

无线电导航系统信号的 搜索、检测和参数的测量

[苏] IO.M. 卡扎里诺夫 主编

于志才 译

547951

国防工业出版社

译 者 的 话

信号检测理论是统计判决理论在通信、雷达、无线电导航和自动控制等技术中的应用。这一理论的应用大大促进了这些技术的发展,因此,信号检测理论现已成为这些技术的基础理论之一。该理论在通信、雷达和自动控制等技术方面的应用已有不少专著,但是,在无线电导航技术方面的应用过去仅散见于一些期刊上,本书是第一本专论有关无线电导航系统信号检测理论的著作。

无线电导航系统信号的检测具有它自己的特点,特别是远程脉冲和脉冲-相位测距差无线电导航系统信号,其工作频段、信号波形和传播条件等完全不同于一般通信和雷达中常见的信号。

因此,为了满足我国无线电导航事业蓬勃发展的需要,翻译出版这本书,以供从事无线电导航专业工作的广大读者参阅。

信息检测理论研究的对象是各种信息传输系统信号的接收部分,研究的内容是在噪声或其它干扰情况下处理信号的方法。通常,信号检测理论要解决的问题包括:信号检测、参数测量和波形复现三个方面的内容。这里所谓的信号检测是指狭义的检测,即按照某种准则得到的判决规则,在有噪声或其它干扰的情况下,判断被接收的实现中是否存在信号。虽然在信号检测时,被判断的接收实现也是接收机平方

检波器或线性检波器的输出，但是，不应把它与一般外差式接收机的包络检波或第二检波混为一谈。

本书的特点是：介绍分析理论时，紧紧地围绕着具体的工程实例。这正是广大从事工程实践的读者所希望的。特别值得指出的是：书中对当前正在发展中的，并在国际上已得到广泛使用的远程脉冲-相位无线电导航系统信号处理方法的研究尤其有实际参考价值。在导航接收指示器中，应用本书所阐述的数字接收法和相干信号检测与参数测量的模算法规则（模接收法），对无线电导航设备本身以及系统的战术技术指标均会有极大的改善和提高。

在翻译过程中对原书中的印刷错误作了删除和改正。但是，由于水平有限，遗漏和不妥之处在所难免，请广大读者予以指正。

本书承蒙马业勤、赵树阁、吴今培、陈伦、桂锦安等同志帮助审核了部分章节，王万义和李景玉同志对译文最后定稿给予了很大帮助，在此特向他们表示感谢。

目 录

第一章 引论	1
第二章 脉冲信号和起伏干扰通过固定参数线性系统的 传输	10
2.1 信号和起伏干扰的基本特性	10
2.2 线性系统的分析法 (一般概念)	21
2.3 频率分析法	22
2.4 时间分析法	28
2.5 次佳滤波器	32
第三章 信号和起伏干扰对无线电导航系统非线性 回路的作用	33
3.1 非线性回路的形式	33
3.2 线性检波器	34
3.3 平方律检波器	39
3.4 相关检波法	41
3.5 限幅器和量化器	44
第四章 脉冲信号和起伏干扰对可变参数线性回路的 作用	49
4.1 同步积累器	49
4.2 时间鉴别器	56
第五章 无线电导航信号的检测	73
5.1 信号检测问题的统计处理方法	73
5.2 检测的统计准则 似然比	75
5.3 确知信号最佳检测接收机的结构和质量指标	82

5.4	初相未知而强度已知信号的最佳检测法	90
5.5	幅度起伏信号的最佳检测	107
5.6	射频脉冲列的非相干检测	110
5.7	多频信号检测的特点	115
5.8	未知相位信号的模检测接收机	121
5.9	起伏信号和非相干弱射频脉冲列模检测接收机的效率	133
5.10	信号的相位检测法	140
5.11	相干信号的数字检测装置	155
5.12	相干信号序贯检测法简介	175
第六章	无线电导航系统脉冲信号的搜索	185
6.1	引言	185
6.2	每一点分析时间固定时串行搜索法的质量指标	188
6.3	每一点分析时间固定时并行和并-串行搜索法的 质量指标	191
6.4	序贯分析法的质量指标	194
6.5	多级分析法的质量指标	197
6.6	关于多(个)频率信号搜索时积累装置的 合理利用问题	203
6.7	关于在工程上实现无线电导航系统信号搜索装置时的 一些问题	206
第七章	脉冲时间位置测量装置的结构和质量指标	211
7.1	引言	211
7.2	关于最佳测量器的理论	212
7.3	视频脉冲时间位置的测量	214
7.4	射频脉冲时间位置的测量	223
7.5	模接收机在测量未知初相射频脉冲时间位置中的 应用	229
7.6	最佳误差信号	239
7.7	可移动脉冲时间位置测量的特点	242

