
§ 7-5	二阶锁相解调器的设计	219
§ 7-6	其他低门限解调器	224
第八章	数字信号的相干检测和码位同步	230
§ 8-1	数字信号的误码率和匹配滤波器	230
§ 8-2	相移键控信号的形式和检测方法	240
§ 8-3	平方环路和同相-正交环路	244
§ 8-4	反调制环路	253
§ 8-5	参考相位抖动对误码率的影响	259
§ 8-6	码位同步及其影响	262
§ 8-7	连续同步器	265
§ 8-8	量化同步器	272
§ 8-9	频移键控信号的解调	280
第九章	部件原理和电路	286
§ 9-1	一般压控振荡器	286
§ 9-2	晶体压控振荡器	296

4007249

§ 9-3 鉴相器.....	307
§ 9-4 环路滤波器及控制电路.....	315
§ 9-5 自动增益控制电路.....	317
附录一 等效噪声带宽的计算公式	322
附录二 数字信号的功率谱	322
附录三 相干检波器输出信号的均方值	325

第一章 绪 论

§ 1-1 相干通信的初步知识

在噪声和干扰条件下,有效地传送信息,是无线电通信系统的一项根本任务。传送信息大体上有两种情况:一是在噪声和干扰中检出信号,即判断一个或几个信号是否存在,一是对信号进行估计,即给出信号参数值(如幅度、相位、频率和到达时间等)的范围。这两件工作有时是分别完成的,有时是相互联系的。

通常接收的信号是非常微弱的。例如,有的卫星无线电信号到达地面接收机时,功率只有一个微微瓦的千分之一到十万分之一。噪声淹没了信号,给信息传输造成困难。

为了探索有效的通信方法,要对噪声和干扰的性质进行分析研究,同时要尽可能多地利用信号的特征。如果我们能采取一些对信号特征有利而对噪声和干扰不利的措施,那么就能够较好地完成信号检测的任务。信号的相干性,就是信号的一个很重要的特征。

信号的相干性,是指信号的某个特定标记(通常指相位)在时间坐标上有规定的关系;具有这种性质的信号称为相干信号。例如,一台稳定振荡器的输出信号相位是稳定的,或者在有调制情况下,相位作为时间的既定函数而变化,这个振荡信号具有相干性。如果振荡相位是随机变化的,例如普通光源发出的光波,这个振荡是非相干的。

在相位相干通信系统中,解调器要求知道接收信号的相位,并使本地参考振荡的相位和信号的相位同步。所谓相干检测,就是利用信号载波相位来提取信息的方法;而非相干检测不要求知道信号的相位。

应当说明,即使是相干信号,它的某些参数可能是随机的。在

实际设备中,无论相位如何稳定,都含有随机成分。但是,只要随机成分占的比例很小,小到可以忽略它的作用,或者它的影响可以分析和控制,仍然可以认为信号是相干的或部分相干的。

由于相干信号除了其随机参数外具有规定的时间关系,就可以对输入信号和噪声的混合物进行某种时间域上的运算,再将运算结果加以判别或者与被测参数相联系。

一种典型的运算是互相关。设信号为 $S(t)$, 噪声为 $N(t)$, 信号与噪声的混合物为

$$r(t) = S(t) + N(t) \quad (1-1)$$

$S(t)$ 可能是一组规定的信号中的一个,也可能是其参数被信息调制的波形。互相关运算就是

$$\int r(t) S_r(t) dt \quad (1-2)$$

式中 $S_r(t)$ 是接收端产生的与信号有密切相关关系的本地参考。理论分析表明,互相关运算是进行最优相干检测的一个必要的步骤。除互相关运算外,还要求对运算结果用恰当的方式进行鉴别。

下面举一个相干通信的简单例子。有一调幅信号为

$$S(t) = A(t) \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-3)$$

它与传输中或接收机中产生的噪声 $N(t)$ 相叠加,经过初步滤波后,与本地参考 $S_r(t)$ 相乘,设

$$S_r(t) = \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-4)$$

然后经过低通滤波器输出,上述处理过程参阅图 1-1。这是相干检波(或称同步检波)的一种简单形式。本地参考与信号频率相同,并且是相位相干的,乘积检波可用鉴相器(或称相敏检波器)来实现,低通滤波可以起积分作用。因此这也就是一种互相关器,虽然在积分作用上可能不够完善。根据信号 $A(t)$ 的性质,可以采取相应的处理办法。例如,若 $A(t)$ 为几个不同的电平,则应在低

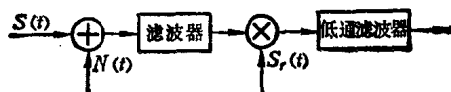


图 1-1 相干检波

通滤波器后设立鉴别电平标尺;若 $A(t)$ 为极缓慢的信号,则应采用极窄带的低通滤波器,再送到记录仪。前一种情况就是数字通信中采用的一种检测方法,而后一种方式已经用在某些精密的物理测量中作为同步放大器。

相干通信的应用相当广,它在跟踪测量、相位解调、低门限接收和数字信号同步等方面起很重要的作用,所处理的信号也比上述例子复杂得多。有时它不仅是较好的而且是必须的手段。由于相干通信在本质上利用了信号相位这一重要的信息,与不利用该信息的非相干通信(例如幅度检波)比较起来,它具有很大的潜力。

在实际的接收解调设备中,噪声往往是窄带的,这种噪声可以分解为相互独立的两个分量。进行相干检波时,在与信号相位相干的本地参考及滤波器的作用下,可以消除一部分噪声分量的作用,从而改善输出质量。采用相干参考就是一种对信号特征有利而对噪声不利的措施,有关问题在第二、第三章中详述。