7.8 跟踪测量器	245
7.9 用时间鉴别法和时间锁定法实现潜在测量精确度	256
第八章 信号脉冲载频相位的测量	263
8.1 引言	263
8.2 最佳测量器及其潜在精度	264
8.3 在限幅情况下的相位测量	272
8.4 相位测量的双择锁定法	283
8.5 相位跟踪测量器起伏误差的计算	286
8.6 关于在工程上实现数字相位跟踪测量器时的 一些问题	293
第九章 消除相位读数多值性的方法	298
9.1 一般特性	298
9.2 消除多值性装置的综合	301
9.3 强限幅信号概述	310
9.4 双择量化消除多值性装置的质量指标	315
9.5 关于在工程上实现消除多值性装置时的一些问题	317
本书所用主要符号	322
参考文献	324
俄中名词对照索引	327

第一章 引 论

无线电导航系统的基本任务是确定用户运动的坐标和参数（速度和加速度），因此，无线电导航系统和无线电定位系统一样，同属于提取信息的系统。在有些无线电导航系统中也借助通信方式向用户或由用户向信息收集点传递信息。

在提取信息的系统中，所有信息的处理都集中在无线电接收设备内，而在无线电导航系统中，接收设备往往与指示（输出）设备合二为一，并称为接收指示器。

无线电电子学和统计通讯理论的发展，使得借助数字装置，根据所需要近似程度最合理地处理信号。同时，有可能实现：用较高的精确度和稳定性处理信息；增加信息的积累时间；借助计算机技术的标准元件实现复杂的变换；与数字计算机直接结合等。因此，现代无线电导航系统的接收指示器就是与信号匹配的线性接收系统和处理信号的专用计算机的组合装置。

最近几年，脉冲-相位测距差系统得到了广泛的发展，因此，迫切需要研究处理类似系统信号的方法和电路，而且在这方面得出的结论和建议，绝大部分也适用于测距系统。

在测距差系统中，借助于安装在用户处的接收指示器测量来自两个固定发射台 A 和 B 的信号到达的时差，这一时差通常被称为无线电导航参数。其中 A 台称为主台， B 台称为

副台，因为前者同步着后者。一个无线电导航参数只能确定出一个位置面，测距差系统的位置面是双曲面。就测距差系统的大多数实际应用来说，可以认为接收指示器和导航台位置均在地面上。在这种情况下，根据无线电导航参数得到的位置线会是双曲线。对于任意给定的一个台对，如 A 台和 B 台，就可测量出一簇以 A 台和 B 台所在位置为公共焦点的双曲线。通常，将已知台间距离为 d 的双曲线格网复印于地图（或海图）上，并以时间（微秒）为单位标出 B 台信号对 A 台信号的延迟数字。

因为一对地面台只能确定出一条位置线，所以，为了确定用户在地球表面上的位置坐标，就必须用两个台对，其中主台（ A ）是公用的，并同步 B_1 和 B_2 两个副台工作。这种系统的位置线格网由两簇相交的双曲线组成。

测距差系统（往往也称为双曲线系统）的优点是：作用距离远，这是因为它可工作于长波和超长波段，从而容许建立强大功率的地面台；定位精确度高，这是因为它可采用精确的相位测量法测量延时；用户容量无限和用户本身无需安装发射装置。

按照发射信号的形式，测距差系统可分为：脉冲式系统和连续波（或准连续波）式系统。脉冲系统发射的信号，可以是以时间、脉-相或别的编码方式调制的周期型单个脉冲或脉冲组列。

副台信号相对主台的延时，可以用测量其相位、频率或直接测量其时差的方式确定。因此，测距差无线电导航系统又可以分成：相位式系统、频率式系统和时间（脉冲）式系统。

原则上讲，相位系统的测量精确度最高，但是，它的固有缺点是消除天波信号对接收指示器的影响很困难，这是因为天波信号经过电离层一次或多次反射后，相对基波（地波）信号会产生延时的缘故。另外，消除相位读数多值性的困难也是明显的。

在脉冲无线电导航系统中，实际上很容易区分天地波信号，因而在较远的距离处可利用地波信号进行精确的定位。但是，只利用脉冲包络测量延时还不能充分利用该系统可能达到的最好精确度。在组合式脉冲-相位系统中，用测量填充脉冲包络载波的相差确定无线电导航参数，而用测量脉冲信号的包络消除相位测量的多值性。采用长波工作，用地波信号能保证可靠而精确地定位，且作用距离达2000~2500公里。

脉冲-相位无线电导航系统的这些优点使其可广泛地用于船舶和飞机的远程无线电导航。

现在，脉冲-相位无线电导航系统《罗兰-C》已得到了广泛应用，其工作频率为100千赫⁽²⁸⁾。北半球已有八个台链在工作，这些台链已能保证对其表面的四分之三的区域提供无线电导航信息。每一个台链由一个中心台一主台和二至四个副台组成。各台轮流发射的脉冲组，由宽度为135微秒（在0.5电平处）的八个脉冲组成（主台为九个脉冲）。在每一个脉冲组内，脉冲之间的时间间隔 $T_n=1000$ 微秒。

各台链以射频脉冲组的重复周期进行识别， S 、 SH 、 SL 和 SS 各组相应的微秒数可以由下列公式求得⁽²⁸⁾：

$$T_s = (500 - N)100$$

$$T_{SH} = (600 - N)100$$

$$T_{sl} = (800 - N)100$$

$$T_{ss} = (1000 - N)100$$

每一组又由八个 ($N = 0, 1, 2, \dots, 7$) 递推的周期组成。

现在扼要地介绍脉冲-相位无线电导航系统接收指示器的组成和无线电导航参数的测量，后者是无线电导航接收指示器的最根本用途。在接收指示器中，必须依次完成以下工作：

一搜索主台信号，并使测量器的选通脉冲与主台地波信号的前沿重合；

一根据信号载波振荡的频率和相位对接收指示器的基准振荡器的频率和相位进行自动微调；

一搜索副台信号，并使测量器的选通脉冲与副台地波信号的前沿重合；

一测量主、副台信号的相位差；

一测量副台脉冲前沿相对主台脉冲前沿的时差；

一消除相位读数的多值性并输出导航参数。

为了简单起见，下面假设只讨论单个射频脉冲工作和搜索已完成的情况。这就可从接收指示器的方框图（图1.1）中消除与脉冲组相位编码和自动搜索信号有关的电路。因此，图1.1所示的接收指示器的简化方框图仅是在测量状态下的有关电路，并且，为了更简单，只研究确定一条位置线的情况，这样就限制在方框图中只有副台B的通道。

接收到的主、副台信号，通过放大器和与单个脉冲组匹配的线性滤波器（ЛФ），加到基准振荡相位不同的相位检波器（ФД）和同步检波器（СД）上。在跟踪状态下，基准

放大和平滑之后，在跟踪 A 台信号时，驱动电动机 $\Pi 1$ ，在跟踪 B 台信号时，驱动电动机 $\Pi 3$ 。在这时，相应的选通脉冲就移到与每个信号的特征点重合。在分频器的输入端用改变移相器 ($\Phi B1$) 的基准振荡相位的方法可移动选通脉冲 A ，分频器把 $f_0 = 100$ 千赫的频率分频至该台对的重复频率。选通脉冲 B 的移动借助于电动机 $\Pi 3$ 控制延时装置 ($Y3$) 的延时来保证。

无线电导航参数由计数器指示，其中，时差（包络）是读数的粗测部分，而相差则是其精测部分。这时如果时差测量的最大误差不超过载频振荡周期 T_c 的一半，则相位测量的非单值性就可自动消除。在这种情况下，设备误差将取决于相位测量精确度，通常相位测量精确度可达到 $2'$ ，这样在 $f_0 = 100$ 千赫时，其相应的时间误差为 0.05 微秒。

接收指示器的实际方框图包括把相位检波器的基准电压编成与主、副台射频脉冲组相位编码一致的编码装置。

在自动搜索信号状态，基准选通脉冲可自动移动直到与相应的信号脉冲重合。当信号脉冲码和基准脉冲码重合时，脉冲组的自动搜索即完成。

因为对于系统在以给定的可靠性进入跟踪状态时所需的积累时间随着信噪比减小而增大，所以自动搜索的时间取决于信噪比，系统在进入跟踪状态之后，才能转入测量状态。

采用电动机跟踪系统的接收指示器模拟式电路存在着严重的缺点，研究它只是为简要地说明一下无线电导航参数的测量原理。最近几年已研制成完全由集成电路构成的数字式接收指示器，并得到日益广泛的应用，从而，不仅可以提高可靠性，减小体积，减轻重量和降低耗电功率，而且还