在数字通信中,如果采用相干检测,可以减少误码;特别是对于数字调相(相移键控)信号,相干检测过程与理论上分析的最优解调方法相符合。数字调相信号的相干检测体制在占用功率、带宽和抗干扰等方面比较优越,是一种先进的通信方法,有关问题在第八章中详述。

相干检波可以在较低的输入信噪比下工作,这是相干通信方式的另一个重要优点。只要乘积检波器能起乘积运算的作用,它就可以抑制部分噪声而保持上述性能。设计良好的乘积检波器,可以允许输入信噪比低达 $-20 \sim -60$ 分贝,因而可以在强噪声中检出微弱信号。我们知道,一般幅度检波在低输入信噪比下性能要恶化。例如平方律检波器在输入信噪比为零分贝时,输出信噪比降至 -4.7 分贝,线性幅度检波器虽然在输入信噪比很高时接近相干检波,但在低输入信噪比时性能也是很差的。

如果信号幅度 $A(t)$ 变化很慢,信号占用频带很窄。在一些情况下极窄的载频滤波是难以实现的。如果用相干检波,可在检波后

采取容易制作的窄带低通滤波器，其作用等效于带宽加倍的窄带载频滤波器。

这里会提出一个问题：与信号相干的本地参考振荡是怎样产生的？这是进行相干通信的一个关键。这个相干参考是用自动控制环路的办法产生的。有一振荡器，其频率与信号频率相近，把它的相位与信号相位作比较。比较出来的误差，经过滤波平滑，再作用到振荡器，不断纠正它的相位与信号相位的误差，于是这个受输入电压控制的振荡器（压控振荡器）的输出振荡相位，近似与输入相位一致，近似的程度取决于相位跟踪误差。这个设备就是锁相环路（图 1-2）。

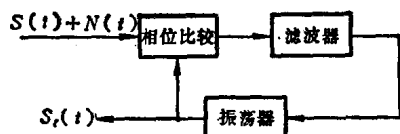


图 1-2 相干参考振荡的产生

我们还可以从直观的信号处理过程，进一步考察这种环路的作用。假定信号是调频波（调频和调相是可以相互转化的），用图 1-3(a)所示的普通鉴频器可以解调。由于调频信号占有一定的频带，在鉴频器之前的带宽应基本上使信号频带通过。然而，在某一时刻，频率为某一数值，为了其他时刻的频率而准备的带宽现在是不必要的，它使噪声通过，恶化了鉴频器的性能。假定我们设计一个其中心频率跟随输入信号频率而变的滤波器，其带宽窄到信号频率在很短的时间内不超出它，那么较多的噪声被滤除，鉴频器的性能就会有大的改善，参阅图 1-3(b)。其中鉴频器测量信号瞬时频率，将比例于信号频偏的电压滤波和平滑，再作用于可控滤波器，使其中心频率随信号频率而变。这个办法还可另用另一等效方案代替：窄带滤波器做成固定的，鉴频器的输出经滤波后去控制一可调振荡器，使其频率与信号频率相差为一个中频，中频信号频偏已经比输入信号频偏小很多，因而可以通过滤波器，这样就得到图

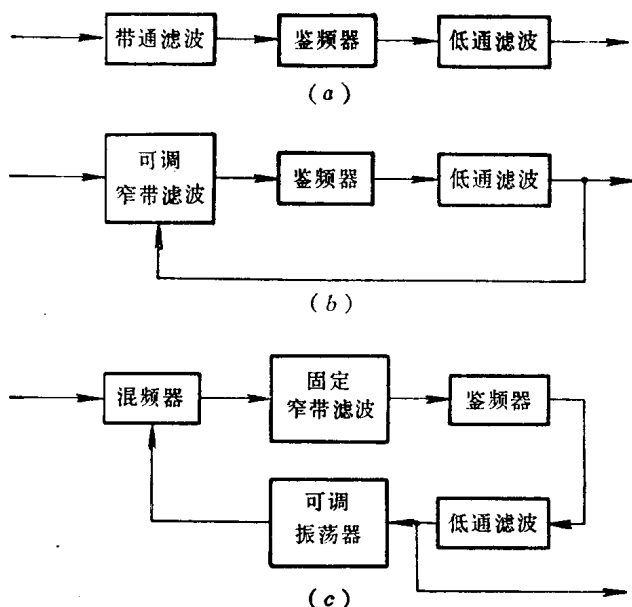


图 1-3 解调方式的改进

(a) 普通鉴频器; (b) 跟踪滤波鉴频器;
(c) 调频负反馈鉴频器

1-3(c)所示的调频负反馈鉴频器。既然频率能这样处理,相位亦可仿此照办。把鉴频器换成鉴相器,配上适当的低通滤波器,可使振荡器的相位跟随信号相位而变化,这样就得到了图 1-2 所示的锁相环路。由于鉴相器就起到乘积检波的作用,故在一些应用中把相干解调和参考的提取合成一体;如果不便,则可加一平行的乘积检波器,利用环路的参考。锁相环路的原理将在第四章中说明。

锁相环路的出现和应用不是偶然的。信号检测的统计理论证明,当相位误差较小时,上面从物理概念引出的锁相环路不仅性能较好,而且从均方误差最小的角度来看,是信号相位的最优估计设备。相位估计的统计分析^[1-11],必然导出锁相环路,而不是别的设备。事实上,当相位误差较小时,环路各部分都近似线性化,于是锁相环路就等效为信号相位的线性滤波器。用成熟的线性滤波理