可以提高抗干扰性和测量精确度，所以集成电路的应用开辟了应用最佳和准最佳方法处理信号的道路，研究这些方法是本书以下各章的主要内容。

数字接收指示器的构成原理，可以用《罗兰-C》系统的数字接收指示器的简化方框图（图1.2）为例说明。该图引自参考文献^[58~56]。在数字接收指示器中，信号的搜索和

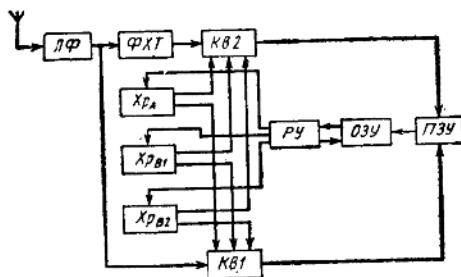


图1.2 数字接收指示器简化方框图

自动跟踪以及相位读数多值性的消除都是利用数字积累器和数字跟踪系统实现的。经过线性滤波之后的信号，在量化器（KB1）中按时间和电平量化。其后的运算就是处理由量化器得到的数字。这些数字经中间寄存器（Π3Y）加到主存储器（O3Y）。

来自量化器输出端的信息进入中间寄存器的瞬时与该信息进入主存储装置的瞬时是一致的，这由主台定时器（XpA）和副台定时器（XpB1和XpB2）的脉冲确定。这种一致的必要性往往是构成主存储装置的循环原理要求的（例如，利用超声波延迟线时），因为计算机给定的地址数与实际地址数不同。

在信号搜索状态，来自量化器 $K\sigma 1$ 输出端的数字在主存储装置的存储单元中被积累，在时刻与时间轴上这样一些点一致，这些点是搜索选通脉冲从定时器进入到量化器 ($K\sigma 1$) 的询问时刻。用现代大容量小型存储装置作为主存储装置，就能并行（多通道）地积累时间轴上各点的信息，即并-串搜索，这种搜索方式与串行（1个通道）搜索方式相比，能较快地确定无线电导航参数。

在存储器各存储单元中为了得到一定的可信度，信息的积累必须经过足够的时间，并按照给定的门限值在运算装置中进行比较。如果在所有的存储单元中没有一个单元的积累值超过门限值，运算装置就认为在该分析段没有信号，并把相应台的定时器转移到时间轴上的下一个点集进行分析。若其中有一个积累通道（即主存储器的一个存储单元）超过了门限值，则运算装置就认为时间轴上相应的点为有信号。在这时，检测到信号那个台的定时器就向信号检测装置置入一个跟踪选通脉冲。通常，主台搜索总是第一个实现，主台搜索完成之后，运算装置就发出转换向副台搜索的指令。副台搜索与主台搜索相似，但是花费的时间较少，因为其先验不定性较小，也就是说预先已知主、副台信号相互间的大致位置。

找到所有台的信号之后，定时器的选通脉冲便与相应的信号脉冲重合，于是接收指示器就转入信号的自动跟踪状态，连续地给出无线电导航参数的测量结果。在这时，量化器 $K\sigma 1$ 起着信号自动跟踪系统敏感元件的作用，而对回路所要求的无静差阶数和放大系数取决于主存储装置。在自动跟踪状态，运算装置给相应的定时器置入一个脉冲，修正跟踪

选通脉冲的位置使其与各台信号脉冲的位移一致。

为了提高测量精度,接收指示器往往采用载波信号相位跟踪技术,因而,要求预先知道消除相位读数多值性的情况。为了达到这一目的,在上述方框图中,采用了一个称为特征点形成装置(ΦXT)的电路,这是一个专用线性滤波器,在它的输出端,信号的相位在固定点改变 180° 。该信号在量化器 $K_{\Phi 2}$ 中被量化,所得的数字经中间寄存器加到主存储装置相应的单元。对于每个台的信号来说,在主存储装置中进行积累的信息都是取自相隔一个载频周期 T_0 的两个点。为此,就要从每个定时器向量化器 $K_{\Phi 2}$ 置送一对相互距离 T_0 的消除多值性选通脉冲。运算装置分析每个台信号占用的两个存储单元中积累的数字,并在作用相应的定时器的同时移动消除多值性选通脉冲,直到这些脉冲位于特征点两侧时为止,也就是直到积累结果的符号不同时为止。对所有三个台的信号都完成这一步骤之后,便可从接收指示器的数字显示器上立即读出该瞬时的无线电导航参数。

即使对接收指示器的工作原理作了上述简单地介绍,也不难看出,无线电导航信号的特点使得它的处理方法和装置与雷达系统的类似方法和装置有着本质的区别。而研究雷达系统信号处理方法和装置的专著已有很多种。关于脉冲-相位无线电导航系统处理的问题,基本上只散见于一些杂志上。一些有关无线电导航的书籍^[2,4,26]大都由于出版较早,因而,没有介绍现代无线电导航系统信号的处理方法和装置。本书的目的就是试图阐明无线电导航信号的一些最重要的理论问题和处理装置的设计。

第二章 脉冲信号和起伏干扰通过 固定参数线性系统的传输

2.1 信号和起伏干扰的基本特性

在现代脉冲无线电导航系统中，所采用的信号是极广泛的。通常，这种射频脉冲列的形式为：

$$u_c(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k U_0(t - kT_n) \cos[\omega_0(t - kT_n) + \gamma(t - kT_n) + \varphi_k + \varphi] \quad (2.1)$$

式中 A_k ——确定脉冲组包络的幅度因子； $U_0(t)$ 和 $\gamma(t)$ ——分别为单个脉冲包络和相位的调制规律； φ_k ——脉冲对脉冲的已知相位调制规律； φ ——初相； T_n ——脉冲重复周期； N ——每个脉冲组所包含脉冲的个数。另外，当无线电导航系统的信号为脉冲组列的形式时，则表示式为：

$$u_c(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{N-1} A_k U_0(t - kT_n - lT_{nn}) \times \cos[\omega_0(t - kT_n - lT_{nn}) + \gamma(t - kT_n - lT_{nn}) + \varphi_k + \varphi] \quad (2.2)$$

式中 L ——周期为 T_{nn} 和包含有 N 个脉冲的脉冲组的组数。

从处理信号的观点来看，最重要的是区分相干和非相干脉冲列。对于相干脉冲列，脉冲对脉冲的相位调制规律 φ_k 在

接收点应是已知的。脉冲列的相位编码定义为整数幅角 φ_k 的函数^[28]。相干序列以初相 φ 是否已知来区分。

如果 φ_k 是在区间 $[0, \pi]$ 均匀分布的独立随机变量, 则序列 (2.1) 和 (2.2) 称为非相干序列。在实际工作中, 我们常常遇到的情形是部分相干, 这时 $\varphi_k = \varphi_{k_0} + \Delta\varphi_k$, 式中, φ_{k_0} 是已知的相位调制规律, $\Delta\varphi_k$ 是未知的和脉冲对脉冲改变的相位增量。

公式 (2.1) 所表示的信号形式是部分相干序列的典型例子, 这种信号是在接收机相对发射机移动的速度 v , 未知的条件下得到的, 因此不考虑干扰和载频的变化, 只考虑多普勒效应时, 所接收的信号为

$$u_c(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k U_0(t - kT_n - \tau - k\Delta\tau) \times \cos[\omega_0(t - kT_n - \tau - k\Delta\tau) + \gamma(t - kT_n - \tau - k\Delta\tau) + \varphi_k + \varphi]$$

式中 τ —— 相对接收序列初始点的延迟时间; $\Delta\tau$ —— 在一个周期 T_n 中延迟时间的变化, $\Delta\tau = vT_n/c$ (c —— 电磁波在空间的传播速度)。在这种情况下, 附加的相位增量 $\Delta\varphi_k = k\omega_0\Delta\tau$ 。

下面较详细地分析描述单个脉冲包络 $U_0(t)$ 的情况。对于工作在中波波段的脉冲无线电导航系统, 通常采用高斯型近似包络, 即

$$U_0(t) = U_m e^{-at^2} \quad (2.3)$$

式中 U_m —— 信号的幅度; a —— 与包络宽度 $\tau_{1/d}$ 有关的参数, 在 U_m 的 $1/d$ 电平处, 该宽度可以用如下的方法计算